Upotreba karata ranjivosti, opasnosti i rizika od onečišćenja podzemnih voda u svrhu zaštite okoliša

Somogji, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

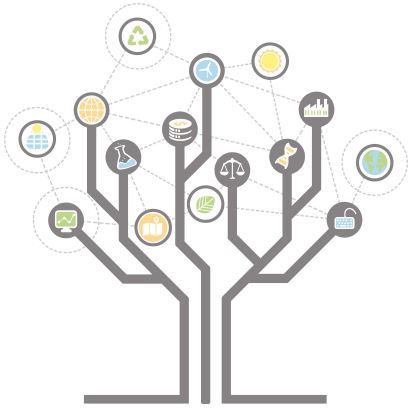
2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:397848

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

MARIJA SOMOGJI

UPOTREBA KARATA RANJIVOSTI, OPASNOSTI I RIZIKA OD ONEČIŠĆENJA PODZEMNIH VODA U SVRHU ZAŠTITE OKOLIŠA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2020.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva

za _____ u _____ sa

Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred

ispitnim povjerenstvom u Varaždinu

Varaždin, _____

Predsjednik
ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Igor Petrović

Članovi povjerenstva

1) Doc. dr. sc. Jelena Loborec
2) Izv. prof. dr. sc. Hrvoje Meaški
3) Prof. dr. sc. Sanja Kapelj

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

UPOTREBA KARATA RANJIVOSTI, OPASNOSTI I RIZIKA OD ONEČIŠĆENJA PODZEMNIH VODA U SVRHU ZAŠTITE OKOLIŠA

KANDIDAT:

MARIJA SOMOGJI



MENTOR:

doc. dr. sc. JELENA LOBOREC



VARAŽDIN, 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnica: MARIJA SOMOGJI

Matični broj: 181 - 2017./2018.

Smjer: UPRAVLJANJE VODAMA

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

UPOTREBA KARATA RANJIVOSTI, OPASNOSTI I RIZIKA OD ONEČIŠĆENJA PODZEMNIH VODA U SVRHU ZAŠTITE OKOLIŠA

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Prirodna ranjivost podzemnih voda
3. Analiza opasnosti od onečišćenja
4. Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda
5. Primjeri korištenja analize ranjivosti u zaštiti okoliša
6. Zaključak
7. Popis literature

Pristupnica je dužna predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 18.03.2020. Rok predaje: 07.09.2020.

Mentor:
Jelena Loborec
Doc.dr.sc. Jelena Loborec

REPUBLIKA HRVATSKA 1 GEOTEHNIČKI FAKULTET VARAŽDIN SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

Predsjednik Odbora za nastavu:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

Upotreba karata ranjivosti, opasnosti i rizika od onečišćenja podzemnih voda u svrhu zaštite okoliša

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc.dr.sc. Jelene Loborec.**

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 07.09.2020.

MARIJA SOMOGYI
(Ime i prezime)

(Vlastoručni potpis)

IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom:

Upotreba kazala ranjivosti, opasnosti i rizika od onečišćenja podzemnih voda u svrhu zaštite okoliša

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog završnog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti završnog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 7.9.2020.

JELENA LOBOREC
(Mentor)

Jelena Loborec
(Vlastoručni potpis)

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici doc.dr.sc. Jeleni Loborec na razumijevanju, iznimnom trudu, pomoći i vodstvu prilikom pisanja ovog rada. Također se želim zahvaliti i članovima povjerenstva na mišljenju i konstruktivnim kritikama te svim drugim djelatnicima Geotehničkog fakulteta koji su ostavili neizbrisiv trag tijekom mojeg studiranja.

Hvala i svim mojim prijateljima i kolegama koji su mi bili velika podrška.

Na kraju želim zahvaliti svojoj obitelji bez čije podrške i motivacije ovo sve ne bi bilo moguće, a osobito zaručniku Denisu, sinu Lucasu i pokojnom ocu kojem želim posvetiti ovaj rad. Hvala ti tata što si od prvog dana mojeg studija vjerovao da ja to mogu i bio uvijek tu kada je zatrebalo, uspjela sam ostvariti ono što si oduvijek želio.

Svima još jednom hvala od srca!

SAŽETAK

Ime i prezime: Marija Somogji

Naziv rada: Upotreba karata ranjivosti, opasnosti i rizika od onečišćenja podzemnih voda u svrhu zaštite okoliša

Okoliš, kao pojam koji obuhvaća sve što ga okružuje, dugo vremena čovjek nepromišljeno narušava. Aktivnosti zaštite okoliša od antropogenog djelovanja postaju važan segment gotovo svih ljudskih djelatnosti. Znanstvena i stručna zajednica svakodnevno radi na razvoju i primjeni metoda i postupaka kojima bi se povećala funkcionalnost i dostupnost tih metoda. Zaštita svih sastavnica okoliša postala je jedan od glavnih ciljeva, a posebno se to odnosi na podzemne vode kao vrlo osjetljivom, a ujedno nezamjenjivom prirodnom resursu. Metode procjene prirodne ranjivosti, opasnosti i rizika od onečišćenja, kao i produkcija karata koje su krajnji rezultat tih metoda, predstavljaju novije, ali sve češće korištene postupke istraživanja u svrhu zaštite okoliša. U ovom radu prikazane su spomenute metode, kao i primjeri na kojima su one uspješno primijenjene. Upotreba karata prirodne ranjivosti omogućava identifikaciju ranjivih kao i prirodno bolje zaštićenih dijelova prostora te na taj način omogućava učinkovito prostorno planiranje. Karte izvora opasnosti predstavljaju slikovit prikaz raspodjele problematičnih objekata koji bi mogli predstavljati hazard za okoliš, a korištenjem karata rizika od onečišćenja moguće je vrlo učinkovito identificirati ključne dijelove na kojima treba primijeniti posebne mjere zaštite ili postupke sanacije kako ne bi došlo do daljnjeg narušavanja kvalitete okoliša.

Ključne riječi: prirodna ranjivost, izvori opasnosti, rizik od onečišćenja, zaštita okoliša

ABSTRACT

Name and surname of the author: Marija Somogji

Title: Using vulnerability, hazard and risk of groundwater contamination maps for the purpose of environmental protection

The environment, as a term that encompasses everything that surrounds it, has long been recklessly disturbed by man. Environmental protection activities from anthropogenic impact are becoming an important segment of almost everything that man does. Scientific and professional community works daily on the development and application of methods and procedures that could increase the functionality and availability of these methods. The protection of all components of the environment has become one of the main goals, especially of groundwater as a very sensitive and at the same time an irreplaceable natural resource. Methods for assessing intrinsic vulnerability, hazards and risks of contamination, as well as the production of maps that are the final result of these methods, are newer research procedures that are becoming increasingly used for environmental purposes. The paper presents, the mentioned methods, as well as examples to which they have been successfully applied. The use of intrinsic vulnerability maps enables the identification of vulnerable as well as naturally better protected parts of researched areas, and thus enables effective spatial planning. Hazard source maps are an illustrative representation of the distribution of problematic facilities that could pose threat to the environment. By using contamination risk maps, it is possible to effectively identify key parts where special protection measures or remediation procedures should be applied in order to avoid further environmental degradation.

Keywords: intrinsic vulnerability, sources of hazard, risk of contamination, environmental protection

Sadržaj

1. UVOD....1

2. PRIRODNA RANJIVOST PODZEMNIH VODA 3

2.1. EPIK metoda procjene ranjivosti....8

2.2. COP metoda procjene ranjivosti....12

3. ANALIZA OPASNOSTI OD ONEČIŠĆENJA 19

4. PROCJENA RIZIKA OD ONEČIŠĆENJA PODZEMNIH VODA 23

5. PRIMJERI KORIŠTENJA ANALIZE RANJIVOSTI U ZAŠTITI OKOLIŠA 27

5.1. Metode ranjivosti kod definiranja zona sanitarne zaštite izvorišta pitke vode 27

5.2. Karte ranjivosti u prostornom planiranju....29

5.3. Procjena ranjivosti podzemnih voda za određivanje lokacije odlagališta otpada 30

5.4. Procjena ranjivosti u službi zaštite špiljskog sustava 33

5.5. Procjena rizika od zaslanjenja podzemnih voda 36

5.6. Primjer cjelokupne procjena rizika podzemne vode u industrijskom području i povezani utjecaj na močvarno područje u blizini urbane sredine u Grčkoj....37

6. ZAKLJUČAK....44

7. POPIS LITERATURE 46

POPIS SLIKA....50

POPIS TABLICA....52

1. UVOD

Čovjek i njegov okoliš neraskidivo su povezani, što se najbolje očituje u njihovom međudjelovanju. Ustav Republike Hrvatske [1] ističe očuvanje prirode i čovjekova okoliša kao jednu od najviših vrednota ustavnog poretka RH, a u skladu s tim se zaštita okoliša uzdiže među najviše vrijednosti u pravnom sustavu. Zakonom o zaštiti okoliša [2] definirani su svi važni postupci, mjere i dokumenti zaštite okoliša i svih njegovih sastavnica u skladu s konceptom održivog razvitka. Razvoj funkcionalnih metoda i znanstvenih istraživanja u svrhu zaštite okoliša zadaća su kojoj se poklanja sve više pažnje među znanstvenicima i stručnjacima koji se bave okolišem.

Metodologija procjene ranjivosti, opasnosti i rizika od onečišćenja podzemnih voda jedna je od novijih metoda istraživanja koje su u posljednja dva desetljeća doživjela veliku ekspanziju primjene. Iako prvenstveno razvijene u svrhu zaštite podzemnih voda kao jednog od najvažnijih prirodnih resursa na Zemlji, kroz godine i situacije iznašle su se razne mogućnosti njihove primjene. Naime, opće je poznato da su zalihe podzemne vode odgovarajuće kvalitete ograničene, a rizik od onečišćenja s površine sve je veći, pogotovo razvojem industrije i urbanizacijom i to upravo u područjima gdje su potrebe za njima najveće. Iz toga razloga počelo se proučavati kvalitativno i kvantitativno stanje podzemnih voda te smanjenje mogućeg antropogenog utjecaja na vodonosnike. Budući da su sve sastavnice okoliša povezane, smanjenje onečišćenja vode posljedično može dovesti do smanjenja onečišćenja tla te flore i faune, tj. poboljšati ekološko stanje okoliša.

Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda sastoji se od tri pojedinačne analize. Prvi korak je procjena prirodne ranjivosti podzemnih voda koja prikazuje stupanj do kojeg prirodna svojstva okoliša štite podzemnu vodu od antropogenih utjecaja koji potencijalno dolaze s površine. Do sada su razvijene brojne metode procjene prirodne ranjivosti vodonosnika no još nije pronađena univerzalna metoda koja bi mogla biti primjenjiva na svim područjima i za sve vodonosnike. Svaka metoda obuhvaća nekoliko sličnih faktora koji se prilagođavaju promatranom području i dostupnim podacima. Rezultat takve analize je karta ranjivosti koja na promatranom području izdvaja dijelove koji su ranjiviji ili pak bolje zaštićeni od mogućeg onečišćenja. Slijedeći korak kod ocjene antropogenih utjecaja na podzemnu vodu je provedba analize opasnosti, tj. izrada karte opasnosti, odnosno hazarda. Karta prikazuje prostorni raspored mogućih izvora onečišćenja od

ljudskog djelovanja. Procjena opasnosti obuhvaća određivanje stupnja štetnosti koji potencijalna opasnost može imati na podzemne vode, a uzimaju se u obzir svojstva samog hazarda i vanjski utjecaji koji mogu smanjiti mogućnost pojave opasnog događaja. Zadnji korak procjene je analiza rizika koja se provodi u dvije faze. Prva faza je procjena intenziteta rizika, odnosno kombiniranje prirodne ranjivosti sustava i provedene analize opasnosti, koja ustvari kao rezultat daje vjerojatnost pojave štete na vodonosnom sustavu uslijed hazardnog događaja. Druga faza procjene rizika podrazumijeva određivanje osjetljivosti na rizik, odnosno posljedice do kojih će doći uslijed pojave štete.

U ovom radu obrađena je i predstavljena metodologija procjene rizika od onečišćenja podzemnih voda kroz korake same procjene. Prikazano je i nekoliko konkretnih primjena iz objavljene znanstvene i stručne literature u kojima su analize ranjivosti, opasnosti ili rizika primijenjene u svrhu zaštite okoliša. Na prikazanim lokacijama dokazano je da metodologija analize rizika nije sama sebi svrha, već je vrlo koristan alat kojim se mogu upotpuniti istraživanja u svrhu zaštite izvorišta vode za ljudsku potrošnju, procjenu zaslanjenja vodonosnika ili istraživanja u svrhu smanjenja štetnih utjecaja odlagališta otpada. Moguće ih je također primijeniti u prostornom planiranju kao i u akcijskim planovima za planiranje sanacijskih zahvata u područjima gdje je već detektirana degradacija kvalitete okoliša.

2. PRIRODNA RANJIVOST PODZEMNIH VODA

Prirodna ranjivost podzemnih voda prikazuje na koji način prirodna svojstva okoliša štite podzemnu vodu od potencijalnih antropogenih utjecaja koji najčešće dolaze s površine ili pripovršinske zone terena (npr. upojni zdenac ili septička jama). Prva procjena ranjivosti podzemne vode zabilježena je još davne 1968. godine, a sam pojam ranjivosti podzemne vode od onečišćenja uveo je Jean Margat [3]. Od tada su brojni znanstvenici razvijali brojne metode procjene ranjivosti najčešće prilagođene području koje istražuju i dostupnim im podacima. Još 1994. godine Vrba i Zaporozec daju pregled do tada razvijenih metoda te prvu pravu definiciju ranjivosti kao kvantitativnog, relativnog, nemjerljivog i bezdimenzionalnog svojstva prirodnih sustava. Oni također predlažu podjelu ranjivosti na prirodnu, vezanu isključivo za prirodne, hidrogeološke uvjete i specifičnu ranjivost koja uzima u obzir svojstva onečišćivača i međudjelovanje onečišćivača i hidrogeološkog sustava [4].

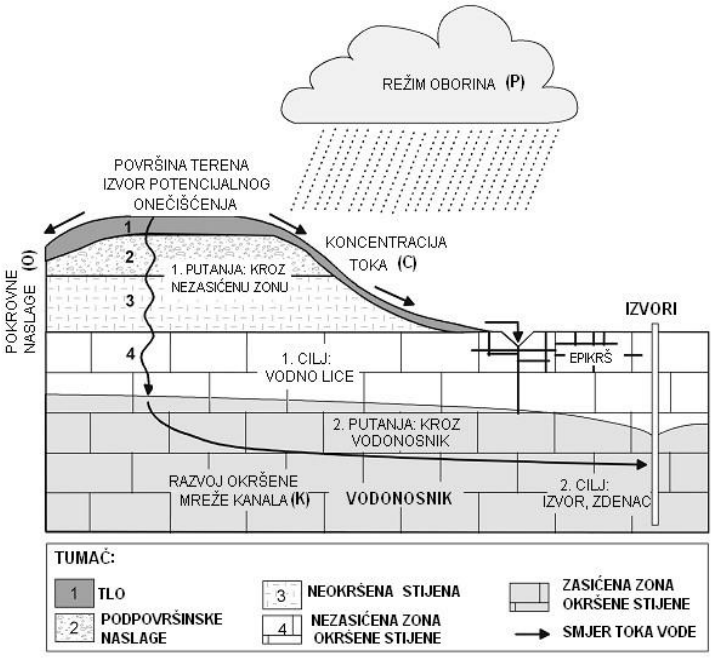
Veliki iskorak u procjeni ranjivosti i zaštite podzemnih voda, osobito krških vodonosnika, bio je projekt Europske unije, takozvani COST 65 "*Carst groundwater protection*" gdje je ranjivost vrlo određeno stavljena u službu zaštite podzemnih voda, ne više isključivo u znanstvene svrhe već s mogućnostima primjene istih u istraživanju zona zaštite izvorišta pitke vode u kršu. Unutar tog prikazana je i postojeća zakonska regulativa za donošenje zona i mjera zaštite podzemnih voda te daljnje preporuke u tom smjeru, što je rezultiralo razvojem brojnih metoda procjene ranjivosti u narednom periodu [5].

Općenito, metode koje su se razvijale u tom periodu mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine. Najjednostavnije od njih su metode hidrogeološkog kompleksa i u njima se ranjivost procjenjuje na kvalitativan način, odnosno na temelju usporedbe sličnih hidrogeoloških, morfoloških i hidrografskih značajki. Za razliku od toga, više parametarske metode kvantitativno vrednuju određene parametre prilikom ocjene ranjivosti [6]. Parametarske metode dijele se na tri podskupine:

- Metode matričnog sustava (*MS – Matrix System*) – kombinira se mali broj odabranih parametara i najpoznatiji primjer je Irska metoda [7].
- Metode jednostavnog vrednovanja (*RS – Rating System*) – koriste se parametri konstantnog raspona vrijednosti, a procjena ranjivosti dobiva se zbrajanjem ili množenjem promatranih parametara (npr. GOD metoda [8]).

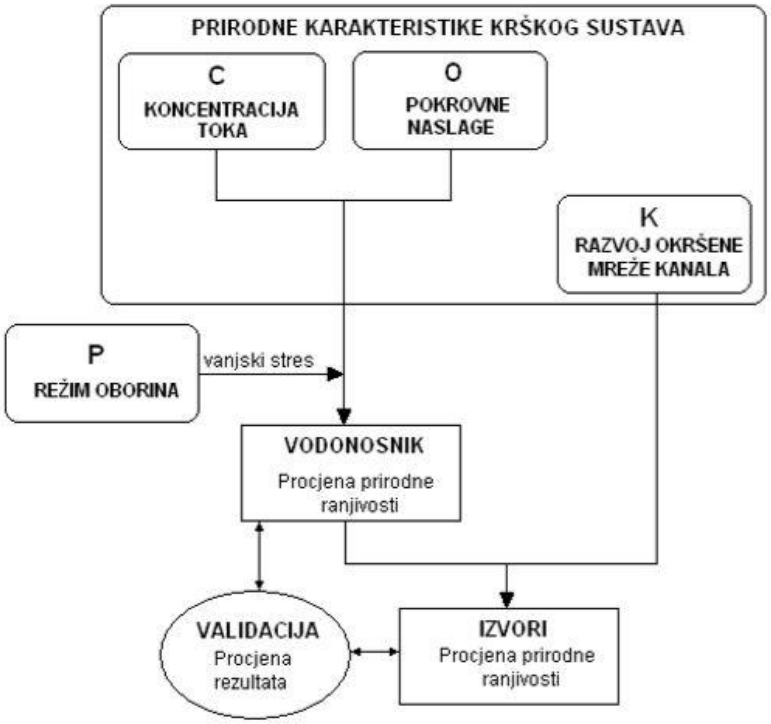
- Metode bodovanja s dodjeljivanjem težinskih vrijednosti (*PCMS – Point Count System Models*) – težinski faktori množe parametre i naglašavaju utjecaj nekog parametra u odnosu na druge (DRASTIC [9], EPIK [10], SINTACS [11])

Iako su parametri koji su se uvrštavali u metode dosta slični, primjenom različitih metoda na istom području dobivale su se vrlo raznolike karte ranjivosti. Da bi se te razlike umanjile, tj. da bi rezultati primjene različitih metoda bili bolje usklađeni i usporedivi, pokrenut je novi projekt COST 620 "*Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*" kojim su utvrđene metodologija i usuglašene smjernice za procjenu ranjivosti i rizika [12, 13]. Nove smjernice nazvane su Europski pristup no važno je napomenuti da to nije nova metoda već definicije i objašnjenje parametara koji su se do tada koristili, ali su bili interpretirani na različite načine. Također su unutar tog projekta jednoznačno definirani pojmovi i utvrđene razlike između procjene ranjivosti, opasnosti i rizika, ranjivosti izvorišta ili ranjivosti čitavog vodonosnika te razlike procjene prirodne ranjivosti i specifične ranjivosti. Europski pristup omogućuje standardiziranu procjenu na svakom području uz mogućnost prilagodbe lokalnim uvjetima. Na Slici 1. prikazan je model Europskog pristupa koji objedinjuje najvažnije segmente opisa ranjivosti, odnosno model „porijeklo – put – cilj“.



Slika 1. Model „porijeklo – put – cilj“ [prema: 12]

Ovaj model razjašnjava razliku između dva osnovna pristupa u procjeni ranjivosti, a to su zaštita vodonosnika i zaštita izvorišta. Iako zaštita izvorišta podrazumijeva zaštitu vodonosnika, obratno nije slučaj te se zbog toga prati cijeli „put“ onečišćenja do „cilja“. „Porijeklo“ onečišćenja je uvijek na površini terena te se zbog toga promatra potencijalni izvor onečišćenja s površine te njegov vertikalni „put“ kroz nesaturiranu zonu do prvog „cilja“, odnosno vodonosnika, a potom i sam horizontalni tok kroz saturirani dio vodonosnika do drugog „cilja“, odnosno izvorišta. Kod ovog modela jasno je uočen utjecaj četiri glavna faktora koja utječu na ranjivost (prikazana na Slici 2). Faktori procjene su krovinske naslage (O – *overlaying layers*), koncentracija toka (C – *concentracion of flow*), režim oborina (P – *precipitation regime*) i stupanj okršenosti vodonosnog sustava (K – *karst network development*).



Slika 2. Shema izrade karata ranjivosti kombinacijom parametara O, C, P i K [prema: 12]

O faktor podrazumijeva zaštitnu funkciju pokrovnih slojeva, tla i nezasićene zone, kao medija u kojem može doći do razrjeđenja i zadržavanja potencijalnog onečišćenja.

Vrijednost faktora O ovisi o značajkama pokrovnih slojeva (poroznost i propusnost) i njihovoj debljini.

U Europskom pristupu, pokrovne naslage podijeljene su u četiri sloja:

- Tlo – nastalo trošenjem stijena na površini, a sastoji se od minerala, organske tvari, vode, zraka i živih bića
- Podpovršinske naslage – nalaze se ispod tla, nekonsolidirane su, a važnost im se povećava ako sadrže makropore
- Nekrške stijene (ovisno o tipu stijene)
- Nesaturirane okršene stijene (epikrška zona) – ukoliko epikrška zona koncentrira tokove, ne smatra se zaštitnim elementom.

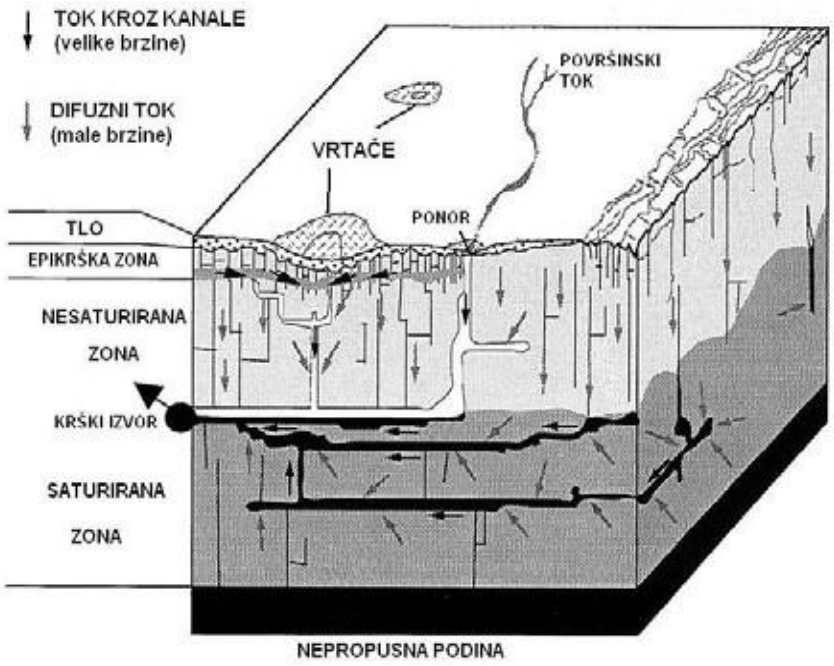
C faktor prikazuje stupanj koncentracije oborina prema mjestima brze infiltracije u krško podzemlje, a ovisi o parametrima koji utječu na površinski tok kao što su nagib, značajke površinskih slojeva (debljina, propusnost, infiltracijski kapacitet tla), vegetacija i prisutnost mjesta koncentrirane infiltracije (ponori, jame, vrtače). Kod difuznog prihranjivanja vodonosnika, faktor C nema veliki značaj na povećanje ranjivosti.

P faktor predstavlja ukupne godišnje oborine, učestalost oborina, njihovo trajanje i intenzitet ekstremnih događaja. Ovaj faktor utječe na tip i količinu infiltracije i formiranje površinskog otjecanja, a vanjski je čimbenik koji utječe na sve ostale parametre.

K faktor predstavlja stupanj okršenosti vodonosnika i razvoj mreže okršenih kanala. Prvenstveno horizontalni tokovi kroz saturiranu zonu vodonosnika. Ocjena faktora K temelji se na geološkim svojstvima podloge, izdvajanju geomorfoloških obilježja, rezultatima trasiranja podzemnih tokova, probnim crpljenjima, geofizičkim istraživanjima, podacima dobivenim bušenjem i drugim dostupnim istraživanjima. Koristi se samo kod procjene ranjivosti izvorišta.

Karte ranjivosti izrađuju se pomoću poznatih rezultata istraživanja geoloških, hidrogeoloških i hidroloških uvjeta promatranog područja. Svaki krški sustav ima specifična obilježja vidljiva na Slici 3 koja je potrebno uvažiti kod izrade karata no povezuje ih nekoliko osnovnih značajka. Krški slivovi obično su velikih dimenzija, povezuju velike dijelove terena te je teško odrediti granice slivova, anizotropija i heterogenost ograničavaju primjenu interpolacije i ekstrapolacije podataka, dva različita načina prihranjivanja vodonosnika (difuzno kroz naslage i koncentrirano kroz

geomorfološke objekte), teško određivanje postojanja i stupnja razvoja epikrške zone, dvojna funkcija epikrške zone (pozitivna – ako su pukotine ispunjene sitnozrnatim materijalom i negativna – ako pukotine koncentriraju podpovršinske tokove), dominantna pukotinska i pukotinsko kavernozna poroznost te intergranularna poroznost u matriksu stijene, dvije komponente toka (brza – brza reakcija na hidrološko događaje zbog prolaska kroz pukotine i kanala i spora – dugo zadržavanje vode u podzemlju zbog prolaska kroz matriks stijene i male pukotine i prsline) i vrlo teško određivanje vodnog lica koje je diskontinuirano i oscilirajuće do nekoliko desetina metara u kratkom vremenskom razdoblju.



Slika 3. Konceptualni model krškog vodonosnika [14]

Budući da se u kasnijim primjerima spominju neke od metoda procjene ranjivosti, u nastavku su one kratko predstavljene.

2.1. EPIK metoda procjene ranjivosti

EPIK metoda [10, 13] razvijena je u Švicarskoj i osnova je Europskog pristupa. Ova metoda u startu je razvijena kako bi se poboljšala metodologija izrade zona sanitarne zaštite izvora pitke vode u Švicarskom kršu te je time najbolje ocrtana njena konkretna primjena. Kod EPIK metode proučavaju se četiri obilježja krških vodonosnika: epikrška zona, pokrovne zaštitne naslage, uvjeti infiltracije i stupanj okršenosti, a svako od navedenih svojstava predstavlja jedan od parametara u procjeni ranjivosti EPIK metodom. Konačni rezultat metode su četiri stupnja ranjivosti, a metoda se koristi isključivo za vodonosnike u kršu dok se parametri procjenjuju temeljem konceptualnog modela krškog sustava.

Parametar E – značajke epikrške zone. Obuhvaća izrazito razlomljene i rastrošene podpovršinske naslage. Značajke epikrške zone teško je kvantificirati zbog izrazite heterogenosti koja otežava istraživanja. Klase epikrške zone određuju se na temelju površinskih obilježja krša koje ukazuju na svojstva epikrške zone. Površinska obilježja izdvajaju se iz topografskih podloga različitih mjerila, a izdvojeni objekti se potvrđuju i dopunjuju ukoliko su dostupne satelitske slike promatranog područja. Na Slici 4 vidljive su tri osnovne klase epikrške zone. Dobro razvijena zona označava područja kod kojih je epikrška zona dobro povezana s krškom mrežom i vodonosnikom, umjereno razvijena zona predstavlja područja koja mogu biti dobro razvijena no slabo su ili nikako povezana s vodonosnikom, dok je treća klasa zona slabo razvijene ili potpuno odsutne epikrške zone.

PARAMETAR **E** - Epikrška zona

EPIKRŠ	KLASA	KRŠKA MORFOLOŠKA OBILJEŽJA
Dobro razvijeni	E_1	Ponori, jame, vrtače, ogoljene krške zaravni, izrazito izlomljeni izdanci i zasjeci uz ceste.
Umjereno razvijeni	E_2	Umjerene zone krških zaravni, suhe doline, srednje razlomljeni izdanci.
Slabo razvijeni ili odsutan	E_3	Nisu prisutni krška morfološka obilježja.Vrlo slaba razlomljenost.

Slika 4. Dijagram određivanja klasa parametra E [15]

Parametar P – značajke pokrovnih zaštitnih naslaga, uključujući tlo i ostale nekrške naslage poput kvartarnih naslaga praha, prapora i stijenskog kršja te gline i pješčenjaka. Kao i kod SINTACS metode, najznačajniju ulogu kod zaštite vodonosnika ima tlo koje zbog svojih fizičkih, kemijskih i bioloških svojstava može omogućiti zadržavanje onečišćenja. Vrijeme zadržavanja vode unutar tla ovisi o debljini sloja te ako je debljina veća, vodonosnik je manje ranjiv jer se povećava mogućnost procesa smanjenja opterećenja. Funkcija pokrovnih naslaga kod EPIK metode određuje se ovisno o tome da li je tlo izravno na vapnencima ili drugim dobro propusnim naslagama ili se ispod tla nalazi više različitih slojeva slabije propusnosti. U oba slučaja parametar P se dijeli u četiri klase, ovisno o debljini pojedinih slojeva prema podjeli danoj na Slici 5. za određivanje parametra P koriste se geološke, pedološke i topografske podloge i dostupne satelitske snimke, a podaci se provjeravaju istraživanjima na terenu.

PARAMETAR **P** - Pokrovne naslage

POKROVNE NASLAGE	KLASA	KARAKTERIZACIJA	
		A) Tlo izravno na vapnencima ili nekim drugim dobro propusnim naslagama	B) Tlo ispod kojeg se nalazi više različitih slojeva slabe propusnosti
ODSUTNE ↓ PRISUTNE	P_1	0 - 20 cm tla	0 - 20 cm tla na naslagama debljine manje od 1m
	P_2	20 - 100 cm tla	20 - 100 cm tla na naslagama debljine manje od 1 m
	P_3	100 - 200 cm tla	<100 cm tla ili >100 cm tla i >100 cm naslaga slabe propusnosti
	P_4	> 200 cm tla	>100 cm tla na debelim naslagama slabe propusnosti ili >8 m gline i zaglinjenog praha

Slika 5. Dijagram određivanja klasa parametra P [15]

Parametar I – uvjeti infiltracije, odnosno način prihranjivanja vodonosnika u kršu bez određivanja količine infiltrirane vode i lokacije infiltriranja. U EPIK metodi prisutne su četiri klase infiltracije: koncentrirano prihranjivanja, difuzno prihranjivanje, srednja klasa u kojoj površinsko otjecanje može imati važnu ulogu te ostatak sliva, a njihova karakterizacija prikazana je na Slici 6. Procjena parametra I radi se kroz nekoliko koraka. Prvi korak je izdvajanje podslivova rijeka ponornica i ponorne zone kao dijela sliva koji ima koncentrirano prihranjivanje. Druga i treća klasa infiltracije određuju se pomoću

nagiba terena i vegetacije, a označava područje difuznog prihranjivanja vodonosnika s površinskim otjecanjem. Posljednja klasa je ostatak sliva, to su sva ona područja sliva koja ne pripadaju u prethodne tri klase. Druga i treća klasa određuje se pomoću vrijednosti koeficijenta otjecanja za različite vrijednosti nagiba terena, a vegetacija se dijeli na šume, livade i pašnjake te obrađene površine. Područja s većim nagibom i manjom vegetacijom smatraju se ranjivijima jer su podložnija stvaranju koncentriranih tokova i infiltracije u podzemlje.

PARAMETAR **I** - uvjeti **I**nfiltracije

UVJETI INFILTRACIJE	KLASA	KARAKTERIZACIJA
KONCENTRIRANO ↓ DIFUZNO	I_1	Stalne ili povremene rijeke ponornice, uključujući i umjetne drenažne sustave, te okolica ponora ili vrtača u kojima dolazi do koncentrirane infiltracije vode u podzemlje.
	I_2	Slivovi ponornica iz klase I_1 (bez umjetnih drenaža) s nagibom terena većim od 10% za obrađene površine i 25% za livade/pašnjake
	I_3	Slivovi ponornica iz klase I_1 (bez umjetnih drenaža) s nagibom terena manjim od 10% za obrađene površine i 25% za livade/pašnjake. To su područja koja skupljaju vodu koja otječe sa strmijih područja (I_2).
	I_4	Ostatak sliva

Slika 6. Dijagram određivanja klasa parametra I [15]

Parametar K – stupanj okršenosti sustava. Uključuje razvoj mreže kanala i pukotina u krškim stijenama promjera većeg od 10 mm kroz koje se odvija turbulentan tok vode. EPIK metodom dobivaju se tri klase rangiranja okršenosti sustava kao što je prikazano na Slici 7. Prema ovoj klasifikaciji, mreža kanala može biti dobro razvijena okršena mreža kanala, slabo razvijena okršena mreža kanala i raspucani vodonosnik. Vrijednosti parametra K procjenjuju se jedinstveno za cijeli sliv zbog nemogućnosti detaljnog kartiranja svojstava krškog vodonosnika. Pokazatelji stupnja okršenosti, odnosno razvoja mreže kanala su prisutnost jama, vrtača, ponora i špiljskih sustava koji su vidljivi na površini terena. Izostanak ovih geomorfoloških oblika nije pokazatelj da sustav nema okršenu mrežu.

PARAMETAR **K** - stupanj oKršenosti sustava

MREŽA KANALA	KLASA	KARAKTERIZACIJA
Dobro razvijena	K_1	Prisutna dobro razvijena okršena mreža (rijetko začepljeni i dobro spojeni kanali decimetarskih ili metarskih dimenzija)
Slabo razvijena	K_2	Prisutna slabo razvijena okršena mreža (mreža malih pukotina ili ispunjenih pukotina ili slabo spojena mreža ili decimetarski i manji otvori)
Raspucani vodonosnik	K_3	Prisutni izvori nastali u poroznom terenu. Samo raspucani, ne okršeni vodonosnik.

Slika 7. Dijagram određivanja klasa parametra K [15]

Nakon procjene vrijednosti sva četiri parametra izračunava se zaštitni faktor F_p pomoću empirijske formule (1) s težinskim koeficijentima:

$$F_p = \alpha \cdot E_i + \beta \cdot P_i + \gamma \cdot I_i + \delta \cdot K_i \quad (1)$$

Vrijednosti pojedinog parametra ovise samo o klasi u koju su svrstani. Klase parametara prikazane su Tablicom 1, a težinski koeficijenti Tablicom 2. Što je niža vrijednost zaštitnog faktora F_p to je viši stupanj ranjivosti.

Tablica 1. Vrijednosti E, P, I i K parametra [10]

Epikrška zona			Pokrovne naslage				Uvjeti infiltracije				Stupanj okršenosti		
E_1	E_2	E_3	P_1	P_2	P_3	P_4	I_1	I_2	I_3	I_4	K_1	K_2	K_3
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

Tablica 2. Vrijednosti težinskih faktora α, β, γ i δ [10]

Epikrška zona (E)	Pokrovne naslage (P)	Uvjeti infiltracije (I)	Stupanj okršenosti (K)
α	β	γ	δ
3	1	3	2

Raspored klasa iz Tablice 3 određen je tako da niži broj klase ujedno predstavlja i niži stupanj zaštite vodonosnika od onečišćenja, odnosno, što je niža klasa, ranjivost je veća. U Tablici 4 vidljivo je da najniži težinski faktor zaštite imaju pokrovne naslage. Time se umanjuje eventualno precijenjeni utjecaj debljine pokrovnih naslaga. Najveće vrijednosti težinskih faktora dodijeljene su utjecaju epikrške zone i infiltraciji zbog njihovog izrazitog doprinosa smanjenju stupnja ranjivosti, osobito kada je epikrška zona slabije razvijena ili odsutna, a infiltracija difuzna jer u takvim uvjetima zaštita vodonosnika ne ovisi o pokrovnim naslagama. U Tablici 3 prikazane su konačne vrijednosti faktora F_p te su predložene zone sanitarne zaštite krških izvorišta (S_i).

Tablica 3. Raspodjela klasa ranjivosti vodonosnika ovisno o vrijednostima zaštitnog faktora i predložene zone sanitarne zaštite izvorišta u kršu [10]

KLASA RANJIVOSTI	ZAŠTITNI FAKTOR F_P	ZONA ZAŠTITE S_i
Vrlo visoka	< 19	S_1
Visoka	20 – 25	S_2
Umjerena	> 25	S_3
Niska	Prisutnost P_4	Ostatak sliva

2.2. COP metoda procjene ranjivosti

COP metoda prati temeljne koncepte i terminologiju „Europskog pristupa“ , a vrednuju se tri osnovna faktora koja opisuju ranjivost vodonosnika C, O i P [16].

O – faktor krovinskih naslaga (Overlying layers) – pokazuje mogućnost da slojevi nesaturirane zone vodonosnika razrijede i smanje nepovoljan učinak onečišćenja. Procjenjuje se kombinacijom ocjene značajki tla (O_S) i litološke građe nesaturirane zone (O_L). Podfaktor tla O_S opisuje značajke biološki aktivnog dijela naslaga u kojima se mogu očekivati procesi zadržavanja onečišćenja i smanjenja ranjivosti za podzemne vode. Značajke tla koje se proučavaju su sastav, tekstura i debljina koji se određuju pomoću koraka I i II prikazanih na Slici 8. Ako na promatranom području nema tla, vrijednost O_S

= 0. Podfaktor O_L ili litološki podfaktor objašnjava svojstva zadržavanja onečišćenja za svaki sloj nesaturirane zone. Osnovni kriteriji za određivanje litološkog faktora su vrsta stijena i stupanj razlomljenosti (L_y – prikazan kao III korak na Slici 8) te debljina svakog sloja u metrima. Suma umnožaka svih parametara daje indeks sloja pod dubini nesaturirane zone za svaku točku sliva, a formula (2) za izračun glasi:

$$Indeks\ sloja = \sum L_y \cdot m \quad (2)$$

Indeks sloja je potom potrebno razvrstati u jednu od 5 klasa te se očitava vrijednost indeksa sloja u rasponu od 1 do 5 (korak IV na Slici 8.), a dobivena vrijednost množi se sa stupnjem otvorenosti vodonosnika (cn) koji je prikazan kao korak V. Parametar cn ima funkciju dodatno naglasiti stupanj zaštite za zatvorene vodonosnike, dok na otvorene vodonosnike nema nikakav utjecaj. Umnožak tih dviju vrijednosti daje vrijednosti podfaktora O_L prema izrazu (3).

$$O_L = vrijednost\ indeksa\ sloja \cdot cn \quad (3)$$

Konačna vrijednost faktora O dobije se zbrajanjem podfaktora O_S i O_L, a stupanj zaštite koji je definiran faktorom O opisuje se jednom od pet kategorija u koraku VI Slike 8. Najniže vrijednosti parametra O prikazuju najveću ranjivost, odnosno odgovaraju područjima građenim od razlomljenih karbonatnih stijena bez pokrovnih naslaga tla, najmanja ranjivost, odnosno najviše vrijednosti parametra O odgovaraju područjima s debljim naslagama tla i slabo propusnim stijenama.

C – faktor koncentracije toka (flow concentration) – uzima u obzir površinske uvjete koji utječu na površinsko otjecanje jer dijelovi sliva na kojim dolazi do površinskog otjecanja imaju manji kapacitet razrjeđenja onečišćenja. Faktor C predstavlja stupanj koncentracije površinskog otjecanja do ponora, jama i drugih krških morfoloških oblika, a omogućuje izravnu infiltraciju oborina bez prolaska kroz nesaturiranu zonu pa se time zaobilazi njena zaštitna funkcija. C faktor procjenjuje se za dva scenarija prihranjivanja vodonosnika:

a) Scenarij 1 – zona koncentriranog prihranjivanja vodonosnika kroz ponore prikazana na Slici 9.
b) Scenarij 2 – ostatak područja s difuznim prihranjivanjem na Slici 10.

O faktor (faktor pokrovnih naslaga)

Os - UTJECAJ TLA

I

GLINENO TLO	>30% GLINE
PRAŠKASTO TLO	>70% PRAHA
PJESKOVITO TLO	PIJESAK >70%
	GLINA ≤15%
ILOVAČA	OSTALO

II →

DEBLJINA	TEKSTURA			
	GLINENO	PRAŠKASTO	ILOVAČA	PJESKOVITO
>1.0 m	5	4	3	2
0,5-1 m	4	3	2	1
<0,5 m	3	2	1	0

→ **Os**

OL - UTJECAJ LITOLOGIJE

III

LITOLOGIJA I RAZLOMLJENOST	LY
Gline	1500
Prahovi	1200
Lapori, kompaktni metapeliti i magmatske stijene	1000
Laporoviti vapnenci	500
Raspucani metapeliti i magmatske stijene	400
Kompaktni ili čvrsto vezani konglomerati i breče	100
Pješčenjaci	60
Raspucani ili slabo vezani	40
Pjesci i šljunci	10
Propusni bazalti	5
Raspucane karbonatne stijene	3
Okršene stijene	1

$\sum(L_Y \cdot m)$ = INDEKS SLOJA

IV

INDEKS SLOJA	VRIJEDNOST
0 - 250	1
250 - 1 000	2
1 000 - 2 500	3
2 500 - 10 000	4
> 10 000	5

V

STUPANJ ZATVORENOSTI VODONOSNIKA	cn
Zatvoreni	2
Poluzatvoreni	1,5
Otvoreni	1

O_L = VRIJEDNOST INDEKSA SLOJA · cn

FAKTOR $O = O_S + O_L$

VI

FAKTOR O	STUPANJ ZAŠTITE
1	vrlo niska
2	niska
2 - 4	srednja
4 - 8	visoka
8 - 15	vrlo visoka

Slika 8. Prikaz određivanja faktora O [prema: 16]

C faktor (faktor koncentracije toka)

SCENARIJ 1

ZONA PRIHRANJIVANJA KROZ PONORE

Udaljenost do ponora (dh)

VII

Udaljenost do ponora (m)	**dh**
≤ 500	0
500 - 1 000	0,1
1 000 - 1 500	0,2
1 500 - 2 000	0,3
2 000 - 2 500	0,4
2 500 - 3 000	0,5
3 000 - 3 500	0,6
3 500 - 4 000	0,7
4 000 - 4 500	0,8
4 500 - 5 000	0,9
> 5 000	1

Udaljenost do ponornice (ds)

VIII

Udaljenost do ponornice (m)	**ds**
< 10	0
10 - 100	0,5
> 100	1

Nagib i vegetacija (sv)

IX

NAGIB	VEGETACIJA	**sv**
≤ 8 %	nema	1
8 - 31 %	mnogo	0,95
	malo	0,9
31 - 76 %	mnogo	0,85
	malo	0,8
> 76 %	nema	0,75

C = dh · ds · sv

Slika 9. Prikaz određivanja faktora C za Scenarij 1 (prema: [16])

Scenarij 1 odnosi se na zone sliva u kojima se vodonosnik prihranjuje tako da se koncentrira površinski tok i prodire u podzemlje kroz ponore, jame i slična krška obilježja, zaobilazeći pri tome naslage nesaturirane zone. Faktor C umnožak je triju podfaktora: udaljenost do ponora (dh) – zona maksimalnog utjecaja procjenjuje se na 5000 metara; udaljenost do površinskog toka koji ponire (ds) – zona utjecaja je definirana do 100 metara; te podfaktor kombinacije nagiba terena o vegetacije (sv) – vrijednosti rastu s povećanjem nagiba terena, najveće vrijednosti se dodjeljuju najstrmijim područjima bez vegetacije jer je na takvim područjima veća mogućnost formiranja površinskog otjecanja i smanjuje se vrijeme dotoka do vodnog lica.

SCENARIJ 2

OSTATAK PODRUČJA

Površinske značajke (sf)

X		Površinske naslage		
		Nema	Propusne	Nepropusne
Obilježja krša	Razvijen krš	0,25	0,5	0,75
	Slabo razvijeni ili disolucijski krš	0,5	0,75	1
	Pukotinski krš	0,75	0,75	1
	Nema krša	1	1	1

Nagib i vegetacija (sv)

XI

NAGIB	VEGETACIJA	sv
≤ 8 %	nema	0,75
8 - 31 %	mnogo	0,8
	malo	0,85
31 - 76 %	mnogo	0,9
	malo	0,95
> 76 %	nema	1

C = (sf) · (sv)

Slika 10. Prikaz određivanja faktora C za Scenarij 2 (prema: [16])

Scenarij 2 opisuje procjenu faktora C u ostatku sliva, odnosno na području difuznog prihranjivanja vodonosnika. Faktor C umnožak je podfaktora uloge površinskih naslaga (sf) i kombinacije nagiba terena i vegetacije (sv). Podfaktor sf procjenjuje se kombinacijom propusnosti površinskih naslaga i prisutnosti krških obilježja. Podfaktor sv u ovom Scenariju ima obrnute vrijednosti u odnosu na Scenarij 1 zbog difuznog prihranjivanja.

Konačna karta faktora C dobije se klasifikacijom dobivenih vrijednosti u 5 stupnja zaštite kako je prikazano na Slici 11.

XII

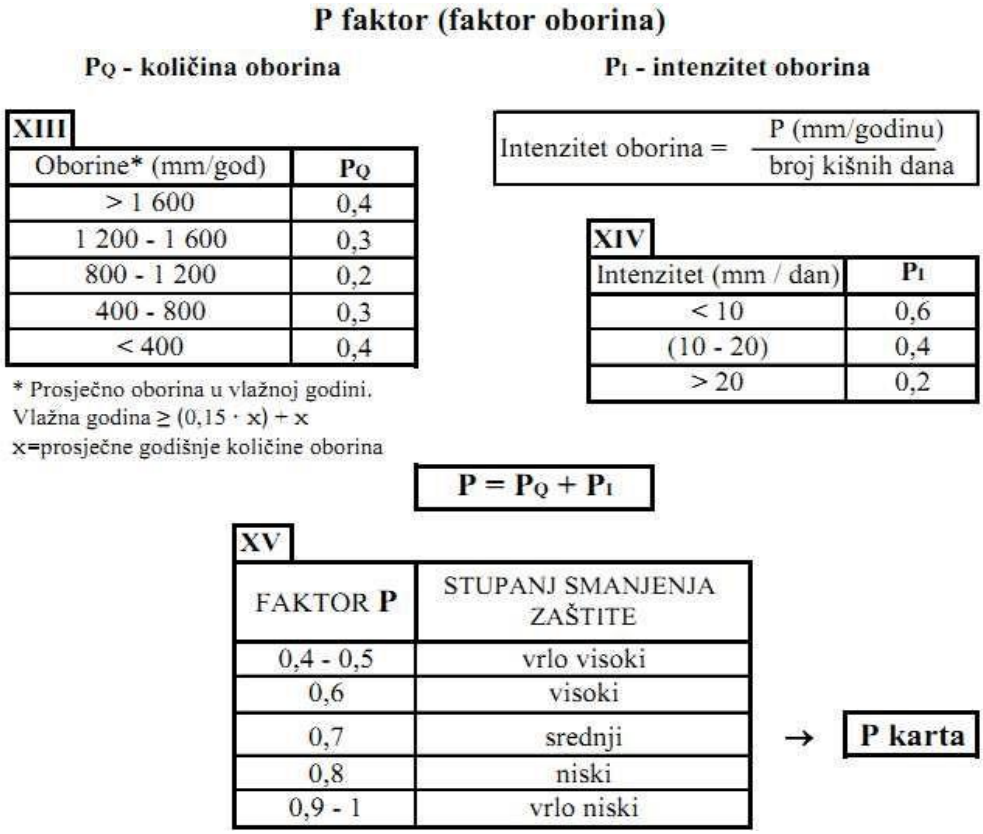
FAKTOR **C**	STUPANJ SMANJENJA ZAŠTITE
0 - 0,2	vrlo visoki
0,2 - 0,4	visoki
0,4 - 0,6	srednji
0,6 - 0,8	niski
0,8 - 1	vrlo niski

→ **C karta**

Slika 11. Prikaz klasifikacije C faktora (prema: [16])

P – faktor oborina (precipitation) – uzima u obzir sposobnost vode, odnosno oborina, da prenese onečišćenje s površine terena kroz saturiranu zonu vodonosnika do vodnog lica.

S povećanjem ove sposobnosti, povećava se i ranjivost vodonosnika od onečišćenja. Podfaktori procjene faktora P u COP metodi su količina infiltracije i intenzitet oborina [16] kako je prikazano Slikom 12.



Slika 12. Prikaz određivanja faktora P (prema: [16])

Podfaktor P_Q opisuje količinu oborina. Vrijednost ovog faktora određuje se preko prosječne količine oborina u vlažnoj godini (godina u kojoj je palo 15 % više padalina od prosjeka) koja se svrstava u jednu od pet klasa. Faktor P_Q opisuje smanjenje utjecaja oborina na ranjivost vodonosnika za veće količine padalina zbog razrjeđenja onečišćenja i smanjenja ranjivosti. Podfaktor P_I ili faktor intenziteta oborina označava vremensku raspodjelu oborina kroz godinu tako da se prosječna godišnja količina padalina podijeli s brojem kišnih dana u godini. Ta vrijednost se zatim raspoređuje u jednu od tri klasa raspona te se očita vrijednost podfaktora P_I. Vrijednost faktora P dobije se zbrajanjem podfaktora P_Q i P_I te se razvrstava u pet klasa koje opisuju stupnjeve smanjenja zaštite vodonosnika.

Faktor O predstavlja zaštitnu zonu, a vrijednost mu se kreće između 0 i 15, a faktori C i P modificiraju stupanj zaštite. Vrijednost faktora C kreće se u rasponu od 0 do 1, a faktora P od 0,4 do 1. konačni indeks COP dobiva se množenjem sva tri faktora, a potom se ranjivost prikazuje na karti s pet različitih klasa ranjivosti, ovisno o rasponima ukupnog COP indeksa, od vrlo niske do vrlo visoke ranjivosti kako je prikazano Slikom 13.

COP indeks = faktor **C** · faktor **O** · faktor **P**

XVI

COP INDEKS	KLASA RANJIVOSTI
0 - 0,5	Vrlo visoka
0,5 - 1	Visoka
1 - 2	Srednja
2 - 4	Niska
4 - 15	Vrlo niska

→ **COP karta**

Slika 13. Prikaz određivanja COP indeksa i klasa ranjivosti (prema: [16])

3. ANALIZA OPASNOSTI OD ONEČIŠĆENJA

Izrada karte opasnosti, odnosno hazarda slijedeći je korak kod ocjene antropogenih utjecaja na podzemnu vodu. Prema COST 620 [12] opasnost (hazard) je mogući izvor onečišćenja od ljudskog djelovanja i pritom onečišćenje može potjecati s površine ili bliske podpovršinske zone terena. Procjena opasnosti obuhvaća određivanje stupnja štetnosti koji potencijalna opasnost može imati na podzemne vode, a uzimaju se u obzir svojstva samog hazarda i vanjski utjecaji koji mogu smanjiti mogućnost pojave opasnog događaja. Opasnosti se moraju locirati u prostoru, međusobno se usporediti i dovesti u odnos s drugim značajkama promatranog područja (hidrogeološka svojstva, smjer toka podzemne vode). Opasnosti se na karti prikazuju kao točkasti, linijski ili poligonski objekti, ovisno o mjerilu prikaza i svrsi karte. U Okvirnoj direktivi o vodama [17] navedeno je da postoji potreba za utvrđivanjem zajedničkih kriterija u istraživanju izvora onečišćenja na nekom području. Karta opasnosti može poslužiti u planiranju korištenja prostora ili za donošenje odluka vezanih uz zaštitu podzemnih voda te podloga za procjenu rizika od onečišćenja podzemnih voda na nekom području.

Karte opasnosti izrađuju se kroz nekoliko faza. Prvo je potrebno prikupiti što više podataka o potencijalnim onečišćivačima na području istraživanja i oblikuje se GIS baza podataka u kojoj svaki objekt ima prostornu referencu i najvažnije atribute. Podaci za izradu karte dobivaju se iz različitih izvora, a neki od njih su: topografske karte, avio i satelitske snimke, razna izvješća i arhive izravno iz tvornica i skladišta, terenskim obilaskom, izravnim prikupljanjem od odgovornih osoba u industriji, lokalnoj upravi itd. Što su podaci o potencijalnom onečišćivaču detaljniji to je procjena potencijalnog ili stvarnog štetnog utjecaja na podzemnu vodu točnija.

Početna faza izrade je neklasificirana karta opasnosti koja pokazuje prostorni raspored potencijalnih onečišćivača te se koristi kao tematska karta i kao temeljna podloga za klasifikaciju mogućih onečišćivača, odnosno izradu klasificirane karte opasnosti. Na ovaj način dobiva se evidencija onečišćivača i njihov prostorni smještaj no ne i informacije o stvarnoj opasnosti koju predstavljaju za podzemne vode. Također, na ovaj način nije moguće međusobno uspoređivati štetni utjecaj evidentiranih opasnosti. Druga faza analize opasnosti je klasifikacija onečišćivača prema stupnju štetnosti za podzemne vode, a omogućuje usporedbu različitih vrsta opasnosti. Izradom neklasificirane karte locira se

antropogeni utjecaj koji predstavlja opasnost za podzemnu vodu, no za dobivanje stvarne razine opasnosti koju taj utjecaj ima potrebno je prikupiti i točne podatke o količini, sastavu, toksičnosti, vrsti potencijalnog onečišćenja. Takvi podaci su obično nedostupni pa se procjena opasnosti temelji na iskustvima s drugih područja. Prijedlog postupka klasifikacije opasnosti podzemne vode dan je u sklopu projekta COST 620. Za dobivanje realne procjene opasnosti podzemne vode preko indeksa opasnosti (HI) potrebno je za svaki onečišćivač procijeniti tri faktora. Prvi je težinska vrijednost onečišćivača koja se očitava iz tablice predložene projektom COST 620, a koja je prikazana na Slici 14. Težinska vrijednost množi se faktorom rangiranja (faktorom ocjene stvarne opasnosti) i faktorom redukcije prema formuli (4):

$$HI = H \cdot Q_n \cdot R_f \qquad (4)$$

Gdje je: HI – indeks opasnosti

H – težinska vrijednost

Q_n – faktor ocjene stvarne opasnosti

R_f – faktor redukcije

Očitana težinska vrijednost, ovisno o vrsti onečišćivača ima raspon između 0 i 100, gdje 0 označava područja bez opasnosti za podzemnu vodu, a 100 označava ekstremnu razinu opasnosti. Vrijednosti prikazane na Slici 14 rezultat su složene analize provedene u sklopu projekta COST 620, gdje se pomoću tri različita pristupa određivala preliminarna težinska vrijednost pojedinog tipa onečišćivača, a konačna težinska vrijednost rezultat je izračunate srednje vrijednosti. U konačnom prikazu opasnosti su grupirane prema trima osnovnim ljudskim djelatnostima koje predstavljaju prvu kategoriju opasnosti (brojevi 1, 2 i 3): infrastrukturni razvoj, industrijske aktivnosti, te poljoprivreda i stočarstvo. Drugu kategoriju opasnosti (brojevi 1.1., 1.2., ... 2.1., 2.2., ...) čine pod podjele osnovnih djelatnosti grupirane prema zajedničkim svojstvima, svaka sa svojim težinskim rasponom. Treću kategoriju opasnosti čine djelatnosti detaljno raščlanjene do krajnjeg oblika opasnosti koji određuje točnu jednoznačnu vrijednost. Kod izrade ovog inventara opasnosti cilj je bio zastupiti sve glavne tipove onečišćivača. Ukoliko se kod istraživanja nekog područja pojavi potreba za definiranjem i rangiranjem novog tipa onečišćivača u

sklopu projekta COST 620 date su preporuke kako da se to učini, a da novi onečišćivač bude potpuno usklađen i usporediv s ostalima.

	VRSTA OPASNOSTI	H
1	INFRASTRUKTURNI OBJEKTI	
1.1.	**Otpadne vode**	**25-85**
1.1.1.	Naselja (istjecanje kanalizacijskih sustava)	35
1.1.2.	Naselja bez kanalizacijskih sustava	70
1.1.3.	Izdvojeni pojedinačni objekti bez kanalizacije	45
1.1.4.	Septičke i sabirne jame, nužnici	45
1.1.5.	Navodnjavanje otpadnom vodom	55
1.1.6.	Ispust iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda	35
1.1.7.	Površinsko zbrinjavanje urbanih otpadnih voda	60
1.1.8.	Otjecanje s asfaltiranih površina	25
1.1.9.	Ispust otpadne vode u površinski vodotok	45
1.1.10.	Upojni zdenac otpadnih voda	85
1.2.	**Komunalni otpad**	**35-50**
1.2.1.	Odlagalište otpada, kante za smeće	40
1.2.2.	Prikupna stanica za otpad, reciklažno dvorište	40
1.2.3.	Sanitarni deponij	50
1.2.4.	Spremište i odlagalište građevinskog otpada	35
1.2.5.	Mulj s uređaja za pročišćavanje otpadnih voda	35
1.3.	**Gorivo, benzin, nafta**	**50-65**
1.3.1.	Nadzemni spremnik goriva	50
1.3.2.	Podzemni spremnik goriva	55
1.3.3.	Skladišni rezervoari	50
1.3.4.	Dvorišni spremnici	50
1.3.5.	Utovarne stanice gotiva	60
1.3.6.	Benzinske postaje	60
1.3.7.	Kaverna za čuvanje goriva	65
1.4.	**Promet i prijevoz**	**30-60**
1.4.1.	Cesta, neosigurana	40
1.4.2.	Cestovni tunel, neosiguran	40
1.4.3.	Cestovno vozno skladište	35
1.4.4.	Parkiralište za automobile	35
1.4.5.	Željeznička pruga	30
1.4.6.	Željeznički tunel, neosiguran	30
1.4.7.	Željeznička postaja	35
1.4.8.	Otpremno dvorište	40
1.4.9.	Pista	35
1.4.10.	Cjevovod opasnih tekućina	60
1.5.	**Rekreacijski centri**	**25-30**
1.5.1.	Turističko naselje	30
1.5.2.	Mjesto za kampiranje	30
1.5.3.	Otvoreni sportski stadion	25
1.5.4.	Golf igralište	35
1.5.5.	Skijalište	25
1.6.	**Ostali hazardi**	**25-35**
1.6.1.	Groblje	25
1.6.2.	Životinjsko pokapalište	35
1.6.3.	Kemijska čistionica	35
1.6.4.	Transformatorska stanica	30
1.6.5.	Aktivni i napušteni vojni objekti	35

	VRSTA OPASNOSTI	H
2	INDUSTRIJSKE AKTIVNOSTI	
2.1.	**Rudarenje (aktivni i napusteni rudnici)**	**60-85**
2.1.1.	Rudnik, sol	60
2.1.2.	Rudnik, drugi nemetali	70
2.1.3.	Rudnik, ruda	70
2.1.4.	Rudnik, ugljen	70
2.1.5.	Rudnik, uran	80
2.1.6.	Vaniski spremnici opasnog krutog materijala	85
2.1.7.	Postrojenje za obradu rude	70
2.1.8.	Odlagalište rudničkog i zemljanog materijala	70
2.1.9.	Jalovna ruda	70
2.1.10.	Sustav za drenažu rudnika	65
2.1.11.	Jezerce jalovine	65
2.2.	**Kamenolomi**	**10-30**
2.2.1.	Iskapalište i nasip za gradnju	10
2.2.2.	Šljunčara i pješčara	30
2.2.3.	Kamenolomi	25
2.3.	**Eksploatacija nafte i plina**	**40-70**
2.3.1.	Proizvodne bušotine	40
2.3.2.	Bušotine za ponovno ubacivanje	70
2.3.3.	Stanice za utovar	55
2.3.4.	Naftovod	55
2.4.	**Industrijska postrojenja**	**40-85**
2.4.1.	Ljevaonica	40
2.4.2.	Željezni i čelični radovi	40
2.4.3.	Industrija za završnu obradu metala	50
2.4.4.	Galvaniziranje	55
2.4.5.	Rafinerija nafte	85
2.4.6.	Tvornica kemikalija	65
2.4.7.	Tvornica gume	40
2.4.8.	Proizvodnja papira i celuloze	40
2.4.9.	Štavionica kože	70
2.4.10.	Prehrambena industrija	45
2.5.	**Elektrane**	**50-65**
2.5.1.	Plinara	60
2.5.2.	Termoelektrana na kruta goriva	50
2.5.3.	Nuklearna elektrana	65
2.6.	**Industrijska skladišta**	**45-100**
2.6.1.	Skladišta krutih materijala i kemikalija	60
2.6.2.	Spremnici opasnih tvari	70
2.6.3.	Nagomilani pepeo i šljaka	70
2.6.4.	Odlagališta neopasnih tvari	45
2.6.5.	Odlagališta opasnih tvari	90
2.6.6.	Odlagališta nuklearnog otpada	100
2.7.	**Odvodnja i pročišćavanje otpadnih voda**	**40-85**
2.7.1.	Cjevovod otpadne vode	65
2.7.2.	Laguna za sakupljanje otpadnih voda industrije	65
2.7.3.	Ispust iz uređaja za pročišćavanje otpadnih voda	40
2.7.4.	Upojni zdenac otpadnih voda	85
3	POLJOPRIVREDA I STOČARSTVO	
3.1.	**Životinjske farme**	**25-45**
3.1.1.	Životinjska staja (šupa, štagalj, svinjac)	30
3.1.2.	Hranilište	30
3.1.3.	Industrijska farma	30
3.1.4.	Gnojišnica	45
3.1.5.	Bazen ili rezervoar s gnojivom	45
3.1.6.	Područje intenzivne ispaše	25
3.2.	**Poljoprivreda**	**15-60**
3.2.1.	Otvorena silaža (polje)	25
3.2.2.	Zatvorena silaža	20
3.2.3.	Skladište umjetnog gnojiva i pesticida	40
3.2.4.	Područje intenzivne poljoprivrede	30
3.2.5.	Bašća (vrt)	15
3.2.6.	Staklenik	20
3.2.7.	Navodnjavanje otpadnom vodom	60

Slika 14. Težinske vrijednosti za pojedine tipove opasnosti [12]

Ponekad se dogodi da dva jednaka tipa onečišćivača ne predstavljaju jednaku opasnost za podzemne vode. Iz toga razloga potrebno je uvesti faktor ocjene stvarne opasnosti Q_n (faktor rangiranja – *ranking factor*) koji ima raspon od 0,8 do 1,2, a prikazuje veličinu stvarne opasnosti od onečišćenja. Za štetnost utjecaja na podzemnu vodu najveću ulogu ima količina ispuštene štetne tvari.

Treći faktor – faktor redukcije R_f (reduction factor) kreće se u rasponu od 0 do 1 i prikazuje vjerojatnost pojavljivanja onečišćenja iz pojedinog mogućeg onečišćivača. Ako je faktor redukcije 0, pretpostavka je da nema mogućeg rizika od onečišćenja podzemne vode, dok faktor 1 označava da nema razloga za smanjenje stvarne opasnosti. Faktor redukcije mora se vrlo oprezno koristiti i to samo kad za to postoje opravdani razlozi. Dodatna preporuka je da se u konačnu formulu uvrsti kvadratni korijen procijenjene vrijednosti faktora redukcije.

Kombinacijom navedenih faktora za svaki se onečišćivač izračunava indeks opasnosti (hazard indeks – HI) po zadanoj formuli, zatim se vektorski slojevi konvertiraju u rastere (svaki tip zasebno – točkasti, linijski i poligonski). Veličina ćelije iznosi 25 m (mora biti jednaka kao i kod analize ranjivosti), a vrijednost ćelije se određuje prema indeksu opasnosti. Rasteri se zbrajaju i sumarni raster predstavlja ukupnu opasnost. Nakon provedene analize opasnosti dobiveni prikaz potrebno je reklasificirati u 5 kategorija vidljivih u Tablici 4 koje se prikazuju na karti klasificiranih opasnosti koja dalje, zajedno s kartom prirodne ranjivosti, služi za procjenu rizika od onečišćenja podzemnih voda.

Tablica 4. Kategorije opasnosti od potencijalnog onečišćenja i njihov način prikazivanja na karti

Indeks opasnosti (HI)	**Kategorija opasnosti**	**Razina opasnosti**	**Boja na karti**
0 - 24	2	nema ili vrlo mala	plava
24 - 48	3	niska	zelena
48 - 72	4	srednja	žuta
72 - 96	5	visoka	narančasta
96 - 120	6	vrlo visoka	crvena

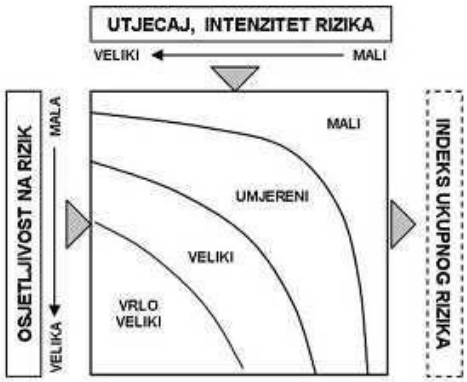
4. PROCJENA RIZIKA OD ONEČIŠĆENJA PODZEMNIH VODA

Upravljanje vodnim resursima podrazumijeva zaštitu zaliha vode koje je dovoljno visoke kvalitete za ljudsku upotrebu. Jedan od ciljeva projekta COST 620 bilo je jednoznačno odrediti definicije pojmova koji upotrebljavaju kod analiza i objašnjenja. Rizik je definiran kao pojam koji opisuje vjerojatnost da će neka opasnost (hazard) izazvati štetne posljedice. Kod podzemne vode rizik predstavlja vjerojatnost da će doći do onečišćenja uslijed pojave hazardnog događaja.

Prema smjernicama projekta COST 620 analiza rizika provodi se u dvije faze:

- Procjena intenziteta rizika – analiza svih mogućih faktora vezanih uz pojavu opasnosti te faktora prirodnog okruženja koji pogoduju širenju ili sprječavanju širenja opasnosti. Intenzitet rizika kombinacija je prirodne ranjivosti sustava i provedene analize opasnosti.
- Procjena osjetljivosti na rizik – posljedice do kojih će doći uslijed pojave štete, a procjenjuje se na temelju ekološke i ekonomske vrijednosti vodonosnika

Ukupni rizik je matematički algoritam kojim se kombiniraju intenzitet rizika i osjetljivost na rizik kao što je prikazano Slikom 15.

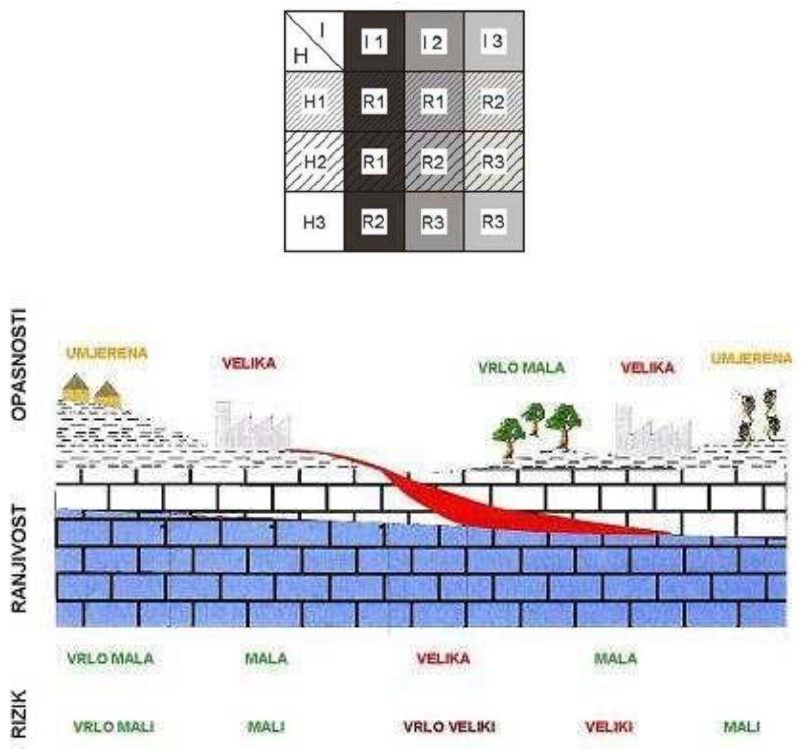


Slika 15. Shematski prikaz ukupnog rizika [12]

Zbog nedostatka relevantnih podataka, u najvećem broju objavljenih radova procjena rizika je obično obuhvaćala samo procjenu intenziteta rizika, no za planiranje korištenja prostora i drugih odluka potrebno je provesti i analizu osjetljivosti.

Procjena intenziteta rizika je ustvari nastavak prethodna dva koraka, jer za njenu provedbu trebaju rezultati procjene prirodne ranjivosti i procjene opasnosti. Procjena prirodne ranjivosti (karta prirodne ranjivosti) sadrži podatke o prirodnim uvjetima koji dobro opisuju uvjete i kretanje vode u podzemlju, dok analiza opasnosti (karta klasificiranih opasnosti) daje sve podatke o porijeklu, ponašanju, lokaciji, stupnju štetnosti za podzemnu vodu i vjerojatnost pojave opasnosti.

Rezultat procjene intenziteta rizika može biti prikazan kao kvantitativna vrijednost, indeks intenziteta rizika (matematički algoritam odnosa ranjivosti i opasnosti) ili semikvantitativna vrijednost (uspostavljanje odnosa klasa ranjivosti i opasnosti). Načini procjene intenziteta rizika pomoću superpozicioniranja efekata opasnosti i prirodne ranjivosti, bez kvantitativnih izračuna shematski su prikazane na Slici 16 a i b. Na ovaj način, indeks intenziteta rizika nema brojčanu vrijednost već opis klasa pa se na ovaj način procjenjuje i indeks osjetljivosti na rizik i indeks ukupnog rizika.

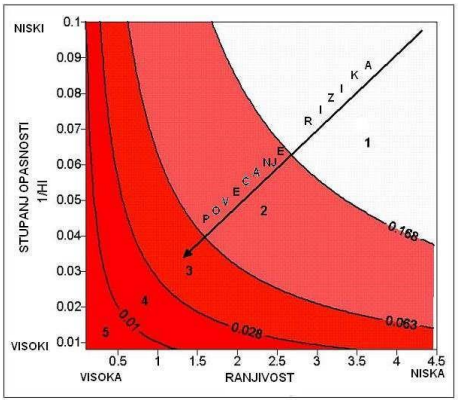


Slika 16. a i b. Različiti načini procjene intenziteta rizika bez matematičkih izračuna [12]

Osim opisnog modela postoji i matematički model određivanja intenziteta rizika. Prema smjernicama projekta COST 620 dana je jednadžba (5) gdje je indeks intenziteta rizika (RI_i) umnožak recipročne vrijednosti indeksa opasnosti (1/HI) i zaštitnog faktora procijenjene prirodne ranjivosti (π – u PI metodi, COP indeks u COP metodi itd.)

$$RI_i = \frac{1}{HI} \cdot \pi \quad (5)$$

Ova metoda koristi numerički definiranu raspodjelu vrijednosti ranjivosti i opasnosti (izražena u klasama), prikaz se na kraju reklasificira u pet klasa kako je prikazano na Slici 17. Negativna strana ovog pristupa je precjenjivanje rizika u slučajevima kada ne postoji opasnost, a ranjivost je visoka. Prilagodba je moguća ako se regulira raspored parametara na osima.



Slika 17. Dijagram procjene intenziteta rizika prema matematičkom modelu [12]

Osjetljivost na rizik drugi je pokazatelj u procjeni ukupnog rizika od onečišćenja podzemnih voda, a odnosi se na definiranje posljedica štetnog djelovanja. Osjetljivost na rizik procjenjuje se kroz dvije analize:

- Analiza utjecaja onečišćenja na vodonosnik – proučava se mjesto prodora onečišćenja u krško podzemlje, ponašanje unutar zasićenog dijela vodonosnika te predviđanje stanja (količina i koncentracija onečišćenja) na izlazu (izvorištu). U zasićenoj zoni na osjetljivost vode najviše utječu količina vode, brzina i smjerovi

toka i vrijeme zadržavanja u podzemlju. Proučavaju se i faktori koji utječu na zadržavanje onečišćenja poput biorazgradivosti, filtracije, sorpcije itd.

- Analiza nastale štete i njenih posljedica – definiranje ekološke i ekonomske vrijednosti vodonosnika te kako nastala šteta utječe na promjenu te vrijednosti. Ekonomska šteta je prvenstveno nemogućnost daljnjeg korištenja vode za vodoopskrbu te cijena obnove vodonosnika.

Kombinacijom rezultata ovih analiza podzemna voda se prema dijelovima sliva dijeli na visoko, umjereno i nisko osjetljivu na rizik. Takva ocjena prikazuje se pomoću indeksa osjetljivosti na rizik koji s indeksom intenziteta rizika ulazi u procjenu ukupnog rizika podzemnih voda od onečišćenja.

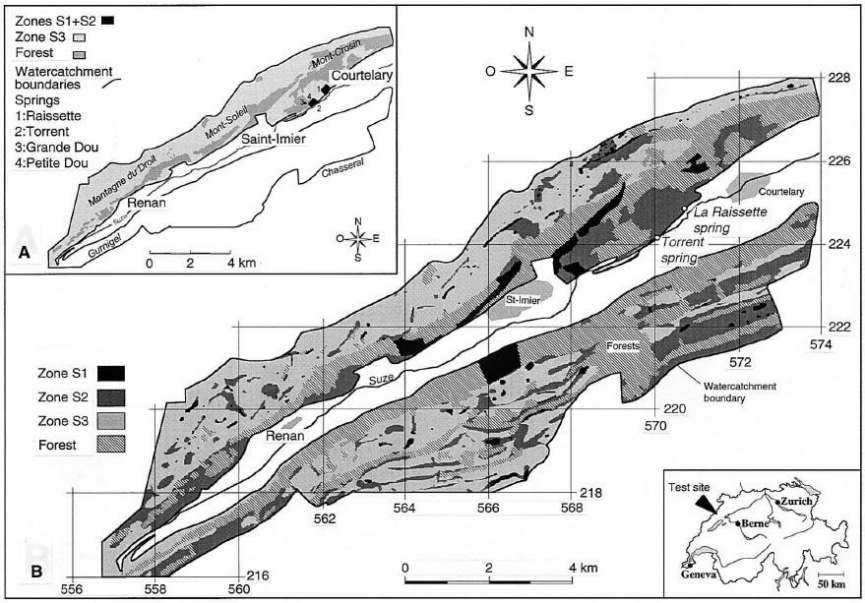
Procjena ukupnog rizika od onečišćenja, prikazana kao karta rizika od onečišćenja podzemnih voda služi kao osnovna podloga kod planiranja korištenja prostora te donošenje odluka u upravljanju i zaštiti voda. Europski pristup rizik definira pomoću tri indeksa:

- RI-i (indeks intenziteta rizika, risk intensity indeks) – relativna mjera intenziteta štetnog djelovanja koja je posljedica odnosa prirodne ranjivosti sustava i opasnosti za podzemnu vodu
- RS-i (indeks osjetljivosti na rizik, risk sensitivity indeks) – relativna mjera osjetljivosti vodonosnog sustava na pojavu štetnog djelovanja u vidu smanjenja ekološke i ekonomske vrijednosti podzemnih voda i o vodi ovisnih ekosustava
- TR-i (indeks ukupnog rizika, total risk indeks) – zbroj svih utjecajnih parametara identificiranih kroz analizu rizika

5. PRIMJERI KORIŠTENJA ANALIZE RANJIVOSTI U ZAŠTITI OKOLIŠA

5.1. Metode ranjivosti kod definiranja zona sanitarne zaštite izvorišta pitke vode

EPIK predstavlja tipičan primjer metode procjene ranjivosti razvijene u svrhu definiranja zone sanitarne zaštite izvorišta pitke vode [18]. Predstavljena je 1997. godine kao metoda koja je ušla u zakonsku regulativu u Švicarskoj kao poboljšanje dotadašnjeg načina definiranja zona zaštite za izvore u krškim vodonosnicima. Naime, dotadašnji propisi za definiranje zona zaštite u kršu nisu bili u potpunosti funkcionalni, jer su po tadašnjim saznanjima određivali prevelika zaštićena područja na kojima su bile propisane restriktivne mjere što nije bilo dobro prihvaćeno po pitanju razvoja. Ako bi se zaštitne zone smanjile kako bi se omogućio gospodarski razvoj, one nisu mogle pružiti primjerenu zaštitu podzemnoj vodi pa je došlo do narušavanja njezine kvalitete. Zbog heterogenosti brzina podzemne vode u kršu i nemogućnost provođenja detaljnijih istraživanja na većem području, EPIK je predstavljao sjajnu inovaciju jer je višeparametarska analiza izdvajala kritična područja što je prikazano Slikom 18.



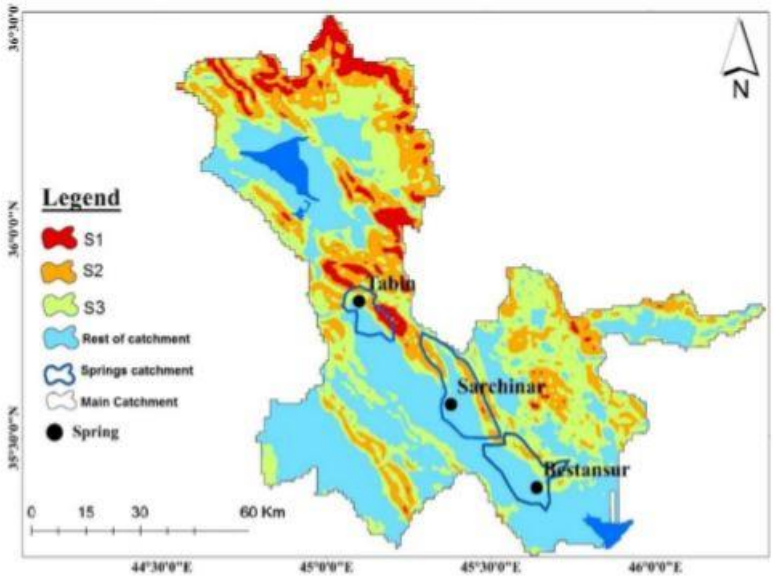
Slika 18. Određivanje zona zaštite u Švicarskoj A) ranije definirane zone, B) zone definirane EPIK metodom [10]

EPIK metoda se zato pokazala kao vrlo koristan alat koji je u potpunosti prilagođen sustavu upravljanje vodnim resursima u krškom okolišu. Omogućio je znatan napredak za uspostavu zaštitnih zone na krškom terenu, na način koji je prikazan Slikom 19., koji je bilo mnogo teže istraživati i modelirati od aluvijalnih terena. Zone zaštite dobivene na temelju karata ranjivosti bile su preciznije definirane nego do tada, posebno najrestriktivnije zone koje su pratile specifična krška obilježja i štitila ih [10, 18]. Primjer definiranja zona zaštite prema klasama ranjivosti dan je u tablici 5.

Tablica 5. Zone zaštite izvora u EPIK metodi [10]

RAZINA RANJIVOSTI	FAKTOR ZAŠTITE F	ZONA ZAŠTITE S_I
Vrlo visoka	F manji ili jednak 19	S_1
Visoka	F između 20 i 25	S_2
Srednja	F viši od 25	S_3
Niska	Prisustvo P_4	Ostatak vodonosnika

EPIK je osim u Švicarskoj u istu svrhu, primijenjen na više različitih lokacija u svijetu, ovdje je spomenut primjer za definiranje zona zaštite izvorišta u Iraku [19] i Sjevernom Jordanu [20], gdje su zaštitne zone za odabrane izvore definirane primjenom ekvivalentnog odnosa između područja zaštite podzemnih voda i zaštitni faktor dobivenog EPIK metodom (Slika 19). Ipak, kasnija istraživanja i primjene EPIK metode ranjivosti pokazala su i neke slabe točke, u prvom redu činjenicu da je jako teško definirati klase razvoja epikrša, kao i stupanj okršenosti vodonosnika. Zbog toga se pokazala kao dosta subjektivna metoda, ovisna o procjeni istraživača bez jasno izraženih raspone vrijednosti, zbog čega postoji realna opasnost od precjenjivanja ranjivosti (radi dodatne sigurnosti). Uz to, problem ove metode je također što precjenjuje zaštitnu funkciju pokrovnih naslaga (tla), jer definira područja bez zaštite za sve dijelove gdje je debljina tla veća od dva metra što nije uvijek točna pretpostavka [15].



Slika 19. Zone zaštite izvorišta određene pomoću karte ranjivosti vodonosnika u Iraku [19]

5.2. Karte ranjivosti u prostornom planiranju

Već je i u ovom radu više puta spomenuto da se karte prirodne ranjivosti mogu vrlo korisno upotrijebiti kod donošenja odluka o korištenju zemljišta i u prostornom planiranju. Postoji više objavljenih studija koje potkrepljuju upravo takve tvrdnje [21, 22, 23]. Upravljanje resursima podzemnih voda trebalo bi integrirati s regionalnim planiranjem korištenja zemljišta, jer ciljevi takvog planiranja trebaju odgovoriti na regionalne i dugoročne potrebe kako za oblikovanjem prostora radi postizanja maksimalne kvalitete ljudskog života, tako i zbog postizanja ravnoteže između ekoloških i inženjerskih pristupa promjeni namjene zemljišta prema održivim resursima podzemne vode. Cilj svakog učinkovitog prostornog planiranja je uskladiti funkcionalnost prostora s prirodnim pogodnostima, ograničenjima okoliša i potrebama vode kako bi se pružile odgovarajuće ruralne pogodnosti urbanim područjima i odgovarajuće urbane pogodnosti ruralnim područjima. Da bi se to moglo postići od izuzetne je važnosti sačuvati izvore slatke vode od onečišćenja i smanjiti unos potencijalnih štetnih tvari u vodonosnik. Dosadašnja nebrojena iskustva pokazala su da samo integrirani pristup koji uvažava hidrološke karakteristike, okolišno stanje i propisane učinkovite mjere korištenja

zemljišta mogu nadoknaditi sadašnju neuravnoteženost upotrebe zemljišta, vodnih resursa i socijalno-ekonomskog planiranja [21].

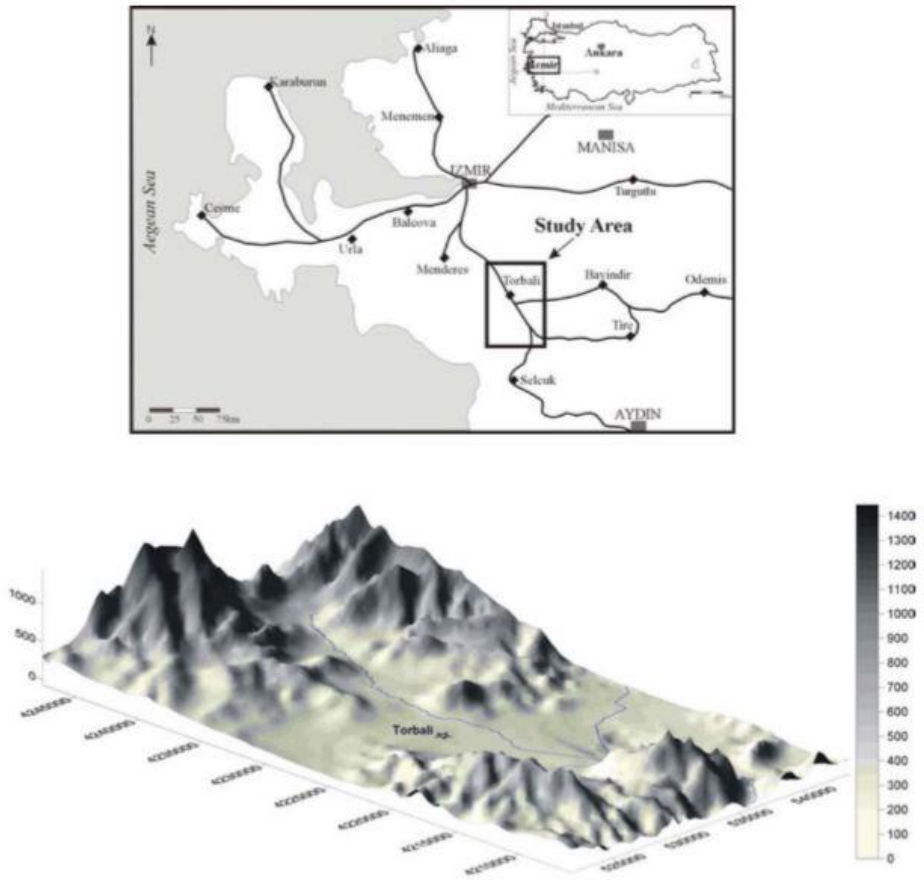
Kao vrlo učinkovit pristup za postizanje tog cilja pokazale su se upravo metode procjene ranjivost podzemnih voda kojima se pomoću GIS alata definiraju područja s različitim potencijalom onečišćenja u urbanizirajućim područjima na temelju propusnosti nezasićene zone i tla, dubine do vodnog lica te debljine vodonosnika [22]. Karta ranjivosti koja jasno izdvaja područja prirodno bolje zaštićena od utjecaja onečišćenja na podzemne vode na kojima se mogu planirati objekti poput industrije ili intenzivne poljoprivrede bez dodatnog ugrožavanja podzemnih voda. Za razliku od toga, ranjivija područja moguće je planirano namijeniti u zelene zone urbanih sredina te na taj način poboljšati vizuru i kvalitetu života uz dodatnu zaštitu vodnih resursa. Upravo na taj način korištene su karte ranjivosti u okolici mega grada Detroita za utvrđivanje područja gdje je kvaliteta podzemne vode ugrožena daljnjim razvojem. NA taj način jasno se pokazalo da su mnoga starija već napuštena industrijalizirana područja, unutar grada Detroita, smještena na materijalima koji imaju znatno manju ranjivost na onečišćenje podzemnih voda i stoga bi mogla biti daleko jeftinija za obnovu od zelenih polja u nerazvijenim područjima sliva [23].

5.3. Procjena ranjivosti podzemnih voda za određivanje lokacije odlagališta otpada

U današnje vrijeme jedan od najvećih problema povezanih uz okoliš je onečišćenje podzemnih voda procjednim vodama s odlagališta otpada koje uzrokuju značajno pogoršanje u kvaliteti podzemnih voda diljem svijeta. Izrada karata ranjivosti mogla bi pomoći i u tom slučaju, kao što potvrđuju objavljene studije [24, 25]. Naime, tijekom postupka odabira mjesta za odlaganje čvrstog otpada, nekoliko čimbenika igra presudnu ulogu u konačnoj odluci. Općenito, primarni kriterij odabira je trošak rada čitavog sustava odlagališta. Važno je da se lokacija nalazi u blizini grada kako bi se minimizirali troškovi prijevoza otpada. Nakon ekonomskih čimbenika obično slijede okolišni čimbenici. Jedan od najvažnijih među njima upravo je utjecaj odlagališta na podzemne vode. Pri tome se utjecaj najčešće kvantificira upravo procjenom dubine do podzemne vode, postojanje nepropusnih slojeva u nesaturiranoj zoni koji bi prirodno mogli minimalizirati rizik od

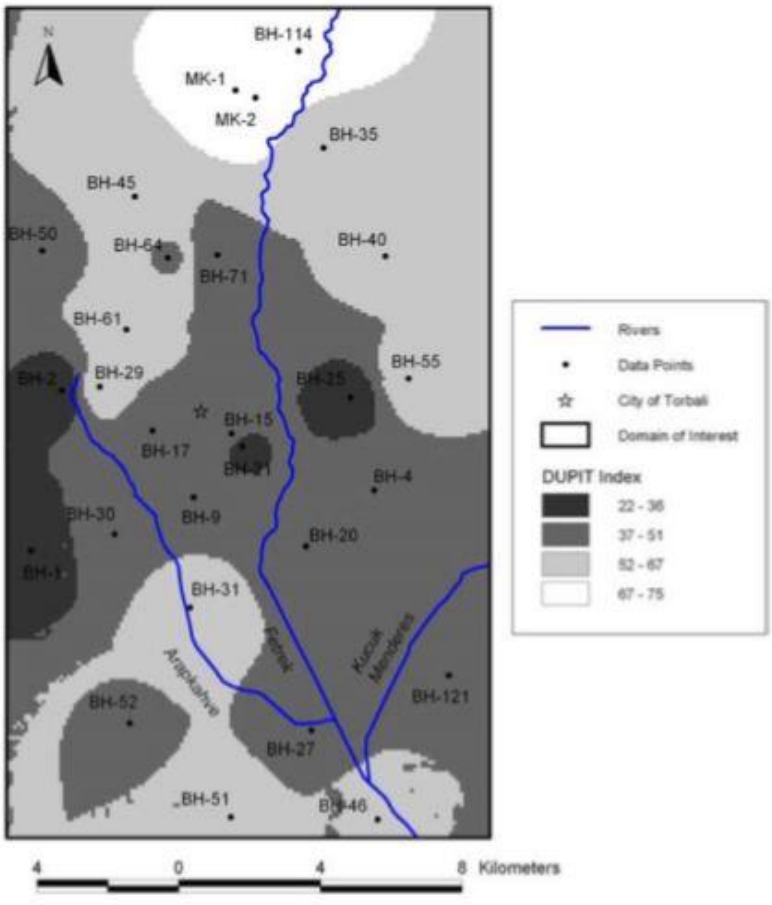
onečišćenja podzemne vode, a zatim su tu još vrsta temeljnog vodonosnika kao i njegove hidrogeološke karakteristike. Ništa manje važna nije ni namjena zemljišta te topografija mjesta na kojem se promatra napraviti odlagalište otpada. Budući da su sve to čimbenici koju su već spominjani u okviru procjene ranjivosti nije neobično da se ta dva postupka udruže u svrhu zaštite okoliša.

Obrađeno je jedno istraživanje u Turskoj koja ima značajnih problema s odlaganjem krutog otpada, a lokacija istraživanja prikazana je na Slici 20. I danas mnoge općine nemaju projektirana službena odlagališta otpada, što znači da još uvijek ilegalno odlažu kruti otpad na najbliže dostupno mjesto zanemarujući sve povezane rizike. Zbog financijskih ograničenja i nedostatak znanstvenih istraživanja, obično najbliže dostupno mjesto postaje korito rijeke ili poljoprivredno polje, a u najvećoj mjeri odlagališta čvrstog otpada nalaze se na vrlo propusnim aluvijalnim poljima ili u koritima povremenih rijeka. Kao posljedica ove prakse primijećeno je značajno narušavanje kvalitete podzemne vode koja je izrazito opterećena onečišćenjem.



Slika 20. Područje istraživanja za određivanje lokacije odlagališta otpada u Turskoj [25]

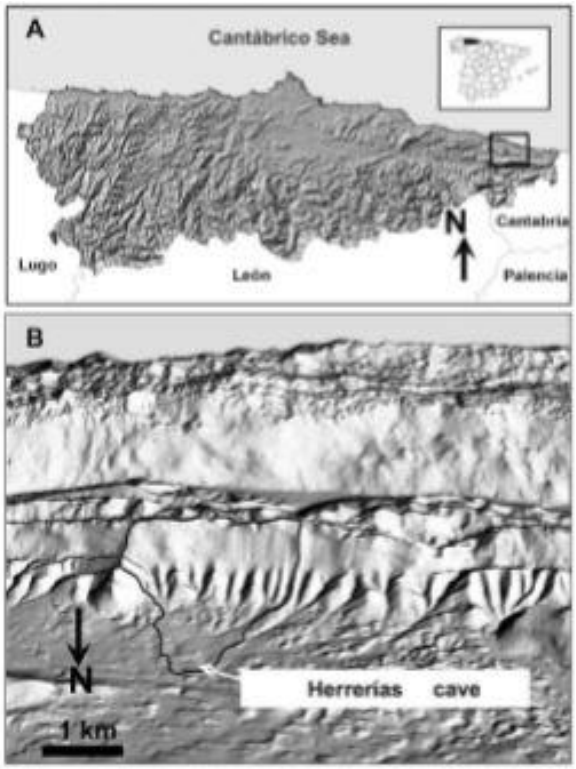
Zbog svega navedenoga napravljena je analiza ranjivosti podzemne vode koja je na temelju ranije spomenutih čimbenika izdvojila dio promatranog područja koji prirodno ima najveću zaštitu od te na kojem bi lokacija odlagališta krutog otpada imala najmanji negativnog utjecaja s površine na podzemnu vodu, a prikaz primjerenih lokacija vidljiv je na Slici 21. Ipak, važno je naglasiti da odabrana lokacija uvijek mora biti detaljno analizirana s obzirom na ostale čimbenike koji su presudan za odabir mjesta odlaganja čvrstog otpada. Dakle, na odabranoj lokaciji treba izraditi detaljnu studiju izvedivosti alternativa kako bi se provjerilo je li lokacija u potpunosti prikladna za odlaganje krutog otpada i u najvećoj mogućoj mjeri štiti okoliš od onečišćenja.



Slika 21. Kartografski prikaz rezultata analize područja za izgradnju odlagališta otpada [25]

5.4. Procjena ranjivosti u službi zaštite špiljskog sustava

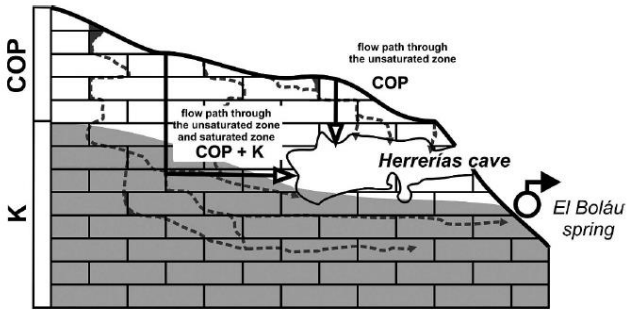
Za zaštitu špilja prihvaćeni su različiti pristupi u različitim situacijama. Jedan je pristupa je definiranje zona zaštite te u njima pripadajuće mjere zaštite s obzirom na njihovu ranjivost na onečišćenje. Obrađena je studija koja govori o glavnim rezultatima planiranja sustava zaštite špiljskog sustava Herreri´as, čija lokacija je prikazana Slikom 22., koji je u Španjolskoj proglašen kulturnim dobrom i nalazi se pod UNESCO zaštitom.



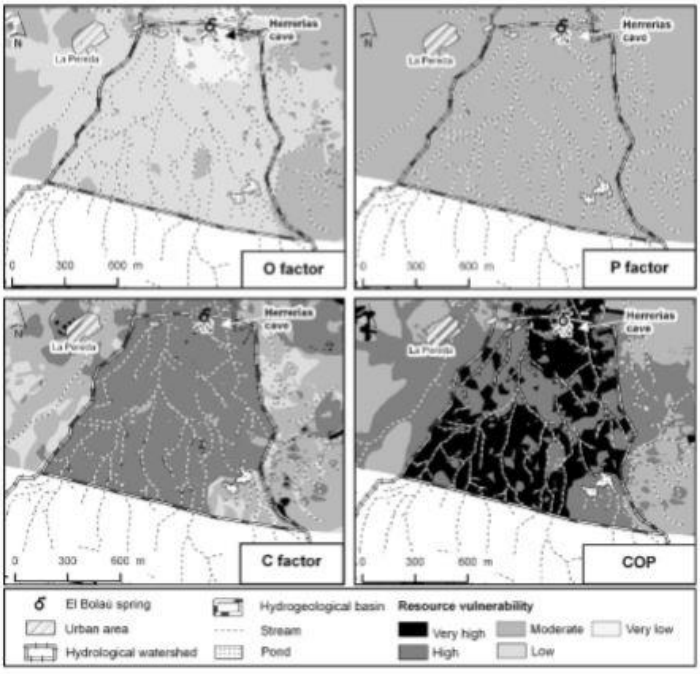
Slika 22. Lokacija spiljskog sustava Herreri´as, Španjolska [26]

Zaštita je planirana na temelju procjene njegove ranjivosti na onečišćenje na sličan način kao što se procjenjuje ranjivost podzemnih voda. Naime, špilja se nalazi u kompleksu krškog hidrogeološkog okoliša u kojem podzemna voda teče od jugozapada do sjeveroistoka, prateći temeljnu strukturu i pukotinski sustav. Unutar špilje teče potok koji izlazi u obliku izvora na sjeveroistočnom dijelu špiljskog sustava. Prihranjivanje vodnih zaliha događa se izravnim putem infiltracijom oborina preko izdanaka vapnenca, zatim koncentriranom infiltracijom s cjelokupne površine, koje otjecanje u slivu odvodi unutar špilje te sporijom komponentom infiltracije kroz drenirane aluvijalne slojeve. Korištenje

zemljišta i vegetacija u većini istraživanog područja je u prirodnom obliku, ali postoje dijelovi na kojima ima stočarstva, kamenoloma i turističke djelatnosti koji mijenjaju prirodne značajke i povećavajući rizik da špiljski sustav bude pod utjecajem onečišćenja. Ideja je bila primijeniti COP + K metodu procjene prirodne ranjivosti podzemne vode u karbonatnim vodonosnicima. COP+K metoda je ustvari nadogradnja COP metode koja uključuje i K faktor kako bi se mogla primijeniti na isključivu lokaciju, inače izvorište podzemne vode, a u ovom slučaju špilju, kao što je prikazano na Slici 23. Najprije je ranjivost procijenjena COP metodom (Slika 24), a zatim je dodatno procijenjen K faktor i to na dva načina. .

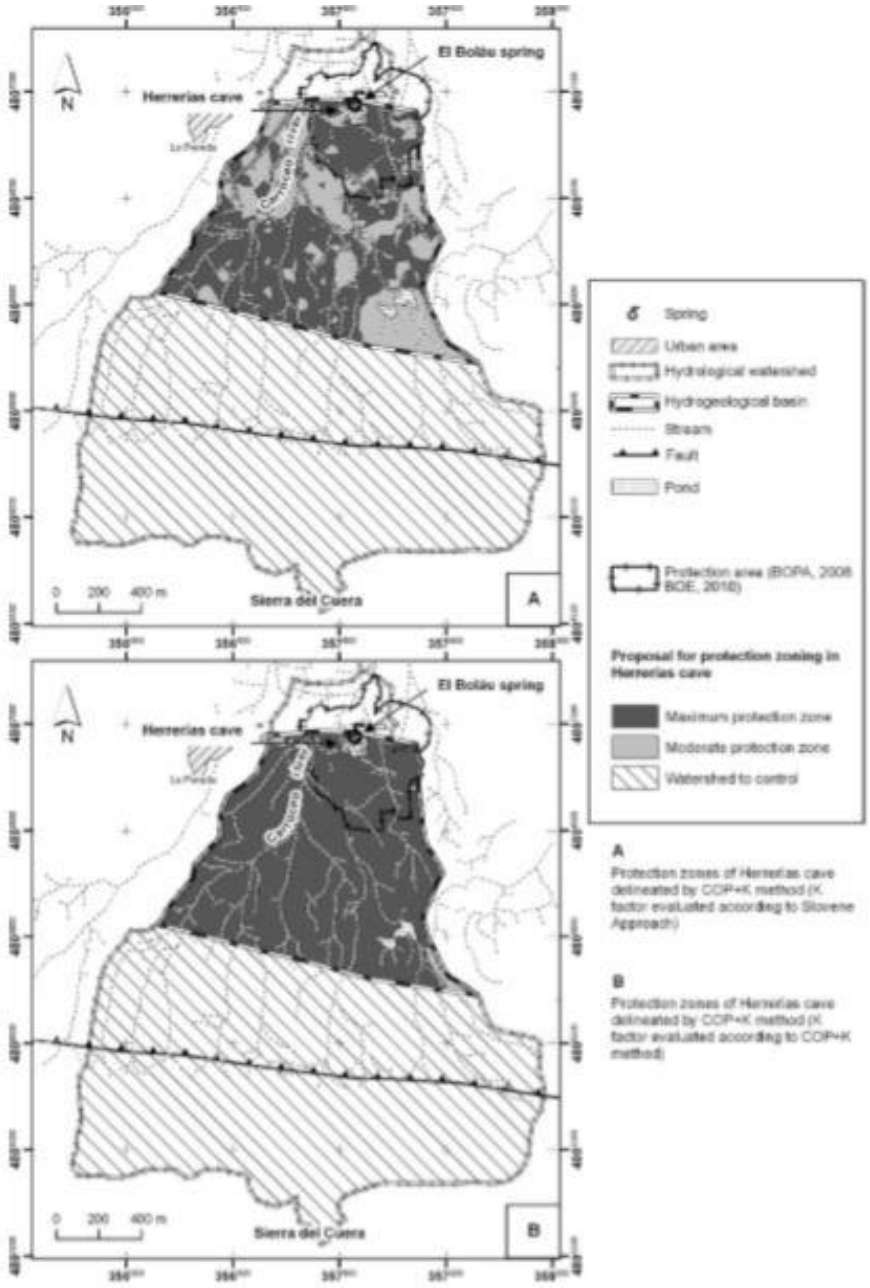


Slika 23. Procjena ranjivosti COP+K u svrhu zaštite špiljskog sustava [26]



Slika 24. Rezultati analize ranjivosti spiljskog sustava dobiveni COP metodom [26]

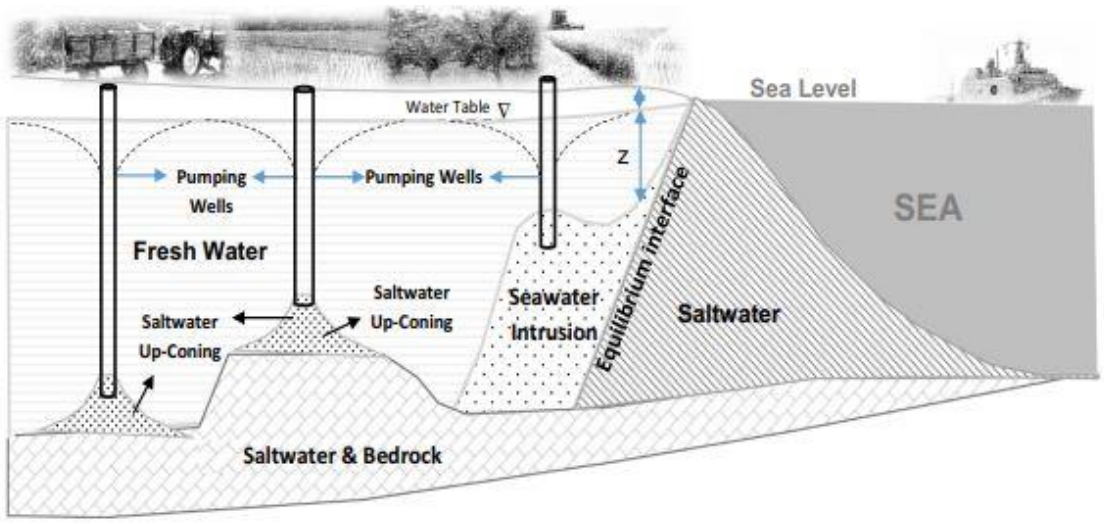
Rezultati tako provedene analize ranjivosti upotrijebljeni su za definiranje različitih zona zaštite špiljskog sustava, što je vidljivo na Slici 25., čime se dobila mnogo funkcionalnija zaštita jer je obuhvatila sve kritične točke u kojima je sustav najranjiviji na pojavu onečišćenja. Različiti stupnjevi zaštite u zonama omogućuju odgovarajuću zaštitu špilji, ali i omogućuju ljudsku aktivnost koja je u ovom slučaju kompatibilna s očuvanjem špilje [26].



Slika 25. Predložene zone zaštite zone zaštite dobivene COP+K metodom, gdje je K određen (A.) Slovenskim pristupom i (B.) COP+K metodom [26]

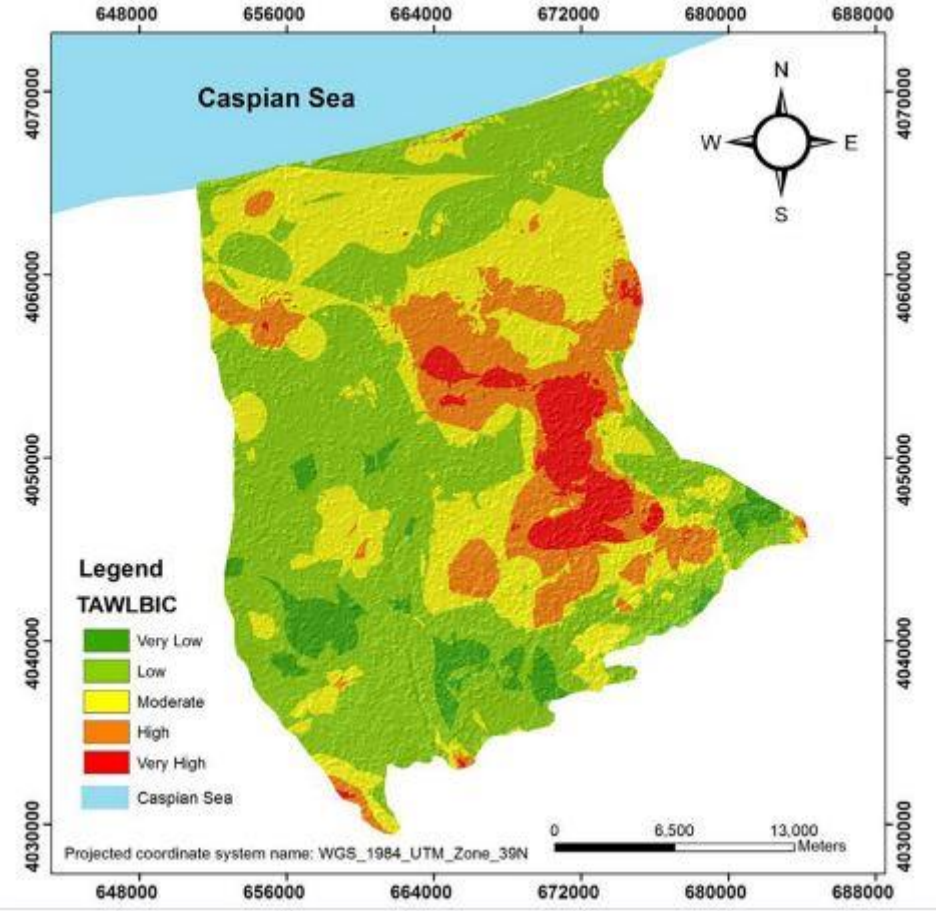
5.5. Procjena rizika od zaslanjenja podzemnih voda

Zaslanjenje vodonosnika u priobalnom području oduvijek je bio problem po pitanju vodoopskrbe, ali u posljednje se vrijeme znatno povećalo upravo kao posljedica ljudskih aktivnosti i prouzročilo je nepopravljive okolišne i ekonomske štete. Razumijevanje mehanizama pod kojima dolazi do prodora slane vode u kopnene vodonosnike izuzetno je teško te postoje razni znanstveni izazovi za razumijevanje procesa zaslanjenja. Jedan od konceptualnih modela zaslanjenja vodonosnika prikazan je Slikom 26.



Slika 26. Konceptualni model zaslanjenja vodonosnika [28]

Budući da je procjena kakvoće podzemnih voda izrazito važna za planiranje i održivo korištenje resursa podzemnih voda, procjena ranjivosti od zaslanjenja podzemnih voda može biti od velike koristi. Autori obrađenih studija za cilj su postavili izraditi kartu ranjivosti (Sveobuhvatni indeks slanosti ili tzv. *Comprehensive Salinity Index* - CSI) na prodor morske vode u priobalnim vodonosnicima [27, 28]. Iako je ovo malo drugačija vrsta ranjivosti, od do sada obrađenih, princip ostaje isti: vrednovani su parametri koji imaju utjecaj na zaslanjenje poput građe vodonosnika, hidrauličkih uvjeta, količine eksploatirane podzemne vode, formirani su u GIS bazi podataka i kombinacijom promatranih parametara izrađena je karta ranjivosti, vidljiva na Slici 27., na zaslanjenje priobalnog vodonosnika.



Slika 27. Karta ranjivosti od zaslanjenja promatranog vodonosnika [28]

5.6. Primjer cjelokupne procjena rizika podzemne vode u industrijskom području i povezani utjecaj na močvarno područje u blizini urbane sredine u Grčkoj

U današnje vrijeme jedan od najvećih problema povezanih uz okoliš je onečišćenje podzemnih voda nekontroliranim ispuštanjem otpadnih industrijskih voda koje uzrokuju značajno pogoršanje kvalitete podzemnih voda. Izrada karata ranjivosti i rizika najrašireniji su pristup za određivanje područja u kojima je visok potencijal onečišćenja te za planiranje zaštite vodonosnika. Za procjenu ranjivosti često se koriste hidrogeološki modeli, statističke metode i trasiranja čiji rezultati se prikazuju pomoću kompjuterskih programa poput GIS-a koji olakšavaju i ubrzuju dobivanje konačnog rezultata. Kartiranje rizika obuhvaća kombinacije karata ranjivosti i korištenja zemljišta. U ovom primjeru korištena je COP metoda (prikazana u poglavlju 2.2. ovoga rada) za određivanje

ranjivosti i rizika na močvarnom području u blizini urbanog područja (Slika 28) gdje dolazi do opterećenja iz industrijskih postrojenja, poljoprivrednih površina i odlagališta otpada [29].



Slika 28. Zračna snimka malog jezera Koumoundourou u blizini industrijske rafinerije Aspropirgos snimljena bespilotnom letjelicom [30]

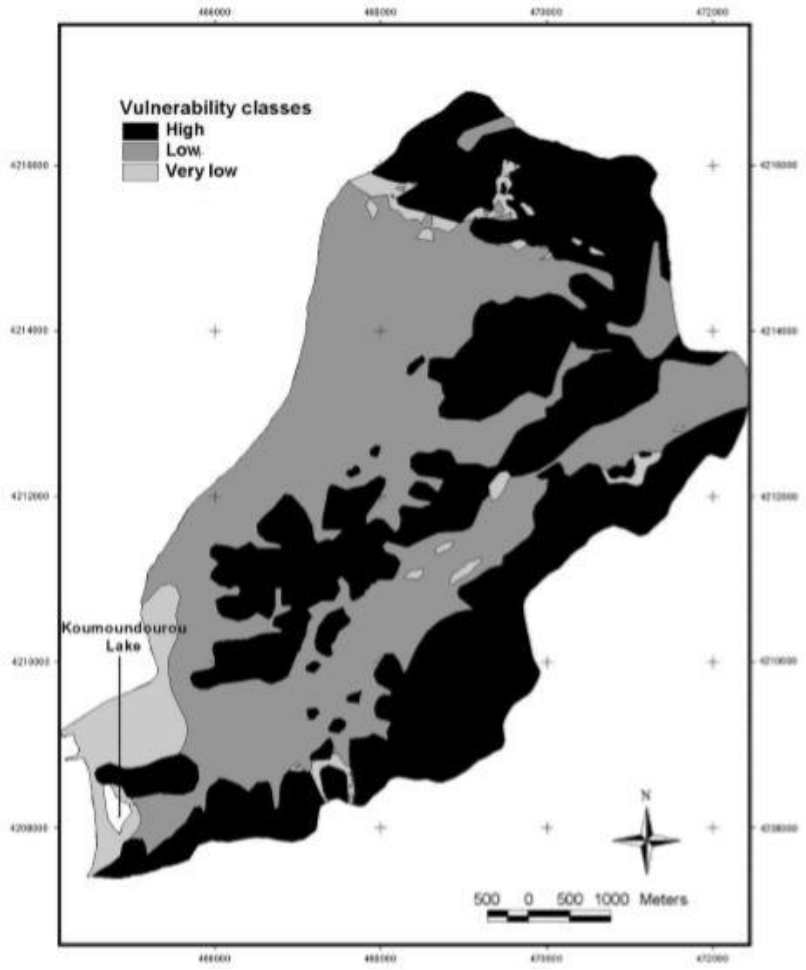
Područje prihranjivanja jezera Koumoundourou je prigradsko područje u zapadnom dijelu regije Atika u Grčkoj. Površina promatranog područja je 39,8 km^2, nadmorska visina varira između 0 i 540 m, a prosječni nagib je 8 %. Na promatranom području nalaze se rafinerija, tvornica azbesta i glavno odlagalište regije Atika koje zbrinjava otpad koji proizvodi oko 3 milijuna ljudi na udaljenosti oko 12 km od središta Atene. Jezero Koumoundourou nalazi se uz Eleuzinski zaljev, površina jezera uzdignuta je na samo 1,41 m iznad mora, a zahvaća područje površine 147000 m^2. Srednja dubina jezera je 1,5 m te se prihranjuje iz potopljenih izvorišta na sjeverozapadnoj obali jezera. Voda s navedenih izvorišta miješa se s oborinskom vodom i slanom vodom koja prodire iz Eleuzinskog zaljeva tvoreći meromiktičko slankasto jezero s prosječnom slanosti od 10,50 ‰ što je izmjereno u prosincu 2002 godine.

Geološki gledano, područje je građeno od sedimenata kvartarne starosti koji prekrivaju vapnenačko dolomitne stijene ispod kojih se nalaze nepropusni škriljci i glinice. Na južnom dijelu jezera postavljena je ustava koja služi za propuštanje viška vode iz jezera

u more da bi se spriječilo poplavljivanje autoceste koja prolazi usporedno s obalom koja dijeli jezero i more. Prosječna godišnja količina padalina iznosi 360 mm od čega 70 % padne između studenog i veljače. Prosječna godišnja evaporacija iznosi 1630 mm. Klima u navedenom području je mediteranska suptropska koja je na samoj lokaciji jezera dodatno ublažena zbog povećane temperature koju uzrokuje intenzivna industrijalizacija te blizina mora.

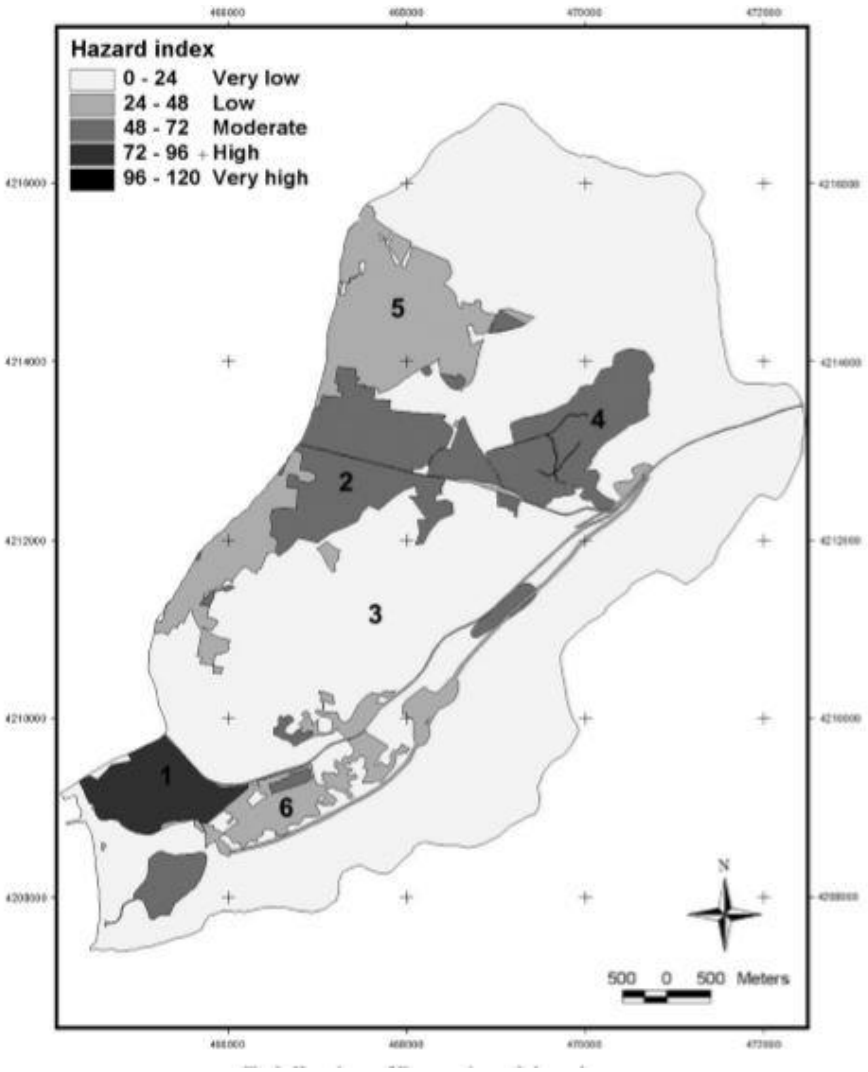
Industrijska postrojenja uz samo jezero predstavljaju značajnu opasnost od onečišćenja. Na sjevernoj strani jezera nalazi se vojni kamp koji se koristi za skladištenje i opskrbu naftnim derivatima, na sjeverozapadu se nalazi državna rafinerija nafte, dok je na jugozapadu tvornica koja se bavi rezanjem mramora. Izlijevanje i curenje iz vojnog postrojenja i rafinerije uzrokuju stvaranje tankog sloja nafte na površini jezera te infiltraciju ugljikovodika u vodonosnik. Jedan od značajnih izvora onečišćenja na ovom području su i procjedne vode s odlagalište otpada u blizini Atene na udaljenosti oko 7 km od samog jezera [29].

Prirodna ranjivost vodonosnika procijenjena je korištenjem COP metode te su određene zone ranjivosti prema geomorfološkim uvjetima te svojstvima tla, stijena i postojanja vegetacije. Sliv je digitaliziran pomoću programa ArcView GIS, a korištene su topografske karte u mjerilu 1:25000. Veličina ćelija kod digitalizacije iznosi 25 m. Najprije je određen faktor C (koncentracija toka), tako da su svakom polju dodijeljene težinske vrijednosti koje opisuju nagib terena, vegetaciju i krške morfološke oblike. Ova karta pokazuje kako brzo potencijalno onečišćenje i voda s površine terena dolaze do vodonosnika. Zatim je određena zaštitna funkcija površinskih slojeva tla O, proučavane su vrste i dubina tla te litološka svojstva i debljina nesaturirane zone vodonosnika. Oborine P, koje smanjuju zaštitnu funkciju, određene su kao kombinacija količine i intenziteta oborina prema prostornom rasporedu na četiri meteorološke postaje iz srednje količine padalina u razdoblju od 1990. do 2000. godine, a distribucija je određena pomoću kriging metode interpolacije. Karta ranjivosti, vidljiva na Slici 29, dobivena je kao umnožak svakog od ranije spomenutih faktora.



Slika 29. Karta ranjivosti sliva jezera Koumoundourou dobivena COP metodom [29]

Za izradu karte opasnosti korištene su zračne snimke iz 2000. godine pomoću kojih je određen tip industrijskih djelatnosti na području sliva te su korištene karte korištenja zemljišta. Klasifikacija opasnosti koja je prikazana kartom na Slici 30, određena je prema smjernicama iz COST Action 620 projekta na način da su dodijeljene težinske vrijednosti prema toksičnosti, topljivosti i pokretljivosti promatranog onečišćivala. Zatim se težinska vrijednost umanjila toliko koliko je stvarna mogućnost nastanka onečišćenja, baš kao što je opisano u poglavlju 3 ovoga rada.

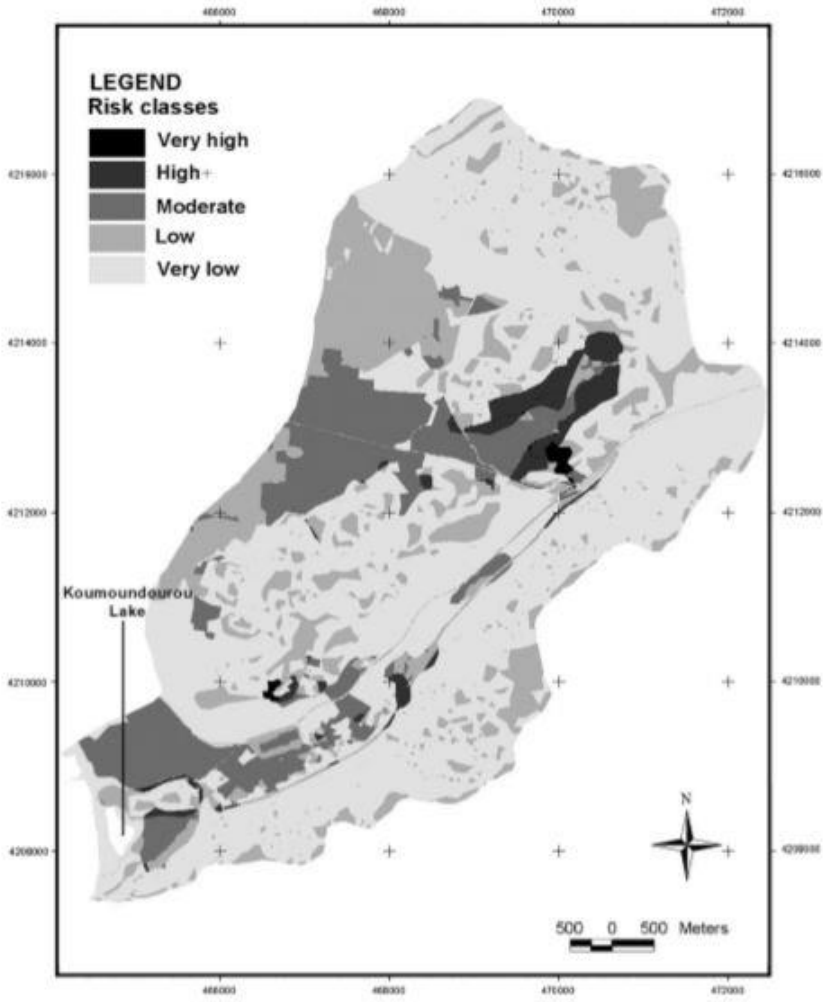


Slika 30. Karta opasnosti sliva jezera Koumoundourou [29]

Kao konačni rezultat cjelokupne analize napravljena je karta rizika prikazana na Slici 31. Ukupan rizik R_i dobiven je prema formuli (6):

$$R_i = \frac{1}{H_i \times V} \qquad (6)$$

Gdje je H_i indeks opasnosti, a V procijenjena prirodna ranjivost. Karta rizika prikazana je na slici 22.



Slika 31. Karta rizika sliva jezera Koumoundourou [29]

Analize kakvoće podzemne vode na promatranom području dale su vrlo zabrinjavajuće rezultate jer je kvaliteta vode izuzetno narušena. Utvrđena je povećana koncentracija kloridnih iona uzrokovana crpljenjem vode zbog čega dolazi do prodiranja morske vode u unutrašnjost, odnosno miješanje slane i slatke vode u jezeru. Koncentracija nitrata u podzemnoj vodi varira između 211 i 885 mg/l što je od 4 do 17 puta veća koncentracija od koncentracije u vodi koja je primjerena za ljudsku upotrebu (50 mg/l). Koncentracije nitrata u jezeru još su više nego u vodonosniku čemu doprinosi ispuštanje otpadnih voda iz vojnog postrojenja uz obalu jezera. Uz nitrate izrazito su povišene i vrijednosti fosfata što ukazuje na značajan utjecaj procjednih voda iz nekontroliranog odlagališta otpada u blizini Atene, nadalje, u jezeru je primijećena manja koncentracija fosfata u odnosu na vodonosnik što je rezultat bioloških procesa u samom jezeru te skladištenja fosfata u sedimentima koje je izraženije u močvarnom području nego u podzemnoj vodi.

Karta ranjivosti podzemnih voda u slivu jezera Koumoundourou ukazala je na relativno visoku prirodnu zaštitu u nizini zbog postojanja debelih i srednje propusnih slojeva koji pokrivaju vodonosnik. Zona visoke ranjivosti na ovom području nalazi se na brdovitim vapnenačkim izdancima u središnjem dijelu te cijeli istočni dio sliva. Iako se većina industrijskih postrojenja nalazi u relativno dobro zaštićenoj nizinskoj zoni, karta rizika od onečišćenja podzemnih voda ukazuje na umjereni do visoki rizik zbog značajnog utjecaja određenih ljudskih aktivnosti.

Zona visokog rizika uglavnom se proteže na području odlagališta otpada, a posebno u dijelu koji je iznad vapnenačkih formacija, dok se područja vrlo visokog rizika susreću samo na mjestima na kojima su specifične industrije smještene na područjima velike ranjivosti. Ovi su rezultati potvrđeni i analizama kakvoće podzemne vode i vode u jezeru kao i biološkim istraživanjem na širem području jezera. Vrijednosti PCB-a i PAH-a povećavaju se u smjeru toka podzemne vode, a u jezeru Koumoundourou otkrivene su najviše razine. To je zbog prihranjivanja jezera podzemnom vodom preko potopljenih izvora i istjecanja iz industrije i poljoprivrednih aktivnosti. Koncentracije teških metala bile su relativno veće u sjeveroistočnom dijelu jezera što potvrđuje rezultate karte rizika u vezi utjecaja rafinerije nafte.

Ukupne koncentracije teških metala u jezeru nisu bile izuzetno visoke tijekom razdoblja ispitivanja, a to je zbog nekoliko mjera obnove koje su omogućile uklanjanje značajne količine nafte iz jezera u posljednjih 5 godina. Slična su istraživanja pokazala da primjena modela ranjivosti podzemnih voda i kartiranja rizika za identificiranje utjecaja ljudskih aktivnosti može pružiti točne rezultate, dok se rezultati takvih modela mogu koristiti za učinkovito upravljanje okolišem od strane odgovorne vlasti.

6. ZAKLJUČAK

Za izradu karata prirodne ranjivosti, opasnosti i rizika potrebno je obaviti brojna istraživanja geoloških, hidroloških i hidrogeoloških uvjeta istraživanog područja, analizirati dobivene podatke te izraditi modele procjene. Proces je dugotrajan i zahtijeva puno podataka visoke točnosti što je teško pribaviti, a rezultati dobiveni procjenama rizika mogu se upotrijebiti za razne namjene.

U radu je opisano kako se pomoću rezultata dobivenih korištenjem različitih metoda izrade karata ranjivosti, opasnosti i rizika na odabranim lokacijama mogu dobiti kvalitetne osnove za određivanje mjera za postizanje dobrih ciljeva u zaštiti okoliša. Na lokacijama gdje je visok rizik od onečišćenja ili se onečišćenje već dogodilo potrebno je primijeniti mjere ublažavanja utjecaja na podzemnu vodu, a u konačnici sam rizik smanjiti na najmanju moguću mjeru.

Metodologija obrađena ovim radom, posebno analiza prirodne ranjivosti, može biti vrlo koristan alat u provođenju zaštite podzemnih voda u krškim vodonosnim sustavima. U nekim zemljama praksa je (čak i zakonski propis) takve multiparametarske metode koristiti kao jednu od metoda istraživanja kod definiranja zona sanitarne zaštite izvorišta pitke vode. Osim za zaštitu izvorišta pitke vode po istoj analogiji moguće ju je primijeniti i za planiranje zaštite drugih prirodnih objekata čije je funkcioniranje usko vezano uz vodu, poput na primjer špiljskog sustava u karbonatnim stijenama.

Određivanje odgovarajuće lokacije odlagališta krutog otpada također se može provoditi korištenjem metoda ranjivosti podzemne vode. Na taj način dobrim položajem odlagališta u prostoru minimalizira se štetni utjecaj na okoliš, pogotovo podzemne vode. Uz to, metode ranjivosti mogu se koristiti općenito kod donošenja odluka prostornog planiranja, tako da se dijelovi sliva izdvojeni kao manje ranjivi namjene za daljnji gospodarski razvoj područja uz uvažavanje općih mjera zaštite. Pri tome treba naglasiti da ovakva analiza, iako vrlo korisna, nikako ne može zamijeniti ni jednu drugu skupinu istraživanja, već ju može samo nadopuniti.

Procjena razine opasnosti koju neki hazard predstavlja podzemnoj vodi također je obuhvaćena ovom metodologijom. Izdvajanje objekata koji su potencijalna prijetnja kvaliteti podzemne vode identificira opasne točke istraživanog područja i na taj način stavlja naglasak na njih. Procjene opasnosti predstavljena u ovom radu sveobuhvatna je

procedura koja može biti napredak metodologije izrade registra onečišćivača jer osim što identificira opasnosti, ona ih i rangira. Na taj način je olakšana ocjena stvarne opasnosti koja prijeti podzemnoj vodi od različitih izvora onečišćenja te usporedba opasnosti na raznim područjima.

Primjer izrade cjelokupne analize rizika sliva jezera Koumoundourou obrađen u ovome radu kako bi se potkrijepile ove tvrdnje. Rezultati provedene analize ukazali su da loše stanje vodonosnika uzrokovano prodiranjem morske vode u jezero te antropogenim utjecajem u vidu procjednih voda s odlagališta otpada te ispuštanjem otpadnih i naftom onečišćenih voda iz rafinerije i vojnog postrojenja. U ovom slučaju prepoznata je degradacija kvalitete vode i ekosustava te je uspostavljen plan monitoringa, upravljanja i obnove vodonosnika. Ponovljena istraživanja nakon određenog perioda provođenja mjera ukazala su na poboljšanje stanja vode što ukazuje na važnost povezivanja analiza prirodne ranjivosti, opasnosti i rizika s daljnjim mjerama očuvanja i poboljšanja kvalitativnog i kvantitativnog stanja podzemnih voda i uz njih vezanih ekosustava.

Analize ranjivosti i rizika su složene zbog velikog broja faktora koji utječu na kvalitetu iste te potrebe rada stručnjaka iz brojnih područja prirodnih i društvenih znanosti, no daju neprocjenjive podatke kod planiranja urbanih područja, određivanja zona zaštite izvorišta, monitoringa kakvoće i količine podzemnih voda, otkrivanja izvora onečišćenja i pažljivog upravljanja podzemnim vodnim resursima koje su nezamjenjiv izvor pitke vode.

7. POPIS LITERATURE

[1] Ustav Republike Hrvatske (NN 56/90, 135/97, 08/98, 113/00, 124/00, 28/01, 41/01, 55/01, 76/10, 85/10, 05/14). Dostupno na: https://www.zakon.hr/z/94/Ustav-Republike-Hrvatske

[2] Zakonom o zaštiti okoliša (NN 80/13, 153/13, 78/15, 12/18, 118/18). Dostupno na: https://www.zakon.hr/z/194/Zakon-o-za%C5%A1titi-okoli%C5%A1a

[3] Margat, J. (1968) Vulnerabilite des nappes d'eau souterrune a la pollution (Groundwater Vulnerability to Contamination). Bases de al cartographie (Doc.) 68 SGC 198HYD, BRGM, Orleans.

[4] Vrba J. & Zaporozec A. (eds.) (1994): Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, International Contribution to Hydrogeology (IAH), 131 p., Hannover

[5] COST action 65 (1995): Final report. "Carst groundwater protection". European Comission, Report EUR 16547 EN, Directorate - General Science, Research and Development , 446 str.

[6] Gogu, R.C. & Dassargues, A. (2000a): Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environmental Geology 39 (6), 549 – 559.

[7] DoELG/EPA/GSI (1999): Groundwater protection shemes. Department of Environment and Local Government, Environmental Protection Agency and Geological Survey of Ireland, 24 str, Dublin.

[8] Foster, S.S.D. (1987): Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants ed. Proceedings and information commitee for hydrological research, TNO, pp. 69-86.

[9] 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.

[10] Doerfliger N., Jeannin P.Y. & Zwahlen F. (1999): Water vulnerabiliy 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

[11] 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.

[12] COST 620 (2004) "Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers" Ed. Zwahlen, F., European Comission, Directorate – General for Research, European research area: structural aspects – COST, 279 str.

[13] Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, I.C. & Zwahlen, F. (2002): Main concepts of the European Approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. Hydrogeology Jurnal 10 (2), 340 – 345.

[14] Doerfliger N. & Zwahlen F. (1995): EPIK, a new method for outlining of protection areas: a water vulnerability assessment in karst environment. U: Proceedings of 5th International Symposium on karst waters and environmental impacts, Antalya, Balkema, 117 – 123.

[15] Loborec, J (2013): Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda u kršu na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice. Doktorski rad, Rudarsko geološko naftni fakultet sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

[17 u 16] Vías, J.M., Andreo, B., Perles, M.J., Carrasco, F., Vadillo, I. & Jiménez, P. (2006): Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Hydrogeology Journal, 14, 912-925

[17] Okvirna direktiva o vodama. (2000/60/EZ)

[18] Doerfliger, N. & Zwhalen, F. (1997): EPIK: Cartographic Method for Assessing the Vulnerability of Karst Aquifers for the purpose of Delineating Protection Zones. U: Proceedings of the 1997 Karst and Cave Management Symposium 13th National Cave Management Symposium, Bellingham, Washington and Chilliwack and Vancouver Island, BC, Canada.

[19] Diary Ali Mohammed Amin Al-Manmi1 & Kosho Ali Saleh1 (2019): Delineation of spring protection zone and vulnerability mapping of selected springs in Sulaymaniyah area, Kurdistan, Iraq. Environmental Earth Sciences (2019) 78:622. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8632-2

[20] Awawdeh, M. & Nawafleh, A. (2008): A GIS-based EPIK Model for Assessing Aquifer Vulnerability in Irbid Governorate, North Jordan. Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 2, No. 3.

[21] Collin, M. L. & Melloul, A.J. (2003): Assessing groundwater vulnerability to pollution to promote sustainable urban and rural development. Journal of Cleaner Production. Volume 11, Issue 7, November 2003, Pages 727-736. https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00131-2

[22] Eaton Timothy, T. & Zaporozec A. (1997): Evaluation of groundwater vulnerability in an urbanizing area. Chilton (Ed.), Groundwater in the urban environment: problems processes and management, Problems, processes and management, vol. 1, A.A. Balkema, Rotterdam. pp. 577-582.

[23] Kent S. Murray & Daniel T. Rogers (1999): Groundwater Vulnerability, Brownfield Redevelopment and Land Use Planning, Journal of Environmental Planning and Management, 42:6, 801-810, DOI: 10.1080/09640569910830.

[24] Dorn, M. & Tantiwanit, W. (2001): New methods for searching for waste disposal sites in the Chiang Mai–Lamphun basin, Northern Thailand. Environ Geol. 40:507–517 (DOI: 10.1007/s002540000187)

[25] Simsek, C., Kincal, C. & Gunduz, O. (2006): A solid waste disposal site selection procedure based on groundwater vulnerability mapping. Environ Geol (2006) 49: 620–633. DOI 10.1007/s00254-005-0111-2.

[26] A.I. MarI´n, B. Andreo, M. Jime´nez-Sa´nchez, M.J. DomI´nguez-Cuesta, and M. Mele´ndez-Asensio (2012): Delineating protection areas for caves using contamination vulnerability mapping techniques: the case of Herrerı´as Cave, Asturias, Spain. Journal of Cave and Karst Studies, v. 74, no. 1, p. 103–115. DOI: 10.4311/2011jcks0197

[27] Motevalli, A., Pourghasemi, H. R., Hashemi, H. & Gholami, V. (2019): Assessing the Vulnerability of Groundwater to Salinization Using GIS-Based Data-Mining Techniques in a Coastal Aquifer. Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences, pp 547-571, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00025-9

[28] Motevalli, A., Moradi, H. R., Hashemi, H. & Gholami, V. (2018):A Comprehensive evaluation of groundwater vulnerability to saltwater up-coning and sea

water intrusion in a coastal aquifer (case study: Ghaemshahr-juybar aquifer). Journal of Hydrology, Volume 557, February 2018, Pages 753-773. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.047

[29] E. Dimitriou et al (2008): Groundwater risk assessment at a heavily industrialised catchment and the associated impacts on a peri-urban wetland. Journal of Environmental Management 88, 526-538.

[30] Aerial-motion, Aerial drone photo of small lake of Koumoundourou near industrial refinery of Aspropirgos, Attica, Greece, https://www.shutterstock.com/image-photo/aerial-drone-photo-small-lake-koumoundourou-1662702361

POPIS SLIKA

Slika 1. Model „porijeklo – put – cilj“ ……. 4

Slika 2. Shema izrade karata ranjivosti kombinacijom parametara O, C, P i K .....….. 5

Slika 3. Konceptualni model krškog vodonosnika ……..…….. 7

Slika 4. Dijagram određivanja klasa parametra E …… 8

Slika 5. Dijagram određivanja klasa parametra P ……. 9

Slika 6. Dijagram određivanja klasa parametra I …… 10

Slika 7. Dijagram određivanja klasa parametra K ……...…… 11

Slika 8. Prikaz određivanja faktora O …… 14

Slika 9. Prikaz određivanja faktora C za Scenarij 1 …… 15

Slika 10. Prikaz određivanja faktora C za Scenarij 2 ……..... 16

Slika 11. Prikaz klasifikacije C faktora ……...…… 16

Slika 12. Prikaz određivanja faktora P …… 17

Slika 13. Prikaz određivanja COP indeksa i klasa ranjivosti …….. 18

Slika 14. Težinske vrijednosti za pojedine tipove opasnosti ……..…. 21

Slika 15. Shematski prikaz ukupnog rizika ……. 22

Slika 16. a i b. Različiti načini procjene intenziteta rizika bez matematičkih izračuna .. 24

Slika 17. Dijagram procjene intenziteta rizika prema matematičkom modelu …….. 25

Slika 18. Karta ranjivosti vodonosnika u Iraku ……...…… 27

Slika 19. Zone zaštite izvorišta određene pomoću karte ranjivosti vodonosnika u Iraku ……...…… 29

Slika 20. Područje istraživanja za određivanje lokacije odlagališta otpada u Turskoj…31

Slika 21. Kartografski prikaz rezultata analize područja za izgradnju odlagališta otpada.32

Slika 22. Lokacija spiljskog sustava Herrerı´as, Španjolska……33

Slika 23. Procjena ranjivosti COP+K u svrhu zaštite špiljskog sustava……..…34

Slika 24. Rezultati analize ranjivosti spiljskog sustava dobiveni COP metodom…..…..34

Slika 25. Predložene zone zaštite zone zaštite dobivene COP+K metodom, gdje je K određen (a.) Slovenskim pristupom i (b.) COP+K metodom……..35

Slika 26. Konceptualni model zaslanjenja vodonosnika…….36

Slika 27. Karta ranjivosti od zaslanjenja promatranog vodonosnika……...37

Slika 28. Zračna snimka malog jezera Koumoundourou u blizini industrijske rafinerije Aspropirgos snimljena bespilotnom letjelicom……38

Slika 29. Karta ranjivosti sliva jezera Koumoundourou dobivena COP metodom……..40

Slika 30. Karta opasnosti sliva jezera Koumoundourou…….……..41

Slika 31. Karta rizika sliva jezera Koumoundourou…….42

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti E, P, I i K parametra……11

Tablica 2. Vrijednosti težinskih faktora α, β, γ i δ……...11

Tablica 3. Raspodjela klasa ranjivosti vodonosnika ovisno o vrijednostima zaštitnog faktora i predložene zone sanitarne zaštite izvorišta u kršu……12

Tablica 4. Kategorije opasnosti od potencijalnog onečišćenja i njihov način prikazivanja na karti……...…22

Tablica 5. Zone zaštite izvora u EPIK metodi……...28