

# Primjena KAVA metode u procjeni ranjivosti sliva Jadra i Žrnovnice s ciljem zaštite podzemnih voda

---

Japarić, Edi

Master's thesis / Diplomski rad

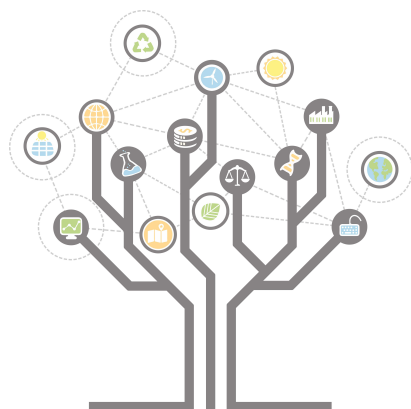
2022

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:144144>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-24**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering -  
Theses and Dissertations](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET**

**EDI JAPARIĆ**

**PRIMJENA KVA METODE U PROCJENI RANJIVOSTI  
SLIVA JADRA I ŽRNOVNICE S CILJEM ZAŠTITE  
PODZEMNIH VODA**

**DIPLOMSKI RAD**

**VARAŽDIN, 2022.**

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 14.07.2022. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 30.06.2022.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva:

*br. prof. dr. sc. Saša Kovač*

### Članovi povjerenstva

- 1) *br. prof. dr. sc. Hrvoje Meaški*
- 2) *Doc. dr. sc. Jelena Labarec*
- 3) *Prof. dr. sc. Saša Kovač*

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

EDI JAPARIĆ

PRIMJENA KAVA METODE U PROCJENI RANJIVOSTI SLIVA  
JADRA I ŽRNOVNICE S CILJEM ZAŠTITE PODZEMNIH VODA

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:

Edi Japarić



MENTOR:

Izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški

KOMENTOR:

Doc.dr.sc. Jelena Loborec

VARAŽDIN, 2022.



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom: **Primjena KAVA metode u procjeni ranjivosti sliva Jadra i Žrnovnice s ciljem zaštite podzemnih voda**, rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **izv.prof.dr.sc. Hrvoja Meaški i 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, 30.06.2022.

Edi Japarić



---

(Vlastoručni potpis)

## **IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI DIPLOMSKOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA**

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

### **Primjena KAVA metode u procjeni ranjivosti sliva Jadra i Žrnovnice s ciljem zaštite podzemnih voda**

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

U Varaždinu, 30.06.2022.

Izv.prof.dr.sc. Hrvoje Meaški



(Vlastoručni potpis)

## SAŽETAK

IME I PREZIME AUTORA: Edi Japarić

NASLOV RADA: Primjena KAVA metode u procjeni ranjivosti sliva Jadra i Žrnovnice s ciljem zaštite podzemnih voda

Krško područje sadržava zalihe podzemne vode vrlo visoke kakvoće i neprocjenjive vrijednosti. Zbog svojih značajki krško je područje izuzetno podložno antropogenim utjecajima, što ga čini iznimno ranjivim. Sliv izvora Jadra i Žrnovnice jedan je od najznačajnijih izvora krškog područja u Hrvatskoj te je jedan od najvećih slivova u kršu Dinarida. Izvori Jadro i Žrnovnica opskrbljuju pitkom vodom gotovo cijelu Splitsko-dalmatinsku županiju. U ovom diplomskom radu opisan je postupak analize prirodne ranjivosti navedenog sliva u svrhu zaštite podzemnih voda. Za procjenu ranjivosti korištena je KAVA metoda. Ona je modificirana na osnovu postojećih metoda za procjenu prirodne ranjivosti te je razvijena i testirana u skladu sa svim karakteristikama dubokih krških vodonosnika u području Dinarida. Konačna procjena prirodne ranjivosti prema navedenoj metodi (u ovom slučaju analiza ranjivosti lokacija krških izvora) izrađuje se u potpunosti pomoću GIS tehnologije. KAVA metoda u analizi prirodne ranjivosti koristi četiri specifična faktora: O - faktor (pokrovne naslage), P – faktor (utjecaj oborina), I – faktor (utjecaj infiltracije) i A – faktor (uvjeti vodonosnika). Dobiveni rezultati omogućuju izradu konačne karte ranjivosti izvora (*Source Vulnerability Index - SVI*). Na temelju konačnog rezultata procjene prirodne ranjivosti predlažu se određena poboljšanja mjera za zaštitu podzemnih voda.

KLJUČNE RIJEČI: krški izvor, prirodna ranjivost, KAVA metoda, GIS.

## **ABSTRACT**

NAME AND SURNAME of the AUTHOR: Edi Japarić

TITLE: The application of the KAVA method for the vulnerability assessment of the Jadro and Žrnovnica basin with the aim of groundwater protection

A karst area contains high-quality groundwater supplies of enormous value. Due to its features, a karst area is very susceptible to anthropogenic effects, which make it exceptionally vulnerable. The Jadro and Žrnovnica springs catchment area is one of the most noticeable karst area sources in Croatia and one of the biggest basins of the Dinaric karst. Jadro and Žrnovnica springs supply almost the entire Split-Dalmatia County with fresh potable water. This master thesis describes the procedure of analysis the intrinsic vulnerability for the purpose of groundwater protection. The vulnerability was assessed by using the KAVA method. It was modified based on the existing methods for the evaluation of intrinsic vulnerability, and it was developed and tested according to all characteristics of a deep karst aquifer in the Dinaric region. The final evaluation of intrinsic vulnerability by using the KAVA method (evaluation of source vulnerability in this case) is made by using GIS. The KAVA method uses four specific factors in the analysis of intrinsic vulnerability: O - factor (cover layer), P - factor (precipitation effect), I – factor (infiltration effect) and A - factor(aquifer conditions). The obtained results enable making of a final map of source vulnerability (SV index). Based on the final evaluation of intrinsic vulnerability certain actions for groundwater protection are recommended.

KEYWORDS: karst spring, intrinsic vulnerability, KAVA method, GIS.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. OPIS PODRUČJA ISTRAŽIVANJA .....	2
2.1. Izvor rijeke Jadro .....	2
2.2. Izvor rijeke Žrnovnice .....	4
2.3. Geološka i hidrogeološka obilježja .....	5
2.4. Geografska i klimatološka obilježja .....	7
3. OPIS KAVA METODE ZA PROCJENU RANJIVOSTI PODZEMNE VODE .....	9
3.1. KAVA metoda .....	9
3.2. O – faktor .....	10
3.3. P – faktor .....	12
3.4. Površinski slivovi (Surface Catchment Areas – SCA) .....	15
3.5. I – faktor .....	16
3.6. A – faktor .....	20
3.7. Indeksi ranjivosti .....	22
4. ANALIZA RANJIVOSTI PODZEMNIH VODA U SLIVU JADRA I ŽRNOVNICE .....	25
4.1. Procjena ranjivosti – priprema podataka .....	25
4.2. Određivanje parametara ranjivosti .....	27
4.2.1. P – faktor .....	27
4.2.2. O – faktor .....	29
4.2.3. SCA parametar .....	32
4.2.4. I – Faktor .....	33
4.2.5. A – Faktor .....	36
4.3. Karta ranjivosti izvora (SVI) .....	40
5. PRIJEDLOG ZAŠTITE PODZEMNIH VODA SLIVA .....	42
6. ZAKLJUČAK .....	44
7. POPIS LITERATURE .....	45
POPIS SLIKA .....	46
POPIS TABLICA .....	47

# 1. UVOD

Podzemne vode gotovo su nevidljive, no njihov utjecaj vidljiv je posvuda. Izvan vidokruga, podzemna voda skriveno je blago, bez nje bi život bio nemoguć. U sušim dijelovima svijeta, podzemna voda možda je i jedina voda koju ljudi imaju za korištenje. Podzemna voda je jedan od najvažnijih čimbenika koji je bitan za život i zdravlje ljudi.

Krški vodonosnik je sloj vodonosnih stijena na ili u blizini površine terena, kod kojeg je tečenje podzemne vode koncentrirano uzduž sekundarno proširenih prslina, pukotina i drugih međusobno povezanih šupljina. Nastaje fizičkim djelovanjem i kemijskim otapanjem slojeva topivih stijena, lagano zakiseljenom vodom. Krški je vodonosnik heterogen i anizotropan i upravo ta svojstva uvelike diktiraju primjenjive metode istraživanja. Općenito je krške vodonosnike mnogo teže, a katkad i nemoguće odrediti primjenom klasičnih postupaka uobičajenih za homogene (ili kvazihomogene) međuzrnske sredine (Bonacci & Bonacci, 2004.).

Izvori Jadra i Žrnovnice područje su istraživanja korišteno za izradu ovog diplomskog rada. Izvori se nalaze u Splitsko-dalmatinskoj županiji te hidrogeološki spadaju u jadranski sliv. Smješteni su u podnožju planina Mosor i Kozjak. Kada se govori o području Jadra i Žrnovnice, govori se o jednom od najznačajnijih slivova u krškom području Hrvatske (napajaju gotovo cijelu županiju kvalitetnom pitkom vodom), ali i prostorno jednom od većih slivova u području Dinarida.

KAVA metoda je multiparametarska metoda za procjenu prirodne ranjivosti krških vodonosnika i izvora. Iako suštinski slična ostalim dostupnim metodama procjene ranjivosti (COP, EPIK, SINTACS, DRASTIC, PI...), KAVA metoda razvijena je u skladu sa svim karakteristikama dubokih krških vodonosnika u području Dinarida te je do sada testirana na nekoliko slivova u Republici Hrvatskoj. KAVA metoda razvijena je na temelju parametara koji su specifični za krške vodonosnike u Dinarskom području te korištenjem GIS tehnologije kombinira pripremu podataka i prostorne analize u svrhu dobivanja karte ranjivosti za istraživana područja (Biondić, et al., 2021.).

Cilj diplomskog rada je procjena prirodne ranjivosti izvora Jadro i Žrnovnica pomoću KAVA metode pomoću geografskog informacijskog sustava (ESRI – ArcGIS).

## **2. OPIS PODRUČJA ISTRAŽIVANJA**

Izvori Jadro i Žrnovnica se nalaze u Splitsko-dalmatinskoj županiji u krškom području u zaleđu grada Splita. Područje spomenute županije u hidrogeološkom pogledu spada u jadranski regionalni sliv te je prostor cijele županije podijeljen na 12 slivova. U području Dinarida, ovo promatrano područje je sigurno jedno od najznačajnijih slivnih područja zbog tog što opskrbljuje veći dio Splitsko-dalmatinske županije sa kvalitetnom vodom.

Slivno područje izvora Jadro i Žrnovnica nalaze se u podnožju Mosora i Kozjaka. Jadro se nalazi na 33 m n.m., a izvor Žrnovnice koji ima različite točke izviranja, nalazi se na oko 77 do 90 m n.m (Kapelj, et al., 2011.). Jadro opskrbljuje grad Split pitkom vodom još iz davnih vremena (rimskog doba). Jadro i Žrnovnica pripadaju istoj hidrogeološkoj strukturi i dijele isto slivno područje.

Krška područja bogata su količinom podzemnih voda visokog stupnja kvalitete, ali zbog specifičnosti hidrogeoloških obilježja u kršu Dinarida, podzemne vode su izrazito osjetljive na različite utjecaje, prirodne ili antropogene. Područje izvora Jadra i Žrnovnice, prostorno gledano, jedno je od najvećih slivnih područja pojedinačnih izvora u Dinaridima. Uzimajući u obzir geološke i hidrogeološke karakteristike promatranog područja i hidrološke proračune, površina sliva procjenjuje se na između 250 i 500 četvornih kilometara (Kapelj, et al., 2011.).

### **2.1. Izvor rijeke Jadro**

Izvor Jadro u funkciji je još od davnih vremena, postoje zapisi iz rimskog doba koji govore da se rimski car Dioklecijan upravo zbog tog velikog izvora vode smjestio na ovom mjestu. Nakon izvora na oko 33 m n.m. u donjem dijelu jugozapadnih padina planine Mosor dalje teče rijeka Jadro ukupne dužine oko 4,2 km koja prolazi kroz područje grada Solina te se ulijeva u more na području Kaštelanskog zaljeva. Jadro je uobičajen tip rijeke u krškim područjima, a njen potencijal proizlazi većim dijelom iz podzemnog dotoka iz krškog podzemnog, a dijelom iz površinskog dotoka izravno iz sliva. (Kapelj, et al., 2011.).



*Slika 1. Izvor Jadra (Izvor: [https://static.slobodnadalmacija.hr/Archive/Images/2016/02/29/Dalmacija/izletiste\\_jadro5-250216.jpg](https://static.slobodnadalmacija.hr/Archive/Images/2016/02/29/Dalmacija/izletiste_jadro5-250216.jpg) – Mario Todorčić)*

Rupotina i Poklinovac su najjače bujice od kojih Jadro prima bujične vode. Protok Jadra znatnije varira ovisno o količini padalina na slivu. U studenom 1985. izmjeren je najmanji protok rijeke Jadro kod Vidovića mosta i iznosi  $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$ , dok je u studenom 1997. izmjeren maksimalni protok koji iznosi  $78,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Srednji godišnji protok iznosi  $9,7 \text{ m}^3/\text{s}$ . Najmanji mjesečni protok rijeke Jadro kod Vidovića mosta je najmanji od sredine do kraja ljeta (kolovoz i rujan) kada se može dogoditi da padne i do  $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (2000. i 2003.). Izvor Jadra koristi se za vodoopskrbu Splita, Trogira, Solina i Kaštela te niz drugih okolnih naselja (Kapelj, et al., 2011.).

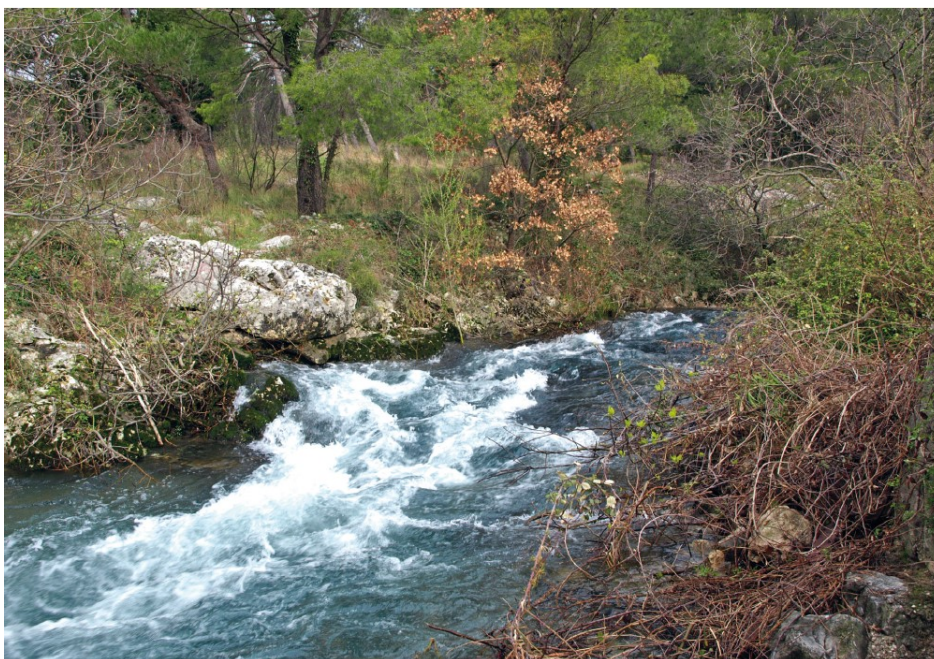
Količina istjecanja na izvoru Jadro izrazito varira, od maksimalnih količina oko  $78 \text{ m}^3/\text{s}$  (izmjereno 13. studenoga 1997.), do najmanja izdašnost koja je uvijek tokom sušnih razdoblja (kolovoz i rujan) kada srednji mjesečni protok može pasti na manje od  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  (izmjereno u kolovozu 1995. i rujnu 2003.). Tokom sušnog razdoblja zahvat vode s izvora Jadra za potrebe vodoopskrbe gradova i okolnih naselja najčešće poraste zbog pojačane potrošnje pa se umjesto dopuštenih  $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$  tada uzima i do  $2,9 \text{ m}^3/\text{s}$  (Kapelj, et al., 2011.).



## 2.2. Izvor rijeke Žrnovnice

Izvorište Žrnovnice čini niz manjih izvora koji se javljaju na širem području u visinskom rasponu od 77 do 88 m n.m (Kapelj, et al., 2011.). Voda izvora Žrnovnice opskrbljuje male dijelove aglomeracije (naselja Žrnovnica, Sitno, Korešnica i Srinjine), a dijelom se koristi za navodnjavanje okolnog poljoprivrednog zemljišta. Zahvat vode ostvaruje se jednostavnim zahvatnim konstrukcijama, a prijenos se odvija u cjevovodima.

Slika 2 prikazuje jedno od manjih mjesta istjecanja vode u području rijeke Žrnovnice – izvorište.



*Slika 2. Manji izvor rijeke Žrnovnice (Kapelj, et al., 2011.)*

Minimalna izmjerena izdašnost izvorišta Žrnovnica iznosi 0,25 m<sup>3</sup>/s, izmjerena u rujnu 1993., a maksimalna izmjerena izdašnost iznosi 19,1 m<sup>3</sup>/s (Kapelj, et al., 2011.). Nakon izvora voda svoj put prema moru formira u obliku istoimene rijeke.

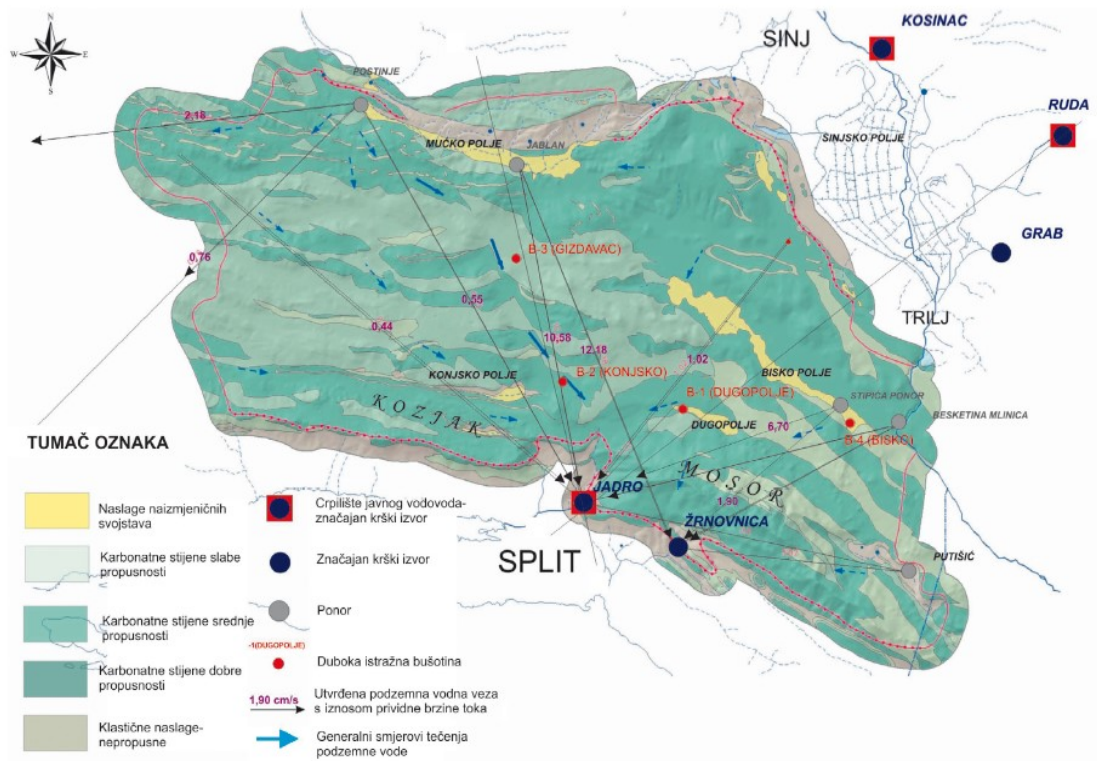
Od izvora do ušća (u Stobrečkoj uvali se ulijeva u more), sveukupna dužina rijeke Žrnovnice iznosi oko 4,5 km. Protoci joj znatno variraju ovisno o količini padalina na slivu. Najveći izmjereni protok u koritu rijeke Žrnovnice (postaja Laboratorij) iznosi 58,4 m<sup>3</sup>/s, izmjereno u prosincu 2004., najmanji protok oko 0,2 m<sup>3</sup>/s, izmjereno u rujnu 1993. Srednji godišnji protok iznosi 1,8 m<sup>3</sup>/s. Srednji mjesečni protoci rijeke Žrnovnice su najmanji početkom i sredinom ljeta (srpanj i kolovoz) - na izvoru iznose 0,61 – 0,58 m<sup>3</sup>/s, a kod Laboratorija 0,52 – 0,48 m<sup>3</sup>/s (Kapelj, et al., 2011.).

### **2.3. Geološka i hidrogeološka obilježja**

Područje promatranja zastupljeno je vapnencima, dolomitima, laporovitim vapnencima mezozojske i eocenske starosti, te vrlo sa vapnencima perma. Klastične naslage u slivnom području su najčešće fliške naslage eocena, klastiti trijasa i paleocenski lapori. Stratigrafski gledano, najmlađi su kvartarni deluvijalni sedimenti krških polja, pretežito siltozno – pjeskovitoga sastava s različitim udjelom ulomaka krških karbonatnih stijena (Kapelj, et al., 2011.).

Mezozojski i eocenski vapnenci su većinom porozne stijene koje imaju funkciju vodonosnika. Ovisno o prisutnosti dolomita i lapora, smanjuje se propusnost vapnenaca od srednje propusne do slabo propusne stijene. Nepropusne stijene uključuju naslage eocenskog fliša, klastite trijasa te paleocenske lapore koji su u funkciji potpunih ili relativnih hidrogeoloških barijera, sve ovisno o njihovom prostornom položaju. Potpune hidrogeološke barijere usmjeravaju tokove podzemnih voda, dok ispod relativnih barijera podzemne vode nesmetano teku. Propusnost deluvijalnih sedimenata krških polja ovisi o njihovom pretežitom granulometrijskom sastavu, odnosno udjelu krupnozrnatih i sitnozrnatih čestica, fragmenata stijena i sadržavaju glinovite komponente. Stoga zbog lateralne i vertikalne nehomogenosti sedimente krških polja u hidrogeološkom smislu smatramo propusnim naslagama (Kapelj, et al., 2011.).

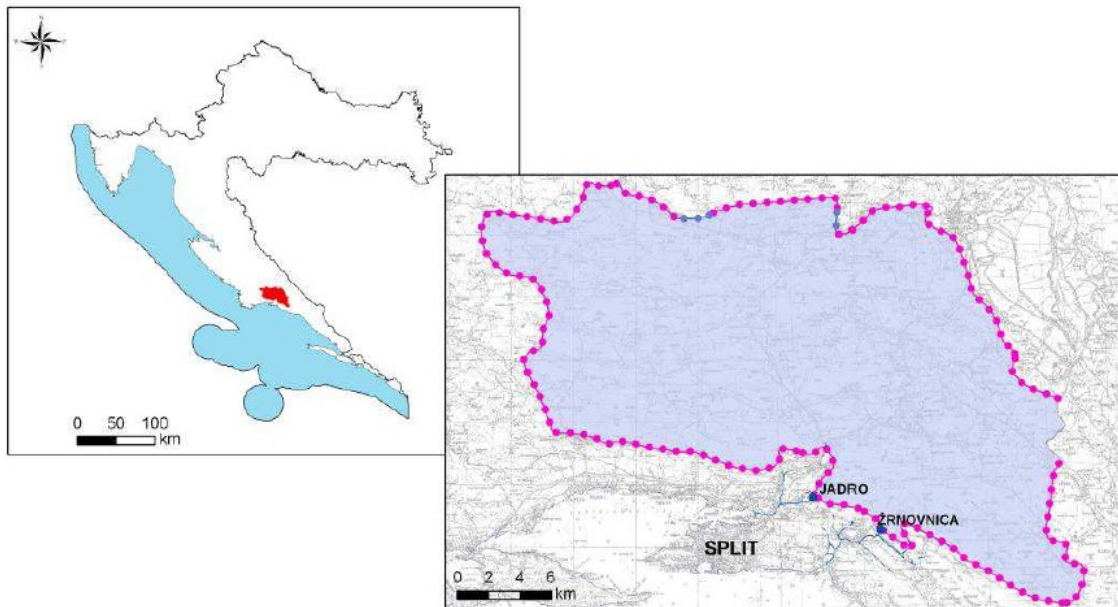
Slivno područje Jadra i Žrnovnice odlikuje naglašena razlomljenost i tektonska aktivnost (pojavljivanje potresa). Tektonska aktivnost rezultat je promjena u strukturnom odnosu, posebno u sustavu rasjeda i pukotina. Tektonski su najaktivnije dionice rasjeda poprečnog ili gotovo poprečnoga pružanja prema orijentaciji kompresijskog stresa. Na slici 3 je prikazana hidrogeološka karta sliva bez strukturnih elemenata.



Slika 3. Hidrogeološka karta područja izvora Jadra i Žrnovnice (Kapelj, et al., 2011.)

## 2.4. Geografska i klimatološka obilježja

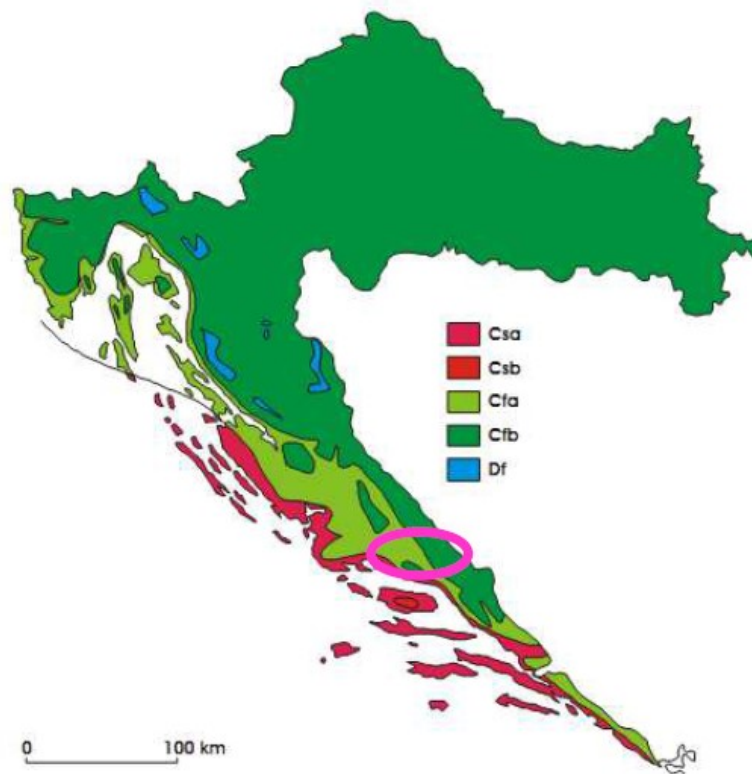
Slivno područje izvora Jadro i Žrnovnice smješteno je u širem zaleđu grada Splita, točnije između Kaštelanskog zaljeva i Trogira te drugih priobalnih naselja, duž Mosora od Stobreča do gotovo ušća Cetine u Omišu, prema slici 4. Gotovo cijelo slivno područje je unutar Splitsko – dalmatinske županije, no minimalan postotak (oko 2%) tog područja pripada Šibensko – kninskoj županiji, odvojen planinskim masivima Mosora i Kozjaka od priobalnog područja. Izvori su smješteni u podnožju Mosora (1300 m n.m.) i Kozjaka (600 m n.m.), u zoni kontakta karbonata splitske Zagore i obalnog fliškog pojasa (Loborec, 2013.).



*Slika 4. Geografski položaj sliva (Loborec, 2013.)*

Klima u ovom području mediteranskog je tipa koju obilježavaju suha i vruća ljeta te blage i vlažne zime. Većim udaljavanjem od priobalnog područja opada srednja godišnja temperatura i povećava se ukupna količina oborina. Zbog tih planinskih masiva spriječen je značajniji utjecaj mediteranske klime, tako da se u tom području mogu uočiti elementi i kontinentalne klime.

Za područje sliva Jadra i Žrnovnice ustanovljena su tri različita tipa klime: mediteranska klima s vrućim ljetom (priobalni pojas), kontinentalna klima s vrućim ljetom (ostatak sliva) i kontinentalna klima s toplim ljetom (slika 5) (Loborec, 2013.).



Slika 5. Koppenova raspodjela klimatskih tipova u Hrvatskoj (s označenim slivom) (Šegota & Filipčić, 2003.)

Objašnjenje kratica: (Šegota & Filipčić, 2003.)

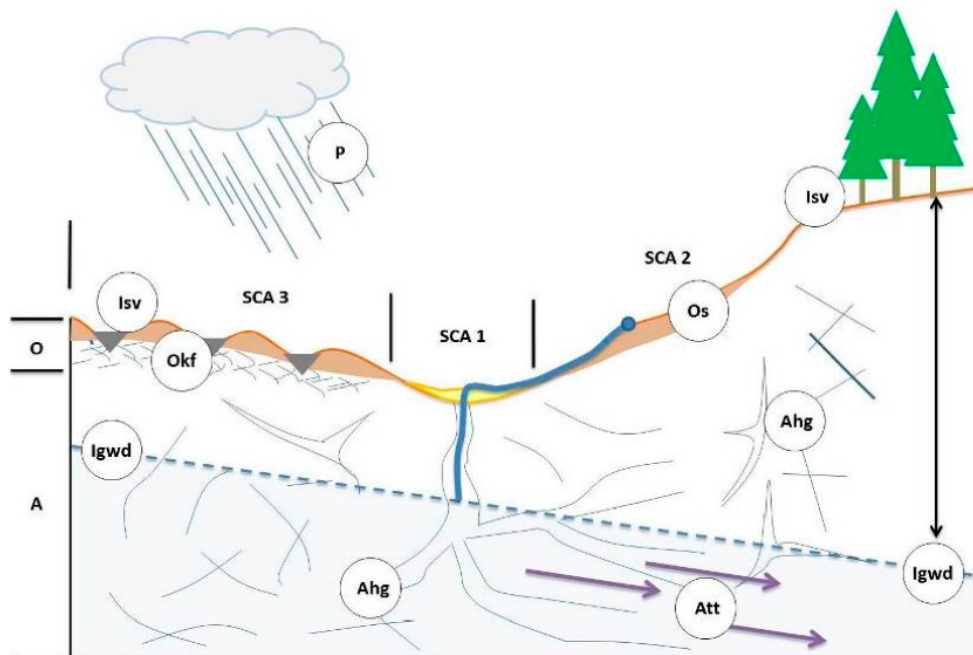
- Csa – mediteranska klima s vrućim ljetom
- Cfa – kontinentalna klima s vrućim ljetom
- Cfb – kontinentalna klima s toplim ljetom



### 3. OPIS KAVA METODE ZA PROCJENU RANJIVOSTI PODZEMNE VODE

#### 3.1. KAVA metoda

Karst Aquifer Vulnerability Assessment (KAVA) metoda zasniva se na konceptualnom modelu izvor – put – cilj, predložena u okviru projekta COST 620. KAVA metoda je prvenstveno osmišljena za procjenu prirodne ranjivosti, upotrebom GIS višeparametarske tehnologije izrađuje se prostorna analiza i karte ranjivosti. Metoda se zasniva na četiri osnovna faktora: O – faktor (pokrovne naslage), P – faktor (utjecaj oborina), I – faktor (uvjeti infiltracije) i A – faktor (uvjeti vodonosnika), njihov utjecaj na određeno područje vidljiv je na slici 6. (Biondić, et al., 2021.).



Slika 6. Utjecaj navedenih faktora na određeno područje (Biondić, et al., 2021.)

Uspoređujući KAVA metodu sa drugim pristupima i metodama iste namjene, KAVA metoda jednako tretira zasićene i nezasićene zone vodonosnika. Postoji više razloga za to, ali definitivno jedan od razloga je pojednostavljenje cjelokupnog modela. Zbog tih razloga, granica između nezasićenih i zasićenih zona u krškim vodonosnicima često se određuju empirijski ili približno.

### 3.2. O – faktor

O – faktor podrazumijeva funkciju zaštite pokrovnih naslaga u slivovima krškog područja. Zaštita pokrovnih naslaga u hidrogeološkom smislu varira od područja do područja zbog različitih karakteristika podzemnih zona u otvorenom kršu. Stoga, prilikom određivanja O – faktora koriste se dva osnovna skupa podataka, tj. podfaktori:  $O_s$  (tlo) i  $O_{kf}$  (karakteristike krša) (Biondić, et al., 2021.).

$O_s$  (tlo) po procjeni predstavlja zaštitu pokrovnog tla. Biološki aktivna zona koja dovodi do zadržavanja i djelomične razgradnje potencijalnih onečišćenja pri površini ili na površini. Zbog tog razloga, prema dostupnim pedološkim podacima potrebno je procijeniti zaštitu pokrovnog tla. Tekstura tla, raspodjela veličine čestica i debljina pokrovnog sloja su parametri koji se koriste za procjenu zaštite pokrovnog tla.

$O_s$  (tlo) predložen je izvorno kao sastavnica COP metode, u kojem je pokrovno tlo podijeljeno u dvije osnovne grupe: prema teksturi i rasporedu zrna (tablica 1). Razlog zbog kojeg su kategorije tla kod KAVA metode dodatno pojednostavljene je taj što su slivovi u području dinarskog krša većinom bez pokrovnih naslaga.

Tablica 1. Vrijednosti za podfaktor  $O_s$  (Biondić, et al., 2021.)

Vrsta tla	Dubina tla	$O_s$	Dubina tla	$O_s$	Dubina tla	$O_s$	Dubina tla	$O_s$
Glinovito	> 2 m	2	1-2 m	1,9	0,5-1 m	1,6	< 0,5 m	1,3
Glinovito-pjeskovito				1,8		1,5		1,2
Ilovasto				1,7		1,4		1,1
Golo	-	1						

$O_{kf}$  (karakteristike krša) definira utjecaj okršenih i jako propusnih površinskih i podzmenih zona krških vodonosnika na ukupnu prirodnu ranjivost krških slivova, odnosno utjecaj epikrških zona. Epikrške zone mogu varirati do nekoliko desetaka metara (debljina) te se pojedinačno procjenjuje jer se zbog svog načina nastanka i različitih procesa koji se u njoj odvijaju strukturno može razlikovat od ostatka krškog vodonosnika.

Problem s procjenom epikrških zona je to što su one nevidljive na površini pa se debljina i raspodjela mogu odrediti samo temeljitim geofizičkim ispitivanjima i detaljnim istražnim bušenjem. Za definiciju parametra  $O_{kf}$  u ovom slučaju korištena je analiza prostorne distribucije vrtača kao jednog od tipičnih površinskih pokazatelja okršavanja. U tablici 2 navedene su vrijednosti podfaktora  $O_{kf}$ , te bodovanje za svaku pojedinu vrijednost.

Tablica 2. Vrijednosti za podfaktor  $O_{kf}$

Gustoća vrtača po 1 km <sup>2</sup>	$O_{kf}$
5-25	0,2
25-50	0,4
50-75	0,6
75-100	0,8
>100	0,9

Vrijednost  $O$  – faktora dobiva se oduzimanjem  $O_{kf}$  od  $O_s$  po jednadžbi:

$$O \text{ score} = O_s - O_{kf}$$

Vrijednosti  $O$  – faktora kreću se u rasponu od 0,1 - 2. (tablica 3). Vrlo male vrijednosti (0,1 – 0,5) odgovaraju područjima gdje je tlo jako slabo razvijeno (ili ga nema) i područje gdje su prisutne vrtače. Male do srednje vrijednosti (0,5 - 1) odgovaraju područjima gdje je tlo razvijeno do dubine od 1 m i uz prisustvo brojnih vrtača, isto tako i područjima gdje je tlo nešto pliće i uz prisustvo manjeg broja vrtača na km<sup>2</sup>. Srednje do visoke vrijednosti (1 do 1,5) odgovaraju područjima gdje je tlo uglavnom razvijeno do dubine od 2 m i uz prisustvo manjeg broja vrtača. Vrlo visoke vrijednosti (preko 1,5) odgovaraju područjima



gdje je tlo razvijeno do dubine od 1 do 2 m i sa nekoliko vrtača te područja s vrlo dubokim tlima (veća od 2 m) i bez prisustva vrtača (Biondić, et al., 2021.).

Za prikaz utjecaja faktora O dobivene vrijednosti klasificiraju se u dane raspone i prikazuju odgovarajućom bojom, no u pripremi konačne karte prirodne ranjivosti dobivene KAVA metodom, moraju se koristiti neklasificirane vrijednosti O – faktora.

*Tablica 3. Vrijednosti, kategorija ranjivosti i legenda za izradu karte prema O faktoru*

O	Porast ranjivosti	Vrijednost	Boja
< 0,4	Vrlo visoka	1	crvena
0,4 – 0,8	Visoka	2	narančasta
0,8 – 1,2	Srednja	3	žuta
1,2 – 1,6	Niska	4	zelena
> 1,6	Vrlo niska	5	plava

### 3.3. P – faktor

Utjecaj padalina (P – faktor) je vanjski stres koji u cijelosti utječe na procjenu ranjivosti korištenjem KAVA metode. Za učinkovitu procjenu P – faktora potrebno je u obzir uzeti i količinu padalina, ali i intenzitet kojim padaline dopijevaju na površinu, jer se na taj način dobiva upravo onaj dio ukupne količine padalina koja ima realnu mogućnost infiltriranja s površine te procjeđivanja u dublje dijelove krškog vodonosnika.

Pomoću  $P_e$  izražavamo učinkovitost utjecaja padalina na ranjivost, tj. izražavamo efektivnost padalina. U procjeni  $P_e$  uzimaju se kritični čimbenici u obzir, kao što su intezitet i količina padalina koja uzrokuje brzu infiltraciju i procjeđivanje u dublje dijelove vodonosnika s mogućnosti transporta potencijalnog onečišćenja s površine.

Uzimajući u obzir raspodjelu ukupnih godišnjih padalina koja također utječu na ranjivost, koristi se  $P_i$  ili intezitet padalina za određivanje ukupnog P – faktora. Vrijednosti i kategorije po kojima se svaka pojedina vrijednost podfaktora ( $P_e$  i  $P_i$ ) budu je prikazane su u tablicama 4 i 5.

Tablica 4. Vrijednosti za podfaktor  $P_e$

Efektivne oborine	$P_e$
< 500 mm/god.	1,2
500-1.000	1,1
1.000-1.500	1
1.500-2.000	0,95
2.000-2.500	0,9
> 2.500 mm/god	0,85

Tablica 5. Vrijednosti za podfaktor  $P_i$

Intenzitet oborina	$P_i$
< 10 mm/dan	1,25
10-30	1
> 30 mm/dan	0,75

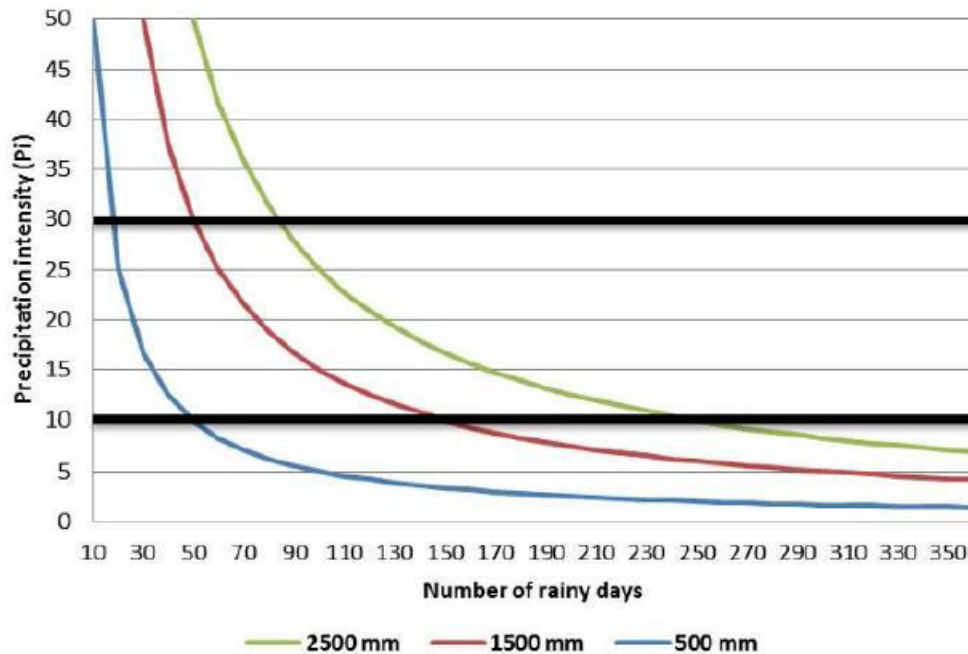
Iz vrijednosti  $P_e$  (efektivnost padalina) određuje se srednja efektivna količina padalina na slivu. Vrijednosti koje se kreću od 1000 – 1500 mm/god se uzimaju kao neutralne (neutralne u smislu da nema promjene prirodne ranjivosti), a ostale druge vrijednosti se mogu odraziti na promjenu ukupne prirodne ranjivosti. Izvještaji o efektivnim padalinama se dobivaju iz prethodnih istraživanja, klimatskih i oborinskih karata i slično, također i izračunom empirijskih formula koje u obzir uzimaju ukupni srednji iznos količine padalina, temperatura zraka i ostale parametre koji su mjerodavni za analizu efektivnosti padalina.

$P_i$  (intenzitet padalina) se određuje iz srednje vrijednosti godišnjih padalina i ukupnog broja kišnih dana na slivu, po slijedećoj jednadžbi:

$$P_i = \frac{P \left( \frac{\text{mm}}{\text{god}} \right)}{\text{broj kišnih dana}}$$

Manje kišnih dana na ukupnu količinu padalina izaziva veći intenzitet padalina, što za posljedicu ima povećanu prirodnu ranjivost. U nastavku, intenzivnije padaline pogoduju

koncentriranoj infiltraciji vode u krško podzemlje, tj. ispiranje nezasićene zone vodonosnika. S druge strane, više kišovitih dana uzrokuje manji intenzitet padalina i ravnomjerniju raspodjelu ukupnih padalina tijekom godine. To smanjuje prirodnu ranjivost vodonosnika zbog povećane (sporije) difuzne infiltracije u krško podzemlje. Za procjenu ukupnog utjecaja  $P_i$  podfaktora, koriste se tri kategorije intenziteta padalina, što je prikazano na slici 7 – tri vrijednosti za ukupne srednje godišnje količine padalina.



Slika 7. Dijagram osnovnih  $P_i$  kategorija (Biondić, et al., 2021.)

$P$  – faktor dobiva se množenjem podfaktora  $P_e$  i  $P_i$ , po slijedećoj jednadžbi:

$$P \text{ score} = P_e \cdot P_i$$

Moguće vrijednosti  $P$  – faktora kreću se od 0,6 – 1,5 (tablica 6). Kao i za prikaz  $O$  faktora, prostorna distribucija utjecaja padalina prikazuje se u ovisnosti od klasa, ali u izradi konačne karte prirodne ranjivosti pomoću KAVA metode, potrebno je koristiti neklasificirane vrijednosti  $P$  – faktora.

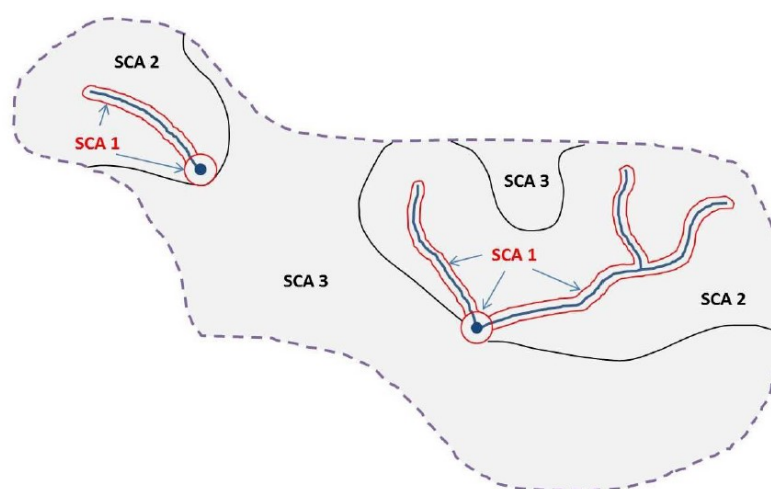
Tablica 6. Vrijednosti, kategorija ranjivosti i legenda za izradu karte prema P faktoru

P	Porast ranjivosti	Kategorija	Boja
< 0,8	Vrlo visok	1	Crvena
0,8-1	Visok	2	Narančasta
1-1,2	Srednji	3	Žuta
1,2-1,4	Nizak	4	Zelena
> 1,4	Vrlo nizak	5	Plava

### 3.4. Površinski slivovi (*Surface Catchment Areas – SCA*)

Parametri za površinske slivove (SCA) dobivaju se prostornom analizom hidroloških pojava na površini pojedinih krških slivova. Osnova cjelokupne analize je odvajanje glavnih površinskih slivova za ponorne zone i ponornice koje gravitiraju prema njima.

Nakon analize, krški slivovi se prema površini mogu podijeliti u tri glavne kategorije, kao što je prikazano na slici 8. Detaljnije prostorne analize procjenjuju uvjete difuzne ili koncentrirane infiltracije površinskih voda u podzemlje (SCA 2, SCA 3), pa se na karti ranjivosti naglašavaju područja najznačajnije ranjivosti (SCA 1), što uključuje ponore, zone ponora i tijela površinskih voda koja na njih utječu, tj. moguće je njihov koncentrirani prolazak kroz te zone do vodnog lica. Detaljne definicije za svako pojedino navedeno područje prikazano je u tablici 7.



Slika 8. Određivanje područja sliva - shematski prikaz (Biondić, et al., 2021.)

Tablica 7. Kategorije i definicije pojedinih područja

SCA	OPIS
SCA 1	Područje 1: ponori s okolnim područjem, ovisno o mjerilu karte (Mjerilo 1:25.000=125m; Mjerilo 1: 50.000= 250 m; Mjerilo 1: 100.000= 500 m) kao i vodotoci koji se infiltriraju u ponore, uključujući 50 m područja s obje strane vodotoka
SCA 2	Područje 2: izravno površinsko područje ponora i površinskih tokova koji otječu prema ponorima
SCA 3	Područje 3: Ostatak slivnog područja koji nije direktno povezan sa ponorima, ponornim zonama ili vodotocima koji se infiltriraju u ponore

SCA vrijednost (delineacija površinskih slivova) je neovisna o drugim faktorima, ali o njoj ovise vrijednosti koje se dodjeljuju I faktoru u kombinaciji nagiba terena i vegetacije. U konačnom bodovanju prirodne ranjivosti, samo SCA 1 područje predstavlja zonu najveće ranjivosti čija vrijednosti konstantno iznosi 0.1 i ne mijenja se u odnosu na nagib i vegetaciju.

### 3.5. I – faktor

Procijenjeni stupanj infiltracije površinskih voda ovisi o većem broju parametara koji nadziru procese površinskog i podzemnog otjecanja. Jedni od najvažnijih parametara su: prisutnost vegetacija, nagib terena, svojstva naslaga i prisutnost morfoloških oblika koji uzrokuju lokalnu infiltracijsku anomaliju (ponori, vrtače, špilje, itd.)

Uzmemo li u obzir da su pojedini spomenuti parametri već korišteni u analizi O – faktora (svojstva naslaga i krških geomorfoloških oblika), I – faktor ovisi o dva međusobno povezana sloja:  $I_{sv}$  (nagib i vegetacija) i  $I_{gwd}$  (dubina do podzemne vode).

$I_{sv}$  određuje uvjete na površini tla koji utječu na infiltraciju površinskih voda, gdje dominira otjecanje (površinsko i podzemno) prema vodotocima, vrijednost ovog podfaktora osigurava se kombiniranjem nagiba i vegetacijskog pokrova na infiltraciju (veća ranjivost = veći nagib ili osiromašena vegetacija). Parametar vegetacije ( $v$ ) se koristi za određivanje površine koje mogu biti ili gusto ili rijetko prekrivene vegetacijom. Površine koje su prekrivene gustom vegetacijom uključuju dijelove slivne površine koje su prekrivene šumom, grmolikom šumom i grmljem, dok ostali dio slivne površine obuhvaća područja obrasla rijetkom vegetacijom, isto tako i one površine gdje nema

vegetacijskog pokrova. Sve spomenute informacije se mogu dobiti prostornom analizom na karti korištenja zemljišta ili na karti Corine Land Cover (CLC). Parametar nagiba (s) se može dobiti metodom prostorne analize pomoću digitalnog modela terena. Nakon provedene analize, dobivene vrijednosti klasificiramo u jednu od četiri kategorije nagiba koje su predložene tablicom 8.

Tablica 8. Vrijednosti za podfaktor  $I_{sv}$

NAGIB (s)	Vegetacija (v)
<8°	Svi tipovi vegetacije
8-31°	Gusta ili rijetka vegetacija
31-76°	Gusta ili rijetka vegetacija
>76°	Svi tipovi vegetacije

Kategorije nagiba i klasifikacija vegetacije razvijene su korištenjem dvije kategorije preuzete iz COP. COP metoda je najidealnija metoda za slivove u dinarskom području, s obzirom na infiltraciju površinskih voda.

$I_{sv}$  je direktno uvjetovan i hidrološkim uvjetima na površini sliva, ali prije procjene utjecaja na ranjivost,  $I_{sv}$  je potrebno uskladiti sa SCA.

Prilikom procjene  $I_{sv}$  za SCA 2 područje, pretpostavljeni su uvjeti koncentrirane infiltracije vode u krško podzemlje, zato što kod SCA 2 područja dominira površinsko otjecanje te otjecanje površinskih voda prema vodotocima i ponorima. U tim uvjetima, kombinacijom nagiba terena i vegetacije dobije se vrijednost  $I_{sv}$ . U tom području vrijednost  $I_{sv}$  ukazuje na veću ranjivost kada su veći nagibi terena i osiromašena vegetacija. Takvo stanje u realnim uvjetima znači brža infiltracija vode u krško podzemlje i kraće vrijeme transporta (tablica 9).

Procjenom  $I_{sv}$  za SCA 3, pretpostavljeni su uvjeti difuzne infiltracije vode u krško podzemlje, zato što u tom području dominira duže vrijeme zadržavanja vode na površini sliva. Obrnuto je od slučaja SCA 2. Stoga, vrijednosti  $I_{sv}$  ukazuju na veću ranjivosti kod manjih nagiba terena i osiromašene vegetacije.

Tablica 9. Vrijednosti za podfaktor  $I_{sv}$  na osnovu svakog SCV-a

NAGIB I VEGETACIJA ( $I_{sv}$ )	Područje 2	Područje 3
<8°	1	0,75
8-31° gusta/ rijetka vegetacija	0,95 – 0,9	0,8 – 0,85
31-76° gusta/rijetka vegetacija	0,85 – 0,8	0,9 – 0,95
>76°	0,75	1

\*Područje SCA 1 predstavlja zonu najveće ranjivosti čija vrijednost konstantno iznosi 0,1

$I_{gwd}$  definira utjecaj, odnosno definira važnost infiltrirane površinske vode na ukupnu prirodnu ranjivost određenog vodonosnika, gdje vrijednosti podfaktora –  $I_{gwd}$  nisu specificirane samo za nezasićenu zonu vodonosnika, nego za cijeli vodonosnik. Bez obzira na to da je ovaj podfaktor teško odrediti, nije zanemariv. Što je dublji nivo podzemne vode to znači da će utjecaj infiltracije biti manji, zato jer je potrebno duže vremena da se potencijalno onečišćenje transportira u zasićenu zonu krškog vodonosnika.

Za što bolju procjenu vrijednosti  $I_{gwd}$  potrebna je dobra mreža piezometarskih bušotina na cijelom slivnom području. S tim podacima i kvalitetnom prostornom analizom moguće je odrediti položaj podzemne vode u krškom vodonosniku i prema tome izraditi kartu dubine podzemne vode (GWDM).

Zbog nedostatka takvih podataka u krškom području, teško je izraditi točnu kartu dubine do podzemne vode. No, u ovom slučaju moguće je procijeniti podfaktor –  $I_{gwd}$  na temelju poznavanja hidrogeoloških odnosa sliva. Za dobivanje konačne GWDM, potrebno je od digitalnog modela terena oduzeti kartu apsolutne razine podzemne vode, i rezultat dobivene razlike daje debljinu nezasićene zone vodonosnika. Konačna karta dubine podzemne vode (GWDM) se dobije prostornom analizom podataka bušotina ili procjenom što čini osnovu za bodovanje podfaktora –  $I_{gwd}$  (tablica 10).

Tablica 10. Vrijednosti za podfaktor  $I_{gwd}$

DUBINA DO PODZEMNE VODE	$I_{gwd}$
< 10 m	0,1
10 – 50	0,2
50 – 100	0,4
100 – 200	0,6
200 – 400	0,8
>400 m	1

Vrijednosti I – faktora se dobije zbrajanjem  $I_{sv}$  i  $I_{gwd}$  po formuli:

$$I \text{ score} = I_{sv} + I_{gwd}$$

Moguće vrijednosti su u rasponu od 1,5 do 2, što znači da ovaj faktor smanjuje prirodnu ranjivosti krških vodonosnika, no jedino je pitanje koliko (tablica 11). Za pripremu konačne karte prirodne ranjivosti pomoću KAVA metode, koriste se neklasificirane vrijednosti I – faktora.

Tablica 11. Vrijednosti, kategorija ranjivosti i legenda za izradu karte prema I faktoru

I	Porast ranjivosti	Kategorija	Boja
1,5-1,6	Vrlo visok	1	Crvena
1,6-1,7	Visok	2	Narančasta
1,7-1,8	Srednji	3	Žuta
1,8-1,9	Nizak	4	Zelena
1,9-2	Vrlo nizak	5	Plava



### 3.6. A – faktor

Uvjeti vodonosnika u krškom području vrlo su važni za procjenu prirodne ranjivosti, A – faktor kao parametar koristi dvije vrste podataka:  $A_{hg}$  za procjenu statičkih uvjeta u vodonosniku (hidrogeološki opis) i  $A_{tt}$  za procjenu dinamičkih uvjeta (rezultati provedenih trasiranja).

Pri određivanju  $A_{hg}$  – podfaktora (hidrogeološki opis), procjena statičkih uvjeta u krškom vodonosniku odvija se na temelju dostupnih podataka: hidrogeološki, litološki i geološki podaci, ali osnovni je kriterij određivanje litološkog sastava stijena i stupnja okršenosti. Ostale informacije koje mogu pomoći u procjeni ovog podfaktora su geomorfološke analize, rezultati speleoloških istraživanja, pokusna crpljenja, geofizička istraživanja i hidrogeokemijske analize radi preciznijeg određivanja svojstva stijena (tablica 12).

Tablica 12. Vrijednosti za podfaktor  $A_{hg}$

Hidrogeološki opis i opis lomljenja	$A_{hg}$
Nema vodonosnika	1
Slabo vodopropusne intergranularne naslage	0,7
Srednje vodopropusne intergranularne naslage	0,4
Slabo vodopropusne okršene stijene	0,5
Umjereno vodopropusne okršene stijene	0,3
Dobro vodopropusne okršene stijene	0,2

Pri određivanju  $A_{tt}$  – podfaktora (trasiranje), procjena dinamičkih uvjeta temelji se na rezultatima trasiranja tokova u promatranom krškom slivnom području. Trasiranja se moraju izvesti tijekom kišne sezone kada su brzine tokova podzemnih voda najveće. Podaci trasiranja mogu se dobiti diskretnom analizom prividne vremenske vrijednosti (od mjesta ubacivanja trasera do mjesta pojavljivanja trasera).

Obradom rezultata trasiranja, moguće je dobiti prividnu vremensku vrijednost svakog pojedinog trasiranja iz vrijednosti prividne brzine toka podzemne vode i udaljenosti od točke ubacivanja trasera do mjesta njegovog pojavljivanja. Prostornom analizom

diskretnih podataka i korištenjem odgovarajućih interpolacijskih metoda, pomoću GIS-a može se dobiti kontinuirana prostorna raspodjela vrijednosti trasiranja koja je bitna za područje istraživanja. Pouzdaniju kvalitetu prostorne interpolacije rezultata trasiranja dobivamo većom prostornom raspodjelom i ujednačenijim vrijednostima trasiranja.

Bodovanje i rasponi vrijednosti za podfaktor  $A_{tt}$  prilagođeni su prema ukupnoj metodi (tablica 13). Niže vrijednosti ukazuju da je određeni sliv bolje povezan s izvorom ili izvorišnim područjem, što povećava ukupnu ranjivosti tog područja u odnosu na druge dijelove sliva.

Tablica 13. Vrijednosti za podfaktor  $A_{tt}$

Rezultati trasiranja	$A_{tt}$
0 dan	0
▲	▲
▼	▼
> 25 dana	1

Prilikom procjene podfaktora  $A_{hg}$  i  $A_{tt}$  potrebno je uzeti u obzir pretpostavku da su te vrijednosti u relativnom kratkom vremenskom razdoblju nepromjenjive te da njihova moguća promjenjivost ne utječe značajno na procjenu ukupne prirodne ranjivosti određenog krškog sustava. Vrlo važno je napomenuti da su krški vodonosnici vrlo dinamični hidrogeološki sustavi, kao što je krško područje Dinarida u Hrvatskoj. Određeni dijelovi krških vodonosnika mogu mijenjati hidrogeološku funkciju – i prostorno i vremenski. Kako bi se model pojednostavio, ove promjene treba uzeti u obzir samo kada postoji valjan razlog ili točna i precizna spoznaja. U tom slučaju potrebno je oba podfaktora ponovno bodovati, isto tako i ponovno procijeniti utjecaj na ranjivost krškog sustava.

Ukupna vrijednost A - faktora dobije se zbrajanjem dvaju podfaktora:  $A_{hg}$  i  $A_{tt}$ , jer se utjecaji međusobno nadopunjuju slijedećom jednačbom:

$$A \text{ score} = A_{hg} + A_{tt}$$

Vrijednosti se kreću u rasponu od 0 do 2 (tablica 14). Manje vrijednosti predstavljaju veću ranjivost zbog veće okršenosti i bolje vodopropusnosti stijena, kao i rezultatima trasiranja koji pokazuju bolju povezanost s izvorom. Veće vrijednosti parametra A ukazuju na dijelove sliva koji nisu izravno povezani s izvorištem ili dijelove sliva čija je vodopropusnost ograničena. Uglavnom su to mjesta izgrađena od nekarbonatnih stijena.

Dobivene vrijednosti moguće je dodatno klasificirati za izradu A karte koja predstavlja prostorni prikaz uvjeta u vodonosniku i njihov utjecaj na ukupnu ranjivost krškog sustava. Kod izrade karte prirodne ranjivosti KAVA metodom koriste se neklasificirane vrijednosti.

*Tablica 14. Vrijednosti, kategorija ranjivosti i legenda za izradu karte prema A faktoru*

A	Porast ranjivosti	Kategorija	Boja
< 0,4	Vrlo visok	1	Crvena
0,4 - 0,8	Visok	2	Narančasta
0,8 - 1,2	Srednji	3	Žuta
1,2 - 1,6	Nizak	4	Zelena
> 1,6	Vrlo nizak	5	Plava

### 3.7. Indeksi ranjivosti

Dva indeksa ranjivosti moguće je dobiti preko ukupnog rezultata analize ranjivosti. SV indeks, odnosno indeks ranjivosti izvora koji daje procjenu prirodne ranjivosti krških izvora, ili pak RV indeks, odnosno indeks ranjivosti resursa koji daje procjenu prirodne ranjivosti čitavog vodonosnika. A – Faktor je presudan za izračun oba indeksa. Točnije, pri procjeni prirodne ranjivosti krških izvora (ranjivost izvora) koriste se vrijednosti ukupnog A – faktora koji se odnose na promatrano područje izvorišta, uzimajući u obzir dinamičke i statičke uvjete u vodonosniku. Naime, A – faktor se dijeli na  $A_{hg}$  i  $A_{tt}$ , a ako se uzme u obzir samo podfaktora  $A_{hg}$ , može se dobiti procjena prirodne ranjivosti krškog vodonosnika (ranjivost resursa) jer u ovom slučaju A – faktor uzima u obzir samo statičke uvjete u krškom vodonosniku.

$$SVI \text{ score} = (O \text{ score} + I \text{ score} + A \text{ score}) \cdot P \text{ score}$$

$$RVI \text{ score} = (O \text{ score} + I \text{ score} + Ahg \text{ score}) \cdot P \text{ score}$$

Indeksi se izračunavaju tako da se rezultati izračuna za svaki pojedini faktor (O, I, A) zbrajaju, zatim se pomnože s rezultatom P - faktora koji predstavlja vanjski stres u KAVA metodi. Nakon toga potrebno je izdvojiti najranjivije dijelove u slivnom području (ponore, površinske tokove, vrtače) dodjeljivanjem području SCA 1 vrijednost od 0,1 boda. Vrijednosti SV indeksa kreću se između 0,25 i 10,5, odnosno vrijednosti RV indeksa se kreću u rasponu od 0,25 do 7,5. Vrijednosti, indeks i klase za svaki pojedini indeks su prikazane u tablicama 15 i 16.

Tablica 15. RVI - Procjena ranjivosti vodonosnika

RVI bodovi	RV indeks	Klase ranjivosti
0,1 – 2,5	1	Ekstremno
2,5–3	2	Vrlo visoko
3–3,5	3	Visoko
3,5–4	4	Srednje
4–4,5	5	Nisko
4,5 – 7,5	6	Vrlo nisko

Tablica 16. SVI - Procjena ranjivosti izvora

SVI bodovi	SV indeks	Klase ranjivosti
0,1-3	1	Ekstremno
3–3,5	2	Vrlo visoko
3,5 – 4,5	3	Visoko
4,5 – 5,5	4	Srednje
5,5 -6,5	5	Nisko
6,5-9	6	Vrlo nisko

Za dobivanje konačne karte prirodne ranjivosti dobivene vrijednosti za oba dva indeksa razvrstane su u šest kategorija ranjivosti prema tablici 17. Prostorna raspodjela SV

indeksa prikazuje se u obliku karte ranjivosti izvora, a prostorna raspodjela RV indeksa u obliku karte ranjivosti vodonosnika.

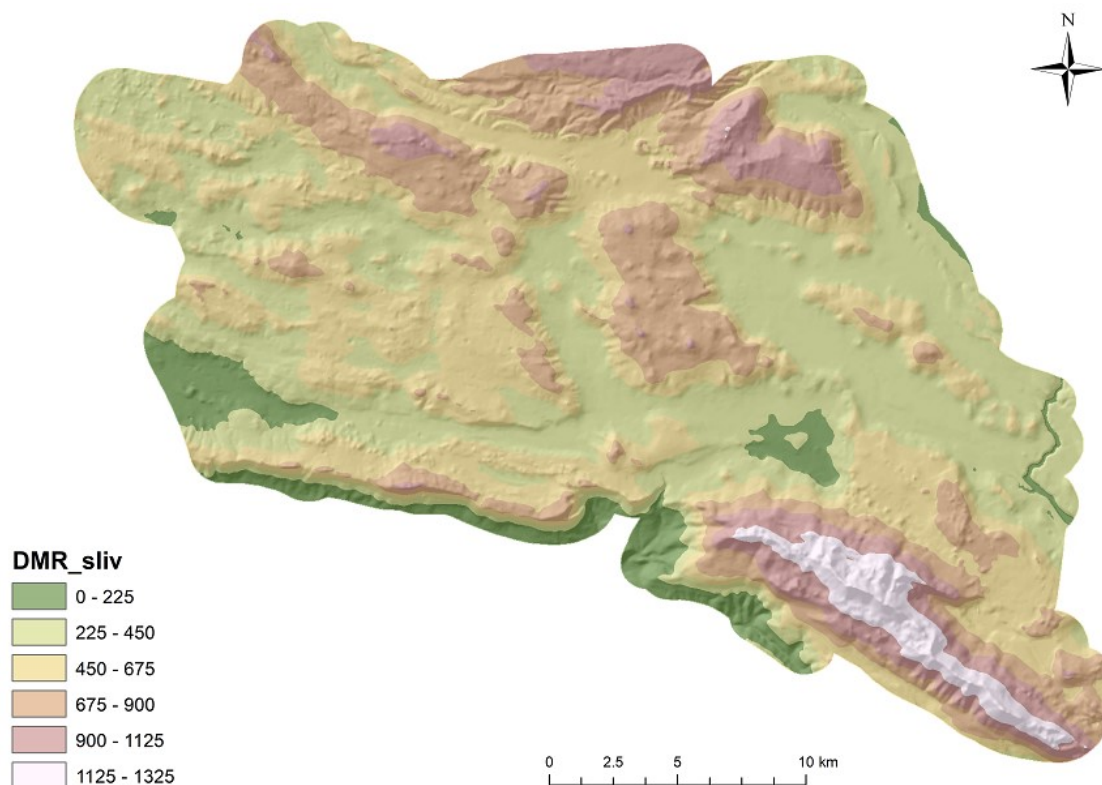
*Tablica 17. Indeksi, kategorija ranjivosti i legenda za izradu karte prema SV i RV*

<b>SV indeks</b>	<b>RV indeks</b>	<b>Klase ranjivosti</b>	<b>Boje</b>
1	1	Ekstremna	Crvena
2	2	Vrlo visoka	Narančasta
3	3	Visoka	Žuta
4	4	Srednja	Svijetlo zelena
5	5	Niska	Tamno zelena
6	6	Vrlo niska	Plava

## 4. ANALIZA RANJIVOSTI PODZEMNIH VODA U SLIVU JADRA I ŽRNOVNICE

### 4.1. Procjena ranjivosti – priprema podataka

Prvi korak svake analize prirodne ranjivosti je prikupljanje podata iz različitih izvora te priprema podataka u formi da budu korišteni u analizi na način da pojedine informacije o slivu posluže za definiciju pojedinih faktora. Tako je za ovu analizu ranjivosti korištena topografska karta u mjerilu 1:25 000, listovi koji prostorno prekrivaju područje sliva. Topografska karta općenito služi za digitalizaciju pojedinih objekata karte, u ovom slučaju je poslužila za digitalizaciju kota, hidrografske mreže, vrtača, ponora i drugih elemenata koji su neophodni za provođenje analize prirodne ranjivosti slivnog područja. Digitalizacijom svi elementi su pohranjeni u vektorskom formatu pomoću kojeg se prostornim analizama dobiva DMR (digitalni model reljefa), karta nagiba terena i karta prostorne distribucije vrtača. Cjelokupna analiza provodi se u GIS softveru, točnije ArcGIS programskom paketu. *TopoToRaster* metodom interpolacije, unutar ArcGIS softvera iz digitaliziranih elemenata izrađen je najprije DMR u rezoluciji 25 m (slika 9).



Slika 9. DMR za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice

Nakon toga je iz DMR-a dobivena karta nagiba terena (u rezoluciji 25 metara), raspona vrijednosti od 0 – 53,18%. Reklasifikacijom dobivenog „grida“, prema KAVA metodi dobivene su tri klase: nagib do 8°, nagib od 8° - 31° te nagib veći od 31°.

Promatrano područje vrlo je bogato vrtačama (izdigitalizirano je preko 8700 pojedinačnih vrtača). Vrtače su vrlo bitan čimbenik jer pokazuju stupanj okršenosti nekog područja, ranjivosti pojedinih dijelova terena te mogućnosti postojanja epikrških zona. Vrtače su neophodne za određivanje podfaktora  $O_{kf}$ , odnosno određivanje karakteristika krša.

Tlo i vegetacijski pokrov također imaju važnu ulogu kod procjene ranjivosti. Za tlo su podaci uzeti iz Hidropedološke karte (mjerilo 1:300 000) (Vidaček, et al., 2004). U slivnom području Jadra i Žrnovnice identificirano je 3 različite teksture tala (skeletno, ilovača i glina), te je za svaku vrstu poznata tekstura tla, dominantna dubina tla i hidropedološke jedinice.

Vegetacijski pokrov je bitan čimbenik kod određivanja uvjeta infiltracije. Pod vegetacijski pokrov spadaju šume, travnjaci, pašnjaci itd. Što je područje bogatije vegetacijom veća je infiltracija, no kod područja koja su osiromašena vegetacijskim pokrovom veća su površinska otjecanja. Podaci o vegetacijskom pokrovu koji su potrebni za analizu prirodne ranjivosti preuzeti su iz „Corine LandCovera 2012“ (Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, 2012). Karta koja prikazuje vegetacijski pokrov sadrži 15 različitih klasa koje su raspoređene u dvije kategorije – rijetka i gusta vegetacija te su im dodane odgovarajuće vrijednosti sukladno prema KAVA metodi.

Iz Klimatskog atlasa Hrvatske (Zaninović, et al., 2008) preuzeti su podaci o srednjim godišnjim oborinama za područje Jadra i Žrnovnice, a sa stranica DHMZ-a su preuzeti podaci o broju kišnih dana za područje izvora Jadra i Žrnovnice. Kombinacijom karte srednjih godišnjih oborina i podacima o broju kišnih dana dobivaju se vrijednosti za utjecaj oborina.

Prilikom procjene ranjivosti vodonosnika često je potrebno odrediti razinu podzemnih voda, zato jer razina određuje debljinu nezasićene zone. Budući da je određivanje točne razine podzemnih voda u krškom području vrlo komplicirano, dubina podzemnih voda se u većini slučajeva može samo procijeniti, zbog vrlo malo podataka o mjerenjima, nepredvidivosti tokova itd. U pojedinim dijelovima sliva procjena se temelji na debljini određenih litoloških jedinica, dok se kod drugih dubina do podzemne vode procjena temelji na interpolaciji podataka iz istražnih bušotina na slivu u kojima je izmjerena razina

podzemne vode. Pomoću DMR-a dobivena je karta razine podzemnih voda s apsolutnim koordinatama, a pomoću naredbe „*Raster calculator*“ u ArcGIS-u dobivena je razlika koordinata dobivenih DMR-om i razine podzemne vode. Na taj način je dobivena debljina nezasićene zone.

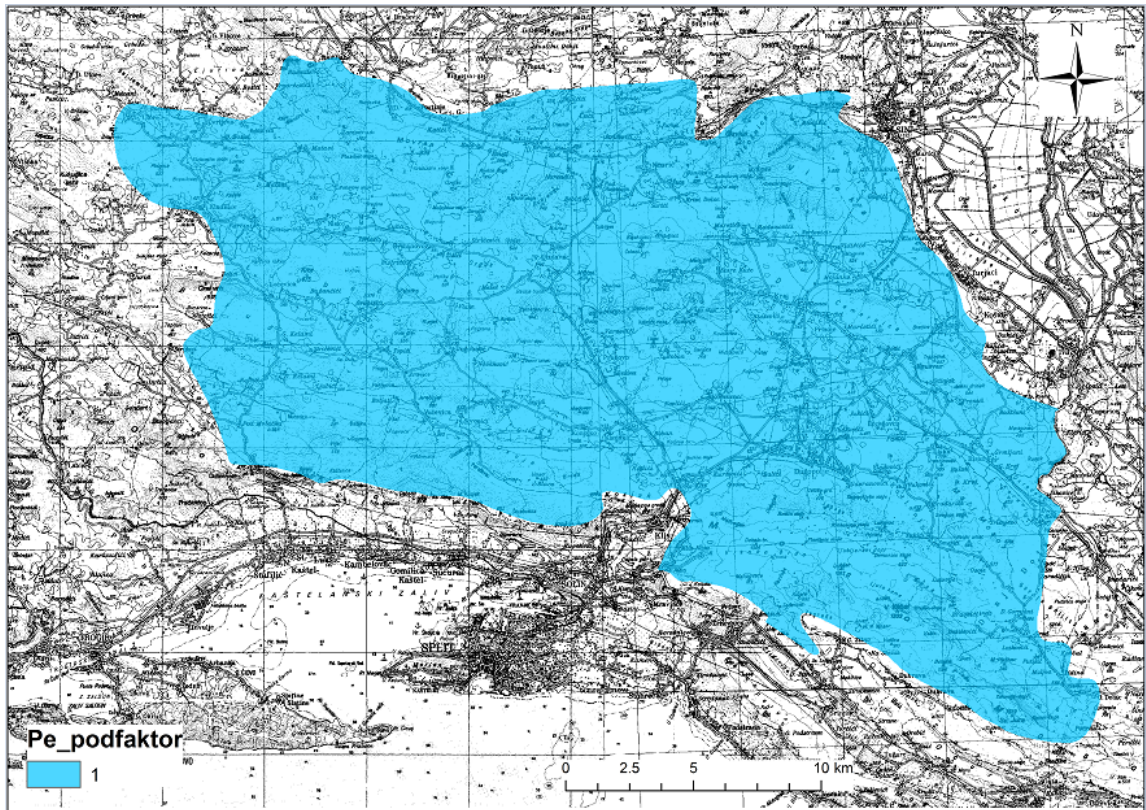
## **4.2. Određivanje parametara ranjivosti**

Prema KAVA metodi, svaki od parametara potrebnih za analizu prirodne ranjivosti zasebno je obrađeni. Postupak njihovog određivanja u ovoj konkretnoj analizi prikazan je u nastavku.

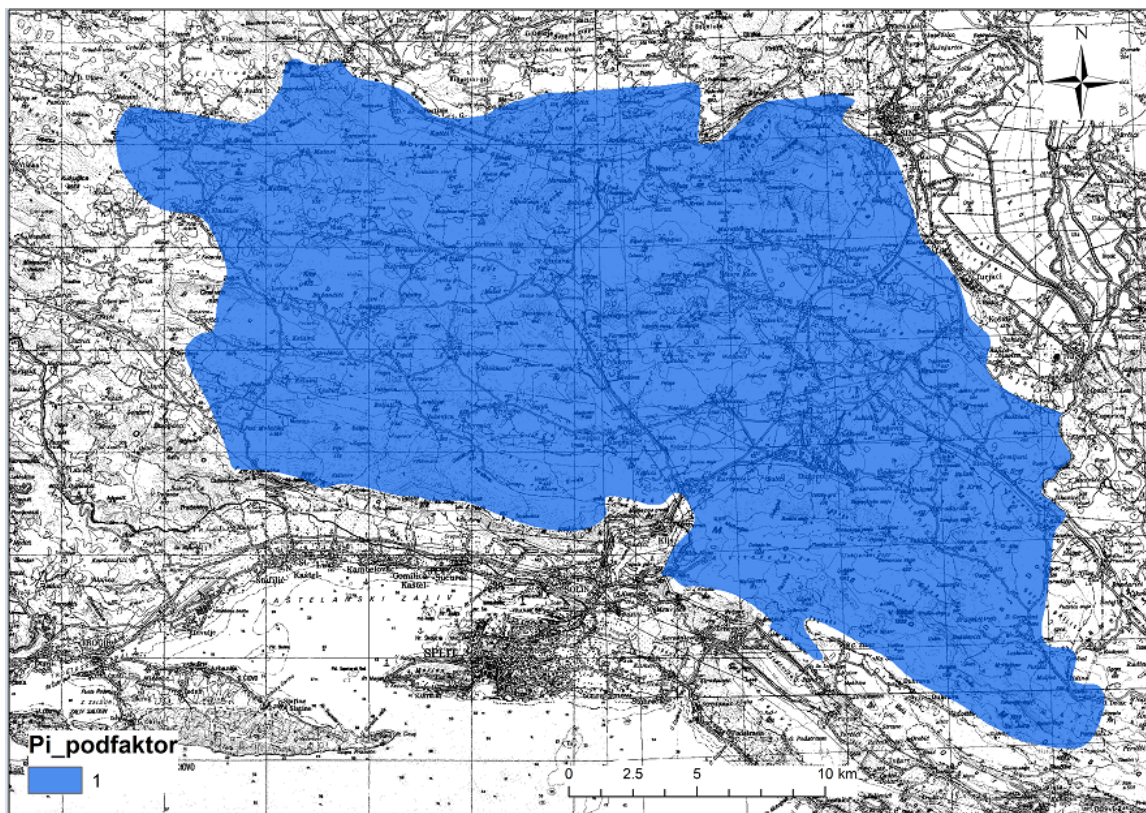
### **4.2.1. P – faktor**

Za procjenu P – faktora, korišteni su  $P_e$  (efek. količina oborina) i  $P_i$  (intenzitet oborina). Prije samog određivanja  $P_e$  potrebno je dobiti količinu oborina godišnje (mm/god), te prema uputama (tablici 4) pogledati raspon vrijednosti i odrediti vrijednost  $P_e$  podfaktora. Za određivanje podfaktora  $P_i$  potreban nam je broj kišnih dana, što u ovom slučaju za slivno područje Jadra i Žrnovnice iznosi 112 (preuzeto sa mrežne stranice DHMZ-a). Broj kišnih dana potreban je za izračun intenziteta, koji se dobije kada godišnju količinu oborina matematički podijelimo sa brojem kišnih dana (112) te prema uputama (tablici 5) podesiti raspon vrijednosti i odrediti  $P_i$  podfaktor. U slivu Jadra i Žrnovnice podfaktori  $P_e$  i  $P_i$  su za cijelo područje jednaki, iznos im je 1 (slike 10 i 11),





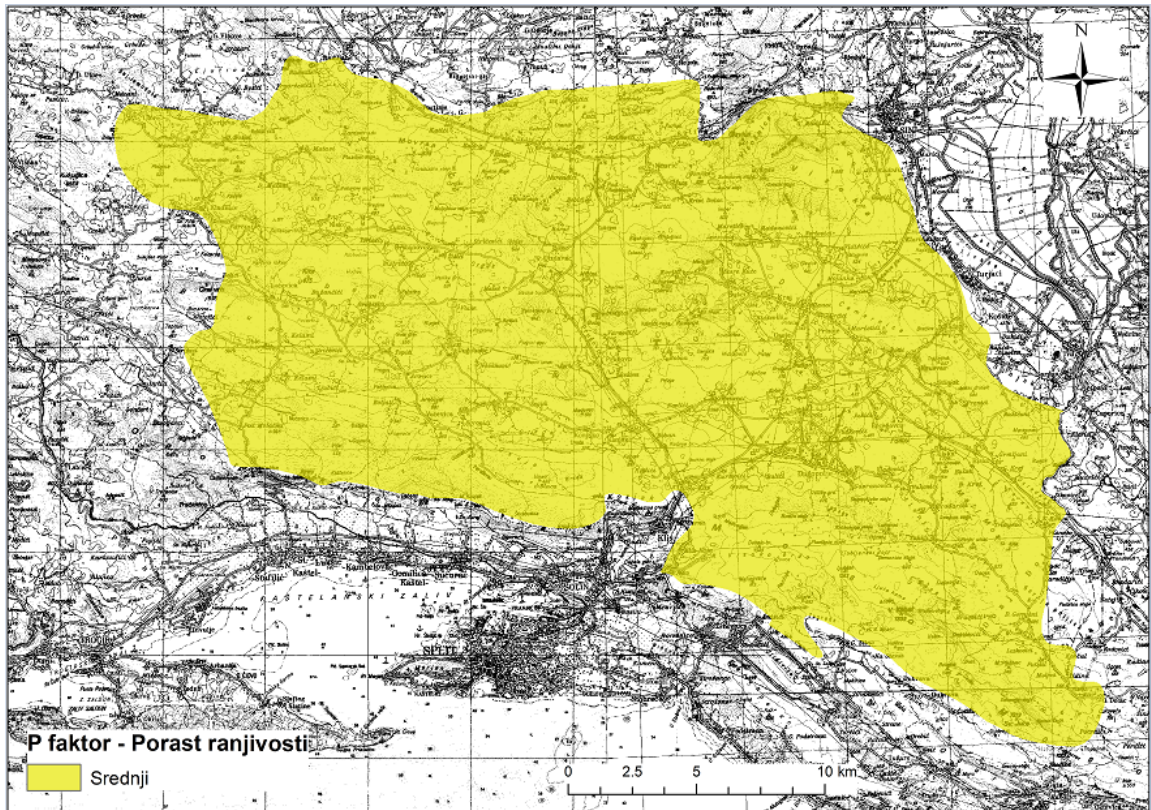
*Slika 10. Podfaktor Pe za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice*



*Slika 11. Podfaktor Pi za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice*



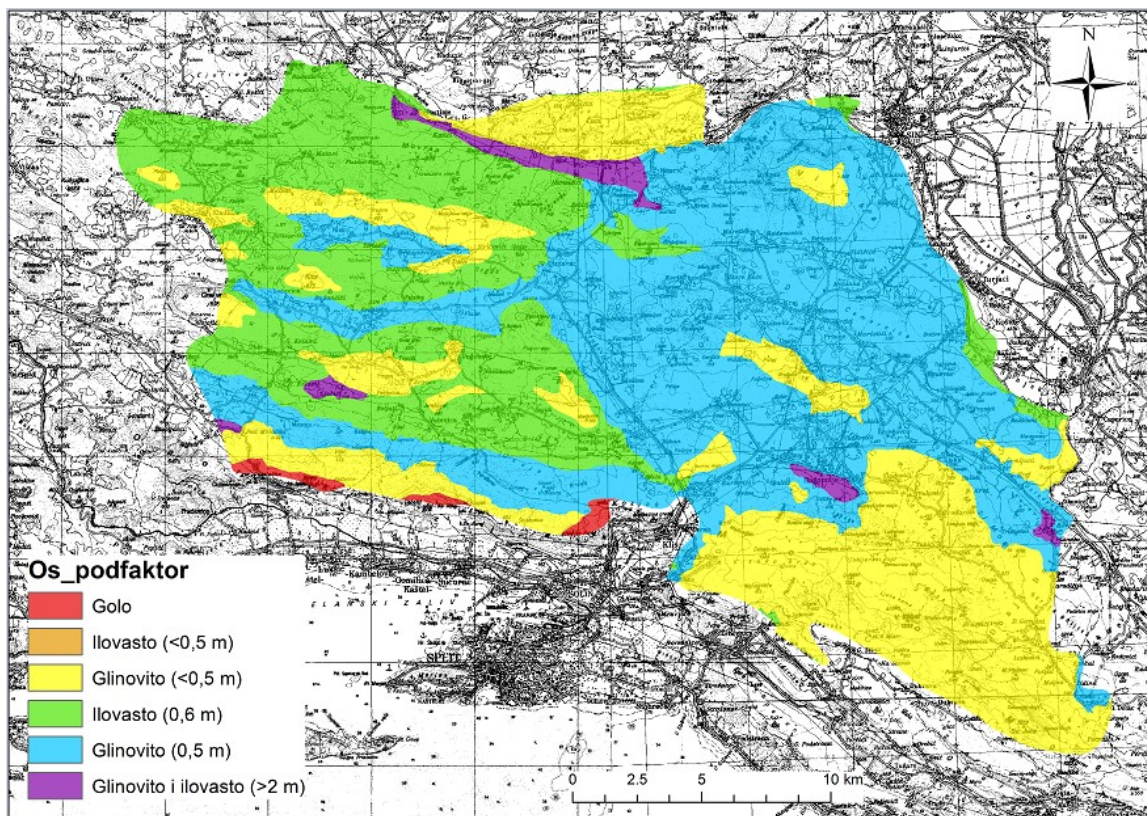
P – faktor, odnosno utjecaj oborina, dobiva se matematičkom operacijom množenja  $P_e$  i  $P_i$  podfaktora u ArcGIS-u. Preciznije, korištenje naredbe „Times“ u pod-izborniku „Math“ *Spatial Analyst* ekstenzije u *ArcToolboxu*. Vrijednosti se kreću unutar jedne klase, to je klasa 1 – 1,2 i opisuje ju srednja porast ranjivosti, točnije vrijednost P – faktora je 1. Prema slici 12 zahvaća cijelo područje jednako.



Slika 12. Faktor P za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice

#### 4.2.2. O – faktor

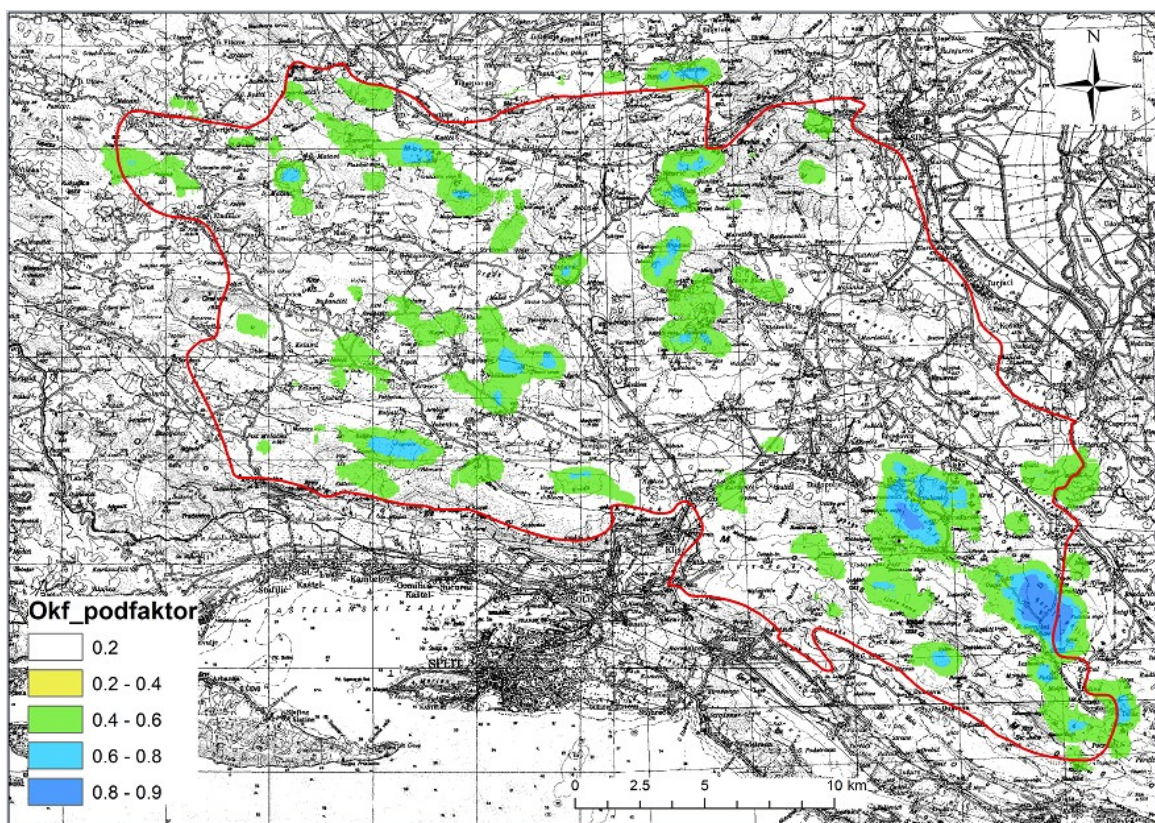
Za procjenu O – faktora, potrebno je koristiti podfaktore  $O_s$  (tlo) i  $O_{kf}$  (karakteristike krša). Prije samog određivanja podfaktora  $O_s$  potrebno je preuzeti podatke iz Hidropedološke karte koja nam daje informaciju o tlu (vrsti) i dominantnoj dubini tla. Prema uputama, raspisati vrijednosti za svaku pojedinu vrstu tla i dominantnoj dubini te iz toga dobiti podfaktor  $O_s$  u 7 različitih klasa prema dubini. Crvenom bojom označena područje slabo razvijenog tla, a razvijeno tlo označeno je tamo-plavom bojom na karti (slika 13) .



Slika 13. Podfaktor Os za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice

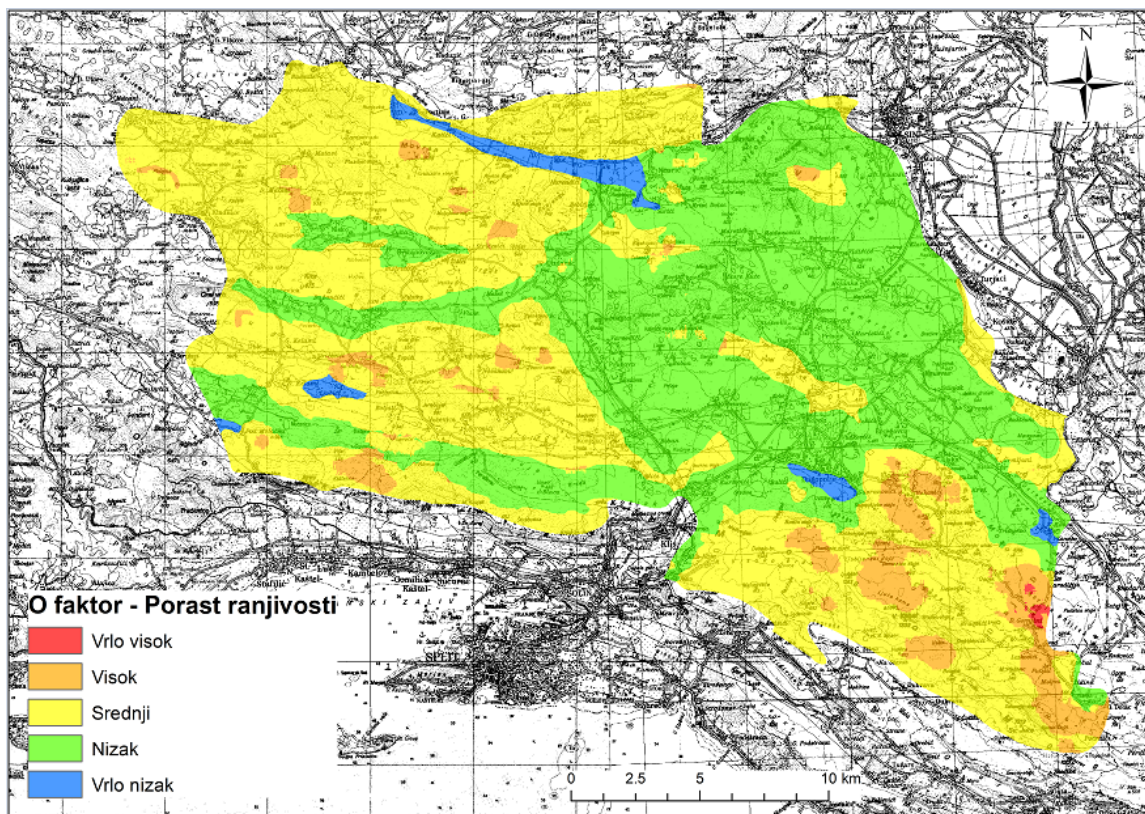
Za određivanje podfaktora  $O_{kf}$  koji predstavlja karakteristike krša, najprije je potrebno izdigitalizirati vrtače na topografskoj karti (u mjerilu 1:25 000). Naredbom „Point Density“ iz pod-izbornika „Density“ u ArcGIS-u treba izračunati gustoću vrtača po 1 km<sup>2</sup>. Dobivenu gustoću zatim treba podijeliti u 5 klasa (prema uputama u tablici 2). Područje istraživanja bogato je vrtačama, što je već istaknuto po broju pojedinačnih vrtača izdvojenih na slivu, ali one su grupirane tako da ukazuju na jače okršene dijelove sliva. Tako su na karti zelenom bojom označena područja gdje su vrtače rjeđe raspoređene (gustoća 25-50 vrtača po 1 km<sup>2</sup>), svijetloplava boja označava gustoću 50-75 vrtača po 1 km<sup>2</sup>, dok tamno-plava boja pokazuje najgušći raspored vrtača (75 – 100 vrtača po 1 km<sup>2</sup>) (slika 14). U skladu s tim dodijeljene su i vrijednosti pod-faktora  $O_{kf}$ .





Slika 14. Podfaktor Okf za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice

O – faktor, odnosno pokrovne naslage, dobiva se matematičkom operacijom oduzimanja podfaktora  $O_s$  od  $O_{kf}$  naredbom „Minus“ u pod-izborniku „Math“ u ArcGIS-u. Raspon vrijednosti se kreće od 0,3 - 1,8 te su prema tome napravljene i klase, sukladno sa KAVA metodom. Na slici 15 zelena i žuta boja dominiraju, što znači da područje promatranja prekriva umjereno do slabo razvijenim tlom.

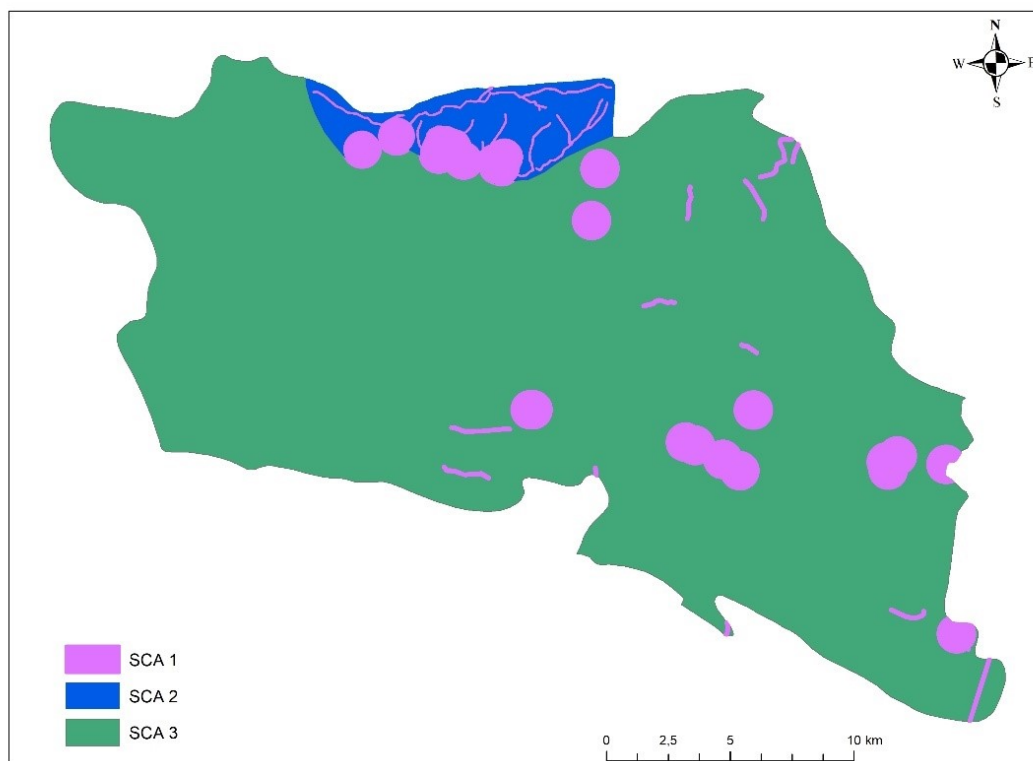


*Slika 15. O faktor za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice*

#### 4.2.3. SCA parametar

SCA parametar određen je na temelju opisa KAVA metode za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice. Gotovo cijelo područje se nalazi na dobro propusnim karbonatnim stijenama koje vrlo teško formiraju površinske tokove, osim nešto malo bujičnih tokova na nepropusnim naslagama na sjevernom dijelu sliva. Najopasnije je područje upravo tih bujičnih tokova te usko područje oko ponora, gdje voda ide direktno u podzemlje. Prema tome sva okolna voda vrlo se brzo infiltrira na mjestu gdje padne, ne otječe površinski. Na slivu je definiran parametar SCA 1 u rasponu od 750 metara oko identificiranih ponora i 50 metara oko površinskih tokova na kojemu je utjecaj koncentriranog toka koji direktno utječe u ponore. SCA 2 predstavlja usko područje za koje se pretpostavlja da se drenira u povremene površinske tokove te SCA 3 koji predstavlja ostatak područja (slika 16).

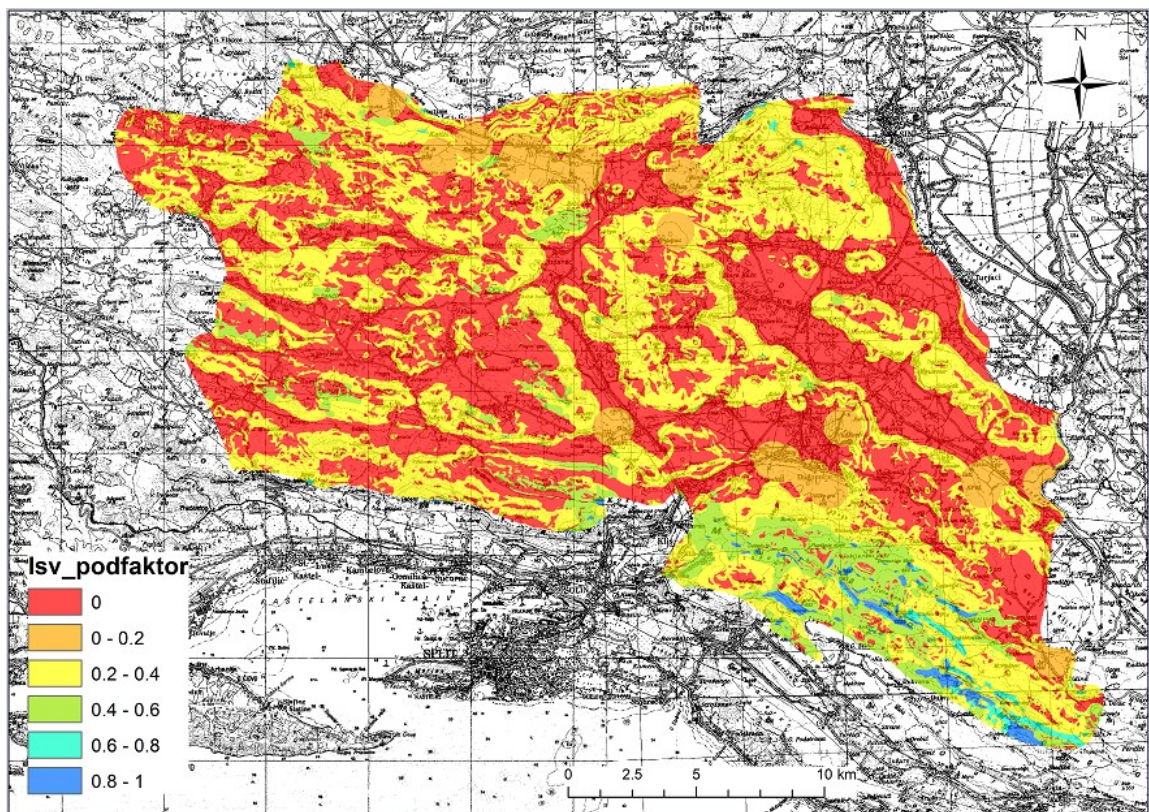




*Slika 16. Karta područja površinskih slivova*

#### **4.2.4. I – Faktor**

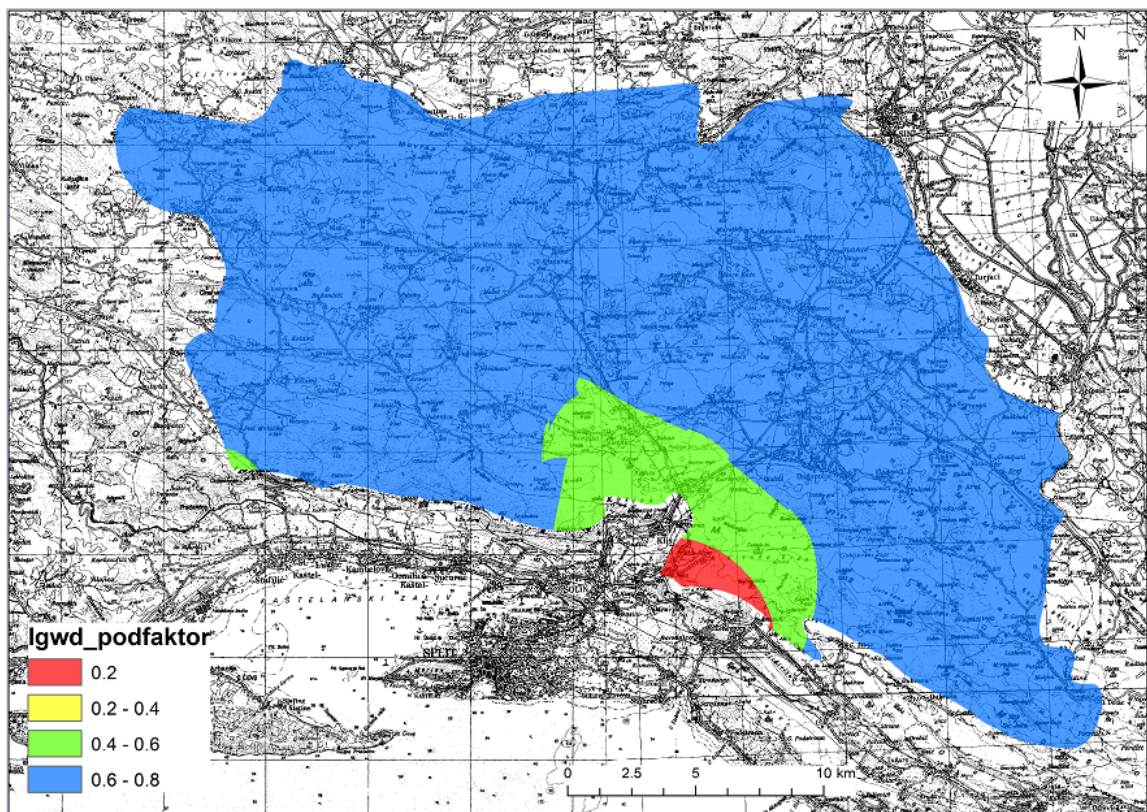
Vrijednost I – faktora dobiva se na temelju podfaktora  $I_{sv}$  (koji opisuje utjecaj nagiba i vegetacije) te  $I_{gwd}$  (koji opisuje utjecaj dubine do podzemne vode). Prije određivanja  $I_{sv}$  podfaktora potrebno je odrediti utjecaj vegetacije (preuzeti su podaci iz Corine LandCovera – CLC baze podataka). Utjecaj nagiba i vegetacije kombinirani su i određeni prema uputi metode ovisno o vrijednosti parametra SCA. Unutar promatranog slivnog područja vrlo je malo površinskih tokova, koji su obično povremeni bujični tokovi u vrijeme jakih kiša, pa se prema tome glavnina područja promatra kao SCA 3 (brza infiltracija vode na mjestima manjeg nagiba terena). Nakon dobivenog parametra, dodaju se odgovarajuće vrijednosti i klase prema uputama iz tablice 9. Podfaktor  $I_{sv}$  dobije se reklasifikacijom te on prikazuje utjecaj nagiba i vegetacije na području sliva (slika 17).



*Slika 17. Podfaktor Isv za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice*

$I_{gwd}$  faktor predstavlja utjecaj dubine do podzemne vode. Za dobivanje dubine do podzemne vode bitni su hidrogeološki odnosi unutar slivnog područja izvora Jadra i Žrnovnice, a budući da je to tipičan heterogen i anizotropan krški sliv, nemoguće je precizno odrediti razinu vodnog lica.  $I_{gwd}$  procjenjuje se na temelju karte pretpostavljenog gradijenta dubine do podzemne vode. Karta je izrađena pomoću IDW metode interpolacije podataka iz bušotina na slivnom području, u kojima je razina podzemne vode izmjerena, u apsolutnim kotama. Tako dobiven gradijent podzemne vode oduzet je od vrijednosti nadmorske visine terena kako bi se dobila debljina nezasićene zone. Da bi konačno iz toga dobili vrijednost  $I_{gwd}$  faktora u formi rastera, potrebno ga je reklasificirati formirajući klase i dodajući im vrijednosti prema uputama KAVA metode (tablica 10).

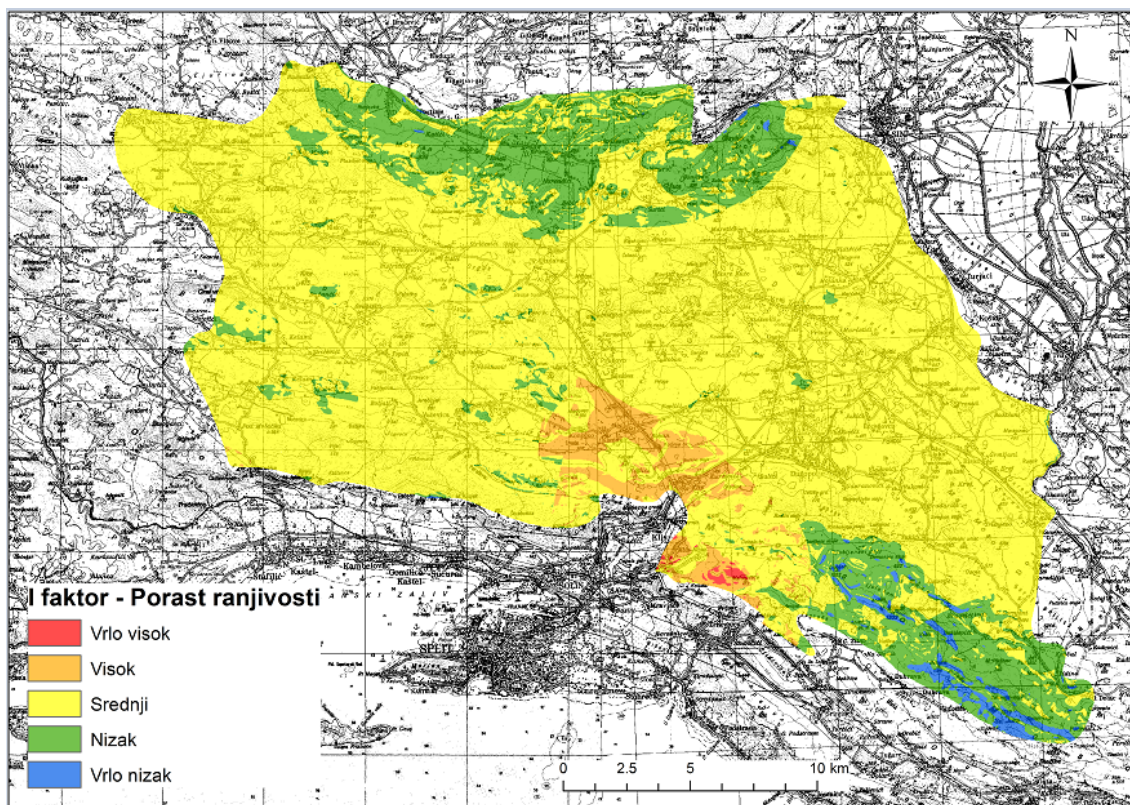




Slika 18. Podfaktor I<sub>gwd</sub> za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice

I – faktor, odnosno utjecaj infiltracije, dobiva se matematičkim zbrajanjem podfaktora  $I_{sv}$  i  $I_{gwd}$  pomoću naredbe „Plus“ u izborniku „Math“ u ArcGIS Toolbox-u. Raspon vrijednosti kreće se od 0,2 – 1,6 svrstano u 5 klasa, sukladno KAVA metodom (slika 19). Cijelo područje je prekriveno žutom bojom, što prema uputama KAVA metode znači srednji utjecaj infiltracije na ranjivost, to je zapravo površina koja u cijelosti pripada SCA 3. Zelena boja predstavlja područja velike dubine do podzemne vode koja omogućuje dulje vrijeme prolaska vode s površine do vodnog lica te na taj način smanjuje ranjivost. Područje koje je okarakterizirano kao SCA 1 pretežito spada u dio s većom dubinom do podzemne vode stoga kod zbrajanja pojedinih podfaktora ne dolazi do izražaja odnosno koncentrirani tok direktno u ponore nije izdvojen kao visoki stupanj ranjivosti za ovaj slučaj I faktora.

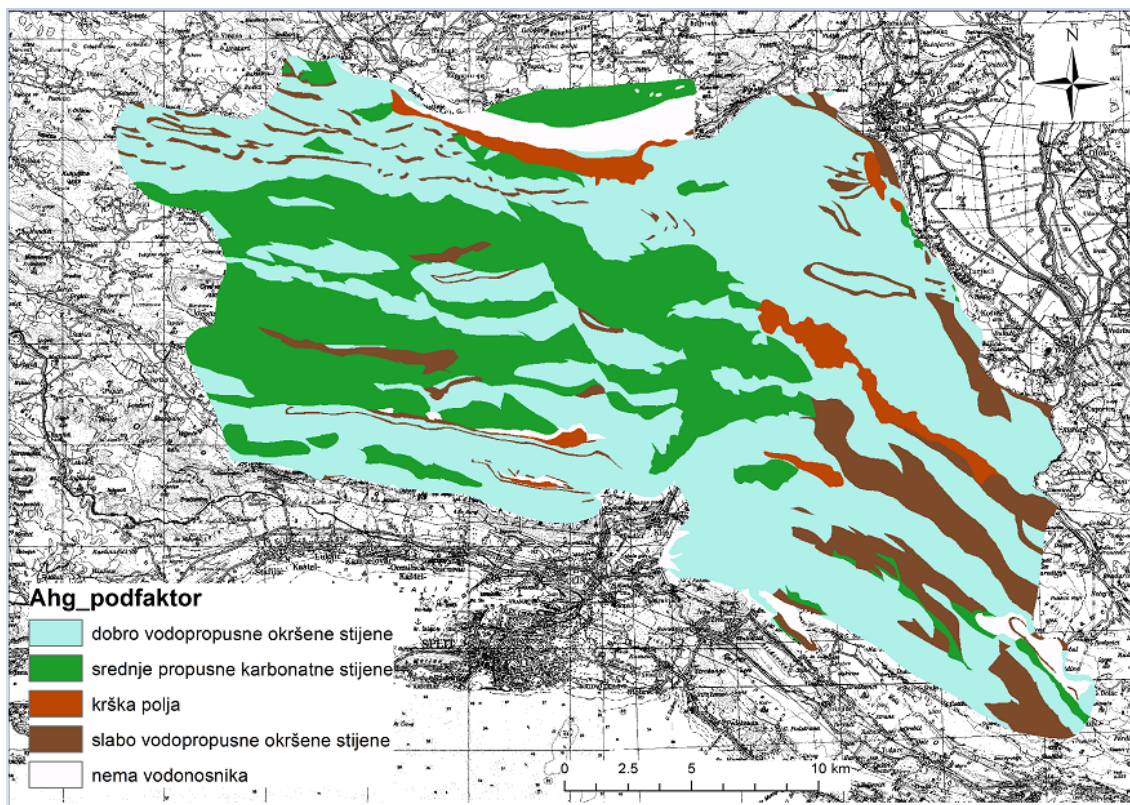




Slika 19. I faktor za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice

#### 4.2.5. A – Faktor

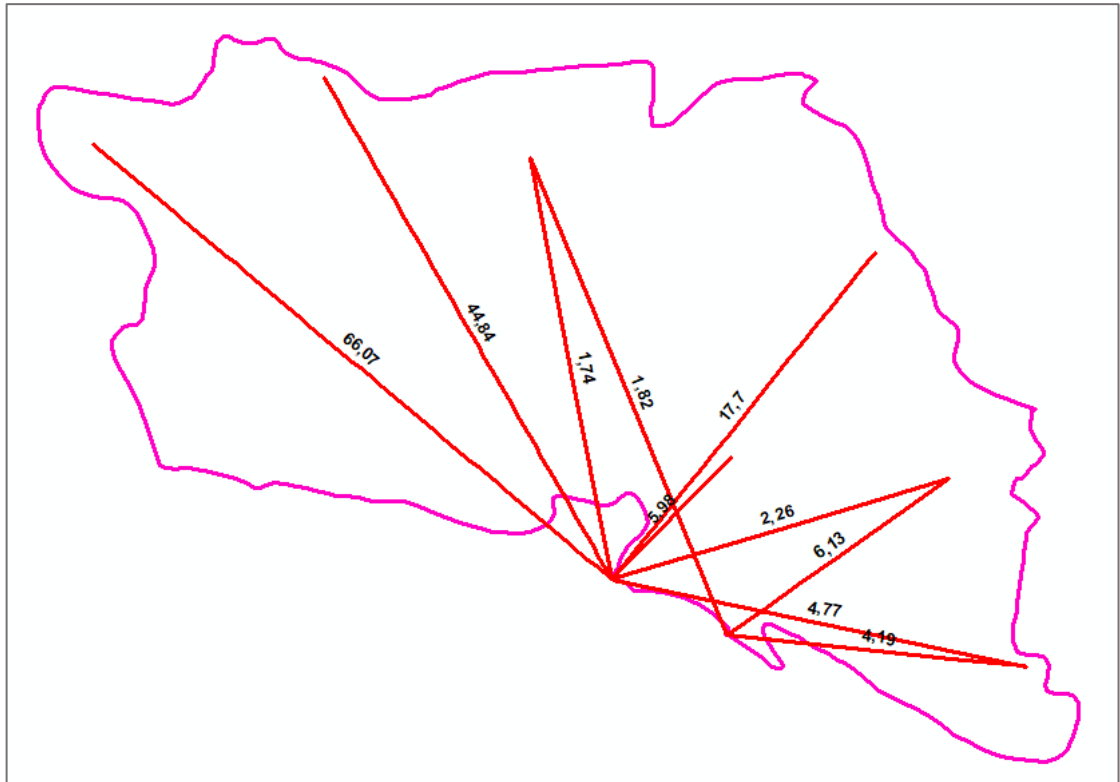
Procjena A – faktora, odnosno uvjeti vodonosnika dobivaju se na temelju podfaktora  $A_{hg}$  (koji se definira na temelju hidrogeološkog opisa stijena) i podfaktora  $A_{tt}$  (koji predstavlja procjenu dinamičkih uvjeta – po kava metodi procijenjeni preko rezultata provedenih trasiranja). Za određivanje podfaktora  $A_{hg}$  prije svega je potrebno u hidrogeološkoj karti identificirati sve vrste stijena. Prema uputama danim u tablici 12 svakoj identificiranoj vrsti stijene dodijeljena je pripadajuća vrijednost. Na slici 20, vidljivo je da na promatranom području najviše dominiraju dobro propusne okršene stijene. Najmanje su zastupljena krška polja i područja gdje nema vodonosnika, odnosno područja gdje nema vodonosnika. Prema KAVA metodi, dodijeljene su vrijednosti parametru  $A_{hg}$  te je raster reklasificiran u klase.



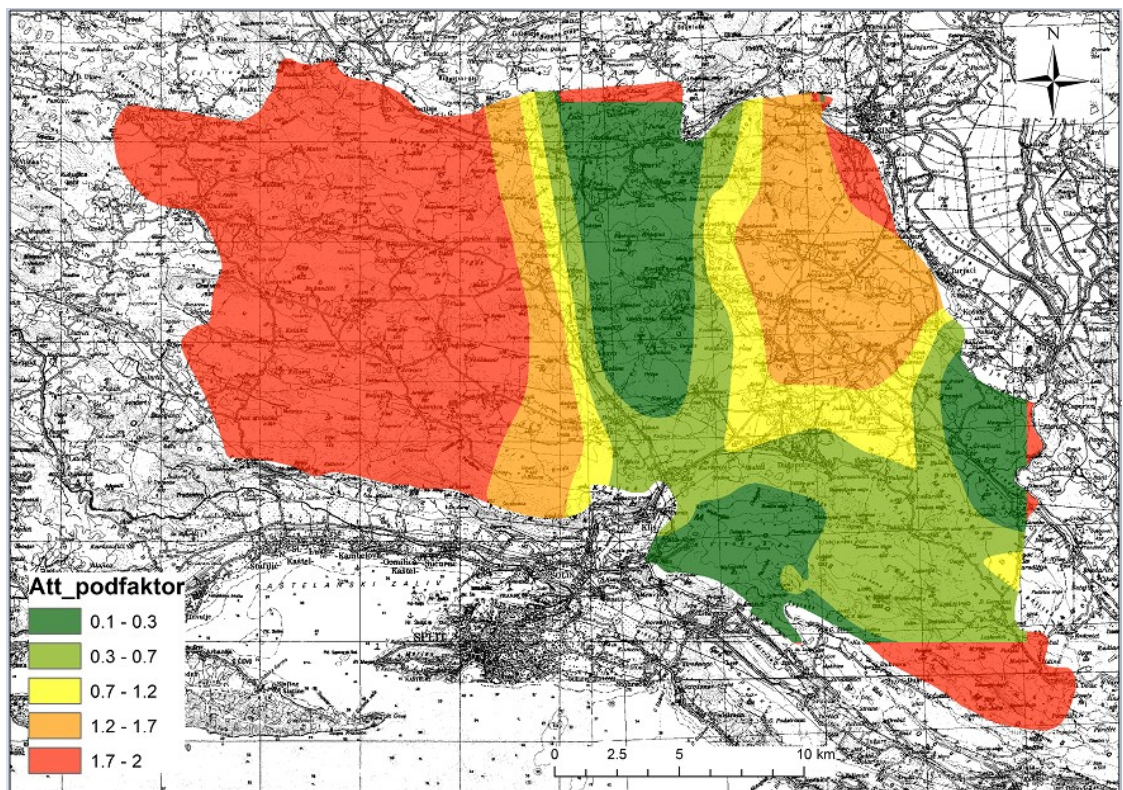
Slika 20. Podfaktor Ahg za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice

Budući da je tematika u ovom diplomskom radu takva da zahtjeva analiza ranjivosti izvora vode u kršu potrebna je procjena i podfaktora  $A_{tt}$  (analiza ranjivosti čitavog vodonosnika ne zahtjeva analizu navedenog podfaktora), odnosno, važan dio analize je upravo procjena dinamičkih uvjeta u zasićenom dijelu vodonosnika. Kako je već spomenuto da krški vodonosnici imaju izrazito heterogena i anizotropna svojstva, a takav je i sliv izvora Jadra i Žrnovnice, vrlo je teško pouzdano odrediti prostornu distribuciju parametra  $A_{tt}$ . U uputi KAVA metode to se radi pomoću vremena potrebnog da voda (ili potencijalno onečišćenje) dođe s neke točke sliva do promatranog izvora, tj. pomoću rezultata do sada provedenih trasiranja. Na slivu je do sada trasiranjima utvrđeno 10 podzemno vodnih veza između pojedinih lokacija i izvora Jadro i Žrnovnica (slika 21) te je vrijeme potrebno da se traser pojavi na izvorima označeno brojkom na linijama kao broj potrebnih dana.  $A_{tt}$  podfaktor dobiven je interpolacijom podataka o broju dana duž pojedine linije podzemno vodne veze pomoću metode spline. Tako je na slivu dobivena prostorna distribucija vremena potrebnog da se uspostavi veza s izvorom (u danima), što je pak definiralo vrijednosti podfaktora  $A_{tt}$  (slika 22).



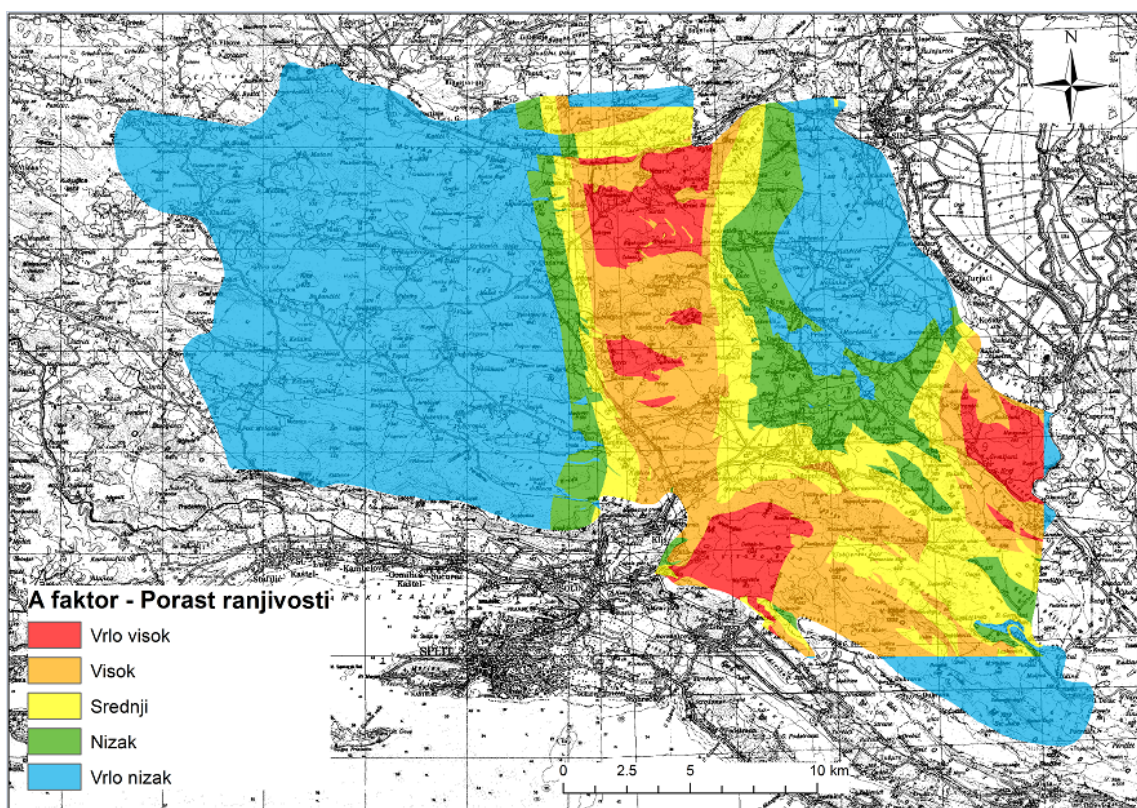


Slika 21. Linije trasiranja kao okosnica definicije podfaktora  $A_{tt}$



Slika 22. Podfaktor  $A_{tt}$  za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice

A – faktor, odnosno uvjeti vodonosnika, dobiva se matematičkom operacijom zbrajanja podfaktora  $A_{hg}$  i  $A_{tt}$  naredbom „Plus“ u pod-izborniku „Math“ u ArcGIS-u. Raspon vrijednosti se kreće od 0,3 - 3 te su prema tome napravljene i klase, sukladno sa uputama KAVA metode. Na slici 23 vidljivo je da plava boja dominira područjem (vrijednosti su: od 1,6 – 3) čije su vrijednosti visoke, da se naslutiti da je to područje koje nije direktno povezano izvorištem. Ostala područja čije su vrijednosti niže, ranjivije su zbog veće okršenosti, bolje vodopropusnosti stijena, te zbog bolje povezanosti sa izvorom (prema rezultatima trasiranja).



Slika 23. A faktor za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice

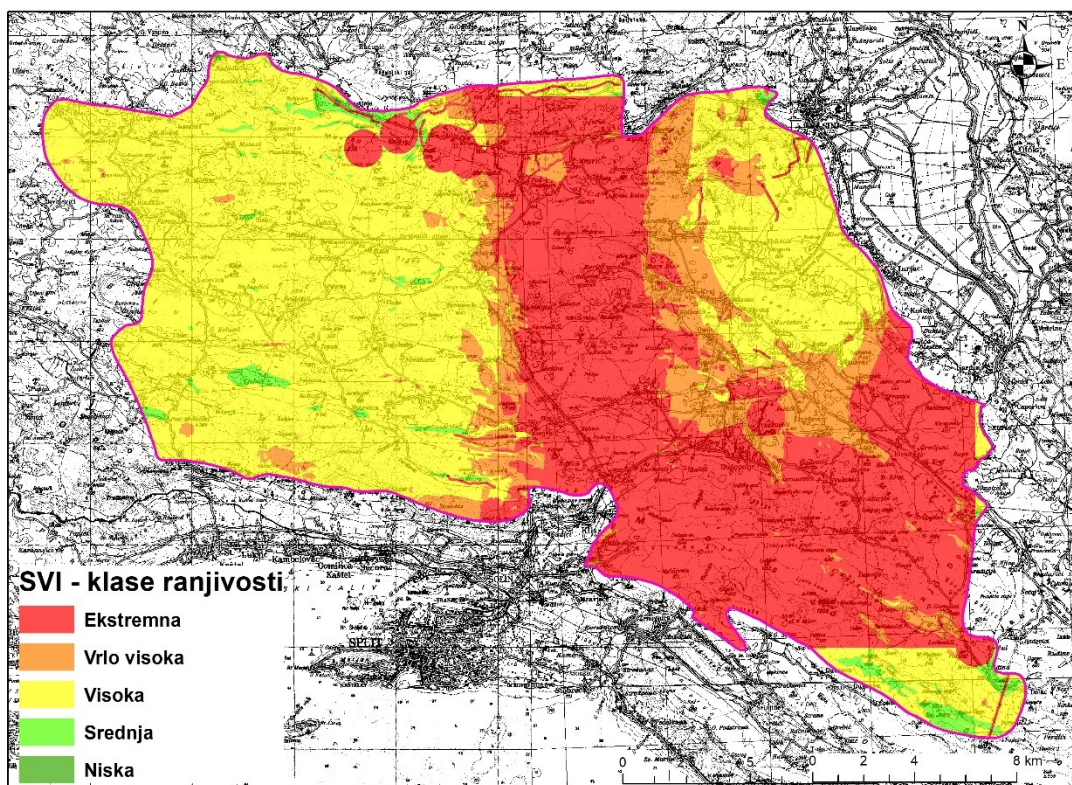


### 4.3. Karta ranjivosti izvora (SVI)

Konačna karta ranjivosti izvora dobije se matematičkim zbrajanjem vrijednosti faktora O, I, A, te se dobiveni rezultat u konačnici pomnoži sa vrijednosti P – faktora što je vidljivo u jednadžbi:

$$SVI\ score = (O\ score + I\ score + A\ score) \cdot P\ score$$

Konačni izračun jednadžbe je proveden pomoću naredbe „Raster calculator“ u izborniku „Map Algebra“ u ArcGIS Toolbox-u. Nakon dobivenog rastera, prema uputama KAVA metode (tablica 16) dodijeljeno je 5 klasa u rasponu vrijednosti od 1,4 – 5,8. Konačna karta ranjivosti sliva izvora Jadro i Žrnovnica dobivena korištenjem KAVA metode prikazana je na slici 24.



Slika 24. Karta ranjivosti sliva izvora Jadro i Žrnovnica

Na priloženoj karti vidljivo je da je gotovo cijelo slivno područje u klasama ekstremne do visoke ranjivosti što ga čini vrlo osjetljivim na bilo kakve ljudske djelatnosti koje bi mogle prijetiti narušavanju kvalitete vode spomenutih izvora. To i nije neobičan rezultat

budući da je već u građi terena vidljivo da su najzastupljenija skupina stijena koja sačinjava ovaj vodonosnik upravo dobro propusne karbonatne stijene koje su same po sebi izrazito ranjive na antropogene utjecaje. Kad se tome pridoda kombinacija naslaga tla male debljine, brze infiltracije tokova s površine u podzemlje te izrazito velike brzine podzemnih tokova utvrđene trasiranjima, rezultat je očekivan.

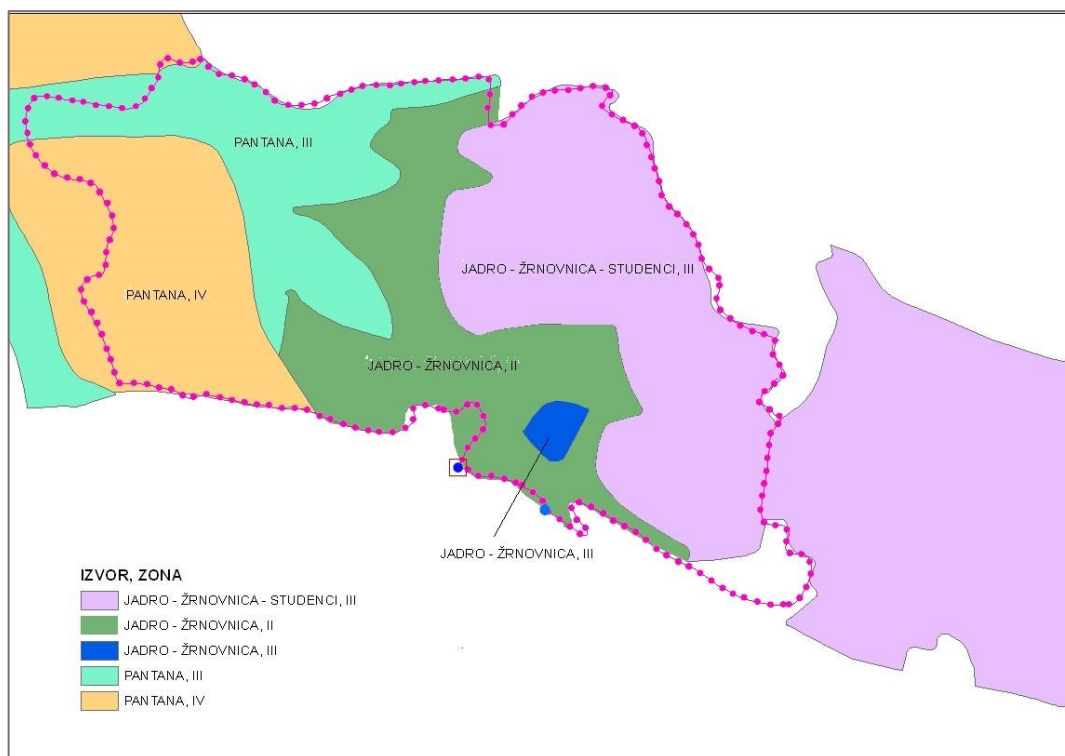
Važno je spomenuti da prema KAVA metodi utjecaj oborina na ovom slivu uopće nije diferenciran, a s druge strane, definiranje dinamičnih uvjeta u vodonosniku ima izrazito velik utjecaj na konačnu kartu ranjivosti pa to treba uzeti u obzir kod validacije karte i eventualne prilagodbe tog parametra. Rezultat provedene analize (karta prirodne ranjivosti), dobivena na ovaj način, daje dosta realan uvid u ranjiva područja ovog sliva.

## 5. PRIJEDLOG ZAŠTITE PODZEMNIH VODA SLIVA

Zaštita podzemnih voda u okršenim karbonatnim vodonosnicima izrazito je komplicirana, ali neobično važna mjera očuvanja tog nezamjenjivog prirodnog resursa. Krška područja Dinarida sadrže vodonosnike velikog i važnog bogatstva voda izrazito dobre kvalitete, ali upravo zbog specifičnih karakteristika, vrlo ranjive na razne utjecaje (što se vidjelo i kroz rezultat ovdje provedene analize) stoga im je potrebna specifična zaštita. Najbolje rješenje za očuvanje kvalitete podzemne vode ovog područja bi bilo zaštititi cijele slivove jednakim razinama zaštite. Međutim zbog ogromnih dimenzija koje pokrivaju, za krške slivove bi svakako trebalo koristiti selektivni pristup zaštiti usmjeren na smanjenje stupnja rizika od onečišćenja uz funkcionalne aktivne mjere zaštite usmjerene na područja gdje su one neophodne, a u ostatku područja omogućiti gospodarski razvoj (Biondić & Biondić, 2014). Zaštita izvorišta i vodnih resursa temelji se na identifikaciji potencijalnih onečišćenja, otklanjanju prijetnji i primjeni najbolje prakse u upravljanju podzemnim vodama. Propisivanje i određivanje konačnih zaštitnih zona nekog izvorišta kao i donošenje odluke o njegovoj zaštiti moguće je tek nakon provedenih vodoistražnih radova i izrade elaborata zone sanitarne zaštite. Zaštita izvora pitke vode u Republici Hrvatskoj općenito se provodi definiranjem različitih područja unutar kojih se propisuju mjere aktivne zaštite (Meaški, n.d.).

Prema sadašnjem stanju, gotovo čitavo slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice spada u jednu od zona sanitarne zaštite (slika 25). To znači da čitavo područje (preko 500 km<sup>2</sup>) ima definirane neke od mjera zaštite u svrhu očuvanja kvalitete podzemnih voda ovog područja. Rezultati dobivene karte ranjivosti primjenom KAVA metode u dobroj mjeri prate oblik propisanih zona zaštite, no upravo u dijelovima koji su izdvojeni zasebno potrebno je usmjeriti detaljnija istraživanja radi preciznije delineacije propisanih zona.

Vrlo velika pažnja treba se posvetiti upravo ponornim zonama i utjecaju priljevnog područja pojedinim ponorima na kojima voda s potencijalnim onečišćenjem može u kratkom periodu doći s površine terene do vodnog lica, a vrlo brzo i do samih izvora koji su zahvaćeni za vodoopskrbu.



*Slika 25. Trenutno stanje definiranih zona zaštite na slivu izvora Jadro i Žrnovnica*

Kako provođenje mjera zaštita obično podrazumijeva propisivanje zabranjenih ili ograničavanje pojedinih aktivnosti, to bi se moglo protumačiti da zaštita zaliha podzemne vode ide na štetu gospodarskog razvoja ovog područja. Također, propisivanjem mjera zaštita na velikom području može izazvati određeni bunt lokalnog stanovništva te posljedično tome nepoštivanje propisanih mjera.

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. Budući da na području sliva Jadra i Žrnovnice ne postoje novelirane zone sanitarne zaštite spomenutih izvora pitke vode, preporuka je kod definiranja istih koristiti dobivenu kartu prirodne ranjivosti jer jasno izdvaja najranjivije dijelove sliva. Također, može se koristiti 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.



## 6. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu prikazano je korištenje KAVA metode za procjenu prirodne ranjivosti krških vodonosnika na primjeru izvora Jadra i Žrnovnice. KAVA metoda u procjeni prirodne ranjivosti koristi četiri specifična faktora: O – faktor (pokrovne naslage), P – faktor (utjecaj oborina), I – faktor (utjecaj infiltracije) i A – faktor (uvjeti vodonosnika). Navedeni faktori dobiveni su pomoću svih dostupnih podataka iz prethodnih istraživanja. Dobiveni faktori omogućili su izradu karte ranjivosti izvora, odnosno SVI (SV indeks) za promatrano područje, te je vidljivo i jasno da se ranjivost kreće od visoke do ekstremne ranjivosti. Dobiveni rezultat za ranjivost daje na znanje da je područje vrlo osjetljivo na bilo kakve ljudske djelatnosti koje bi mogle narušiti kvalitetu vode spomenutih izvora. Što i nije tako neobično, s obzirom da je u građi terena vidljivo najzastupljenija dobro propusna karbonatna stijena koja je sama po sebi izrazito ranjiva na antropogene utjecaje. No, rezultat je također očekivan zbog tla male debljine, brze infiltracije tokova s površine u podzemlje te izrazito velike brzine podzemnih tokova utvrđene trasiranjima.

KAVA metoda korištena u ovom radu pokazala se kao metoda koja u dobroj mjeri izdvaja kritična područja najranjivija na antropogene utjecaje. Međutim, za detaljniju primjenu na manjem prostoru, na primjer za potrebe definiranja zona zaštite kod mikrozoniranja, bilo bi korisno prilagoditi ju manjim preinakama ovom tipu vodonosnika.

Kod određivanja zona sanitarne zaštite ovog područja, gotovo čitavo područje pripada samo jednoj od zona sanitarne zaštite, za koje su točno definirane mjere zaštite kako ne bi došlo do narušavanja kvalitete izvorskih voda. Provođenje aktivnih mjera za zone sanitarne zaštite koje za cilj imaju zabranu ili ograničavanje pojedinih aktivnosti (ovisno o kojoj zoni je riječ) može se reći kako je gospodarski razvoj ovog područja poprilično narušen, što može dovesti do pobune lokalnog stanovništva što u konačnici dovodi do nepoštivanja propisanih mjera.

## 7. POPIS LITERATURE

Biondić, B. & Biondić, R., 2014. *Hidrogeologija dinarskog krša u Hrvatskoj*. Varaždin: Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Biondić, R., Meaški, H., Biondić, B. & Loborec, J., 2021.. *Karst Aquifer Vulnerability Assessment (KAVA) Method - A Novel GIS-Based Method for Deep Karst Aquifers*.

[Mrežno]

Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/6/3325>

[Pokušaj pristupa 10. svibnja 2022.].

Bonacci, O. & Bonacci, T. R., 2004.. *Posebnosti krških vodonosnika*. [Mrežno]

Available at: [https://www.researchgate.net/profile/Tanja-Roje-](https://www.researchgate.net/profile/Tanja-Roje-Bonacci/publication/273127126_Posebnosti_krskih_vodonosnika/links/54f82c370cf210398e9482ab/Posebnosti-krskih-vodonosnika.pdf)

[Bonacci/publication/273127126\\_Posebnosti\\_krskih\\_vodonosnika/links/54f82c370cf210398e9482ab/Posebnosti-krskih-vodonosnika.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Tanja-Roje-Bonacci/publication/273127126_Posebnosti_krskih_vodonosnika/links/54f82c370cf210398e9482ab/Posebnosti-krskih-vodonosnika.pdf)

[Pokušaj pristupa 1. lipnja 2022.].

Kapelj, S., Kapelj, J. & Švonja, M., 2011.. *Hidrogeološka obilježja sliva Jadra i Žrnovnice*. [Mrežno]

Available at: <https://hrcak.srce.hr/file/132579>

[Pokušaj pristupa 2. svibnja 2022.].

Loborec, J., 2013.. *Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda u kršu na području sliva izvora Jadra i Žrnovnice - Disertacija*. [Mrežno]

Available at:

<https://repositorij.rgn.unizg.hr/islandora/object/rgn%3A625/datastream/PDF/view>

[Pokušaj pristupa 25. svibnja 2022.].

Meaški, H., n.d. *Predavanje iz kolegija "Zaštita podzemnih voda"*. Varaždin: Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Z. z. z. o. i. p., 2012. *Pokrov i namjena korištenja zemljišta CORINE Land Cover*. [Mrežno]

Available at: <http://corine.haop.hr/>

[Pokušaj pristupa 1. lipnja 2022.].

Šegota, T. & Filipčić, A., 2003.. *Koppenova podjela klima i hrvatsko nazivlje*. [Mrežno]

Available at: <https://hrcak.srce.hr/file/14773>

[Pokušaj pristupa 21. svibnja 2022.].

Vidaček, Ž. i dr., 2004. *Tumač hidropedološke karte Republike Hrvatske, M 1:300 000*. Zagreb: Zavod za pedologiju, Agronomski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

Zaninović, K., Gajić-Čapka, M. & Perčec Tadić, M., 2008. *Klimatski atlas Hrvatske (Climate atlas of Croatia), 1961-1990, 1971-2000*. Zagreb: Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ).

## POPIS SLIKA

Slika 1. Izvor Jadra .....	3
Slika 2. Manji izvor rijeke Žrnovnice.....	4
Slika 3. Hidrogeološka karta područja izvora Jadra i Žrnovnice .....	6
Slika 4. Geografski položaj sliva.....	7
Slika 5. Koppenova raspodjela klimatskih tipova u Hrvatskoj (s označenim slivom) .....	8
Slika 6. Utjecaj navedenih faktora na određeno područje.....	9
Slika 7. Dijagram osnovnih Pi kategorija .....	14
Slika 8. Određivanje područja sliva - shematski prikaz .....	15
Slika 9. DMR za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice.....	25
Slika 10. Podfaktor Pe za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice.....	28
Slika 11. Podfaktor Pi za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice.....	28
Slika 12. Faktor P za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice .....	29
Slika 13. Podfaktor Os za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice.....	30
Slika 14. Podfaktor Okf za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice .....	31
Slika 15. O faktor za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice .....	32
Slika 16. Karta područja površinskih slivova .....	33
Slika 17. Podfaktor Isv za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice .....	34
Slika 18. Podfaktor Igdw za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice .....	35
Slika 19. I faktor za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice .....	36
Slika 20. Podfaktor Ahg za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice .....	37
Slika 21. Linije trasiranja kao okosnica definicije podfaktora $A_{tt}$ .....	38
Slika 22. Podfaktor $A_{tt}$ za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice.....	38
Slika 23. A faktor za slivno područje izvora Jadra i Žrnovnice.....	39
Slika 24. Karta ranjivosti sliva izvora Jadro i Žrnovnica .....	40
Slika 25. Trenutno stanje definiranih zona zaštite na slivu izvora Jadro i Žrnovnica .....	43

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti za podfaktor Os .....	10
Tablica 2. Vrijednosti za podfaktor Okf.....	11
Tablica 3. Vrijednosti, kategorija ranjivosti i legenda za izradu karte prema O faktoru.....	12
Tablica 4. Vrijednosti za podfaktor Pe.....	13
Tablica 5. Vrijednosti za podfaktor Pi.....	13
Tablica 6. Vrijednosti, kategorija ranjivosti i legenda za izradu karte prema P faktoru .....	15
Tablica 7. Kategorije i definicije pojedinih područja .....	16
Tablica 8. Vrijednosti za podfaktor Isv .....	17
Tablica 9. Vrijednosti za podfaktor Isv na osnovu svakog SCV-a .....	18
Tablica 10. Vrijednosti za podfaktor Igwd.....	19
Tablica 11. Vrijednosti, kategorija ranjivosti i legenda za izradu karte prema I faktoru.....	19
Tablica 12. Vrijednosti za podfaktor Ahg .....	20
Tablica 13. Vrijednosti za podfaktor Att.....	21
Tablica 14. Vrijednosti, kategorija ranjivosti i legenda za izradu karte prema A faktoru .....	22
Tablica 15. RVI - Procjena ranjivosti resursa .....	23
Tablica 16. SVI - Procjena ranjivosti izvora.....	23
Tablica 17. Indeksi, kategorija ranjivosti i legenda za izradu karte prema SV i RV .....	24