

Primljen / Received: 25.11.2016

Ispravljen / Corrected: 22.8.2017.

Prihvaćen / Accepted: 2.11.2017.

Dostupno online / Available online: 10.5.2019.

Kartiranje osjetljivosti podzemnih voda pomoću modificiranog postupka DRASTIC ANP

Autori:



Sahajpreet Kaur Garewal, dipl.ing.građ.
Nacionalni tehnološki institut Visvesvaraya
Građevinski fakultet
sahaj012@gmail.com



Doc.dr.sc. Avinash D. Vasudeo, dipl.ing.građ.
Nacionalni tehnološki institut Visvesvaraya
Građevinski fakultet
avinashvasudeongp@gmail.com



Doc.dr.sc. Vishrut S. Landge, dipl.ing.građ.
Nacionalni tehnološki institut Visvesvaraya
Građevinski fakultet
vslandge@rediffmail.com



Prof.dr.sc. Aniruddha D. Ghare, dipl.ing.građ.
Nacionalni tehnološki institut Visvesvaraya
Građevinski fakultet
adghare@yahoo.co.in

Znanstveni rad - Prethodno priopćenje

[Sahajpreet Kaur Garewal, Avinash D. Vasudeo, Vishrut S. Landge, Aniruddha D. Ghare](#)

Kartiranje osjetljivosti podzemnih voda pomoću modificiranog postupka DRASTIC ANP

Ocjnjivanje zona osjetljivosti podzemnih voda u freatskom vodonosniku grada Nagpura u Indiji provedeno je pomoću modificirane metode DRASTIC u okruženju geografskog informacijskog sustava (GIS). U ovom se radu proces ANP po prvi put primjenjuje za modificiranje pondera parametara u okviru metode DRASTIC. Zone osjetljivosti podzemne vode, dobivene na temelju raznih pristupa DRASTIC, uspoređuju se i potvrđuju pomoću terenskih podataka o koncentraciji nitrata. Bolja korelacija uspostavljena je primjenom predloženog modificiranog postupka DRASTIC ANP.

Ključne riječi:

AHP, ANP, DRASTIC, GIS, osjetljivost podzemne vode, nitrat

Research paper

[Sahajpreet Kaur Garewal, Avinash D. Vasudeo, Vishrut S. Landge, Aniruddha D. Ghare](#)

Groundwater vulnerability mapping using modified DRASTIC ANP

Groundwater vulnerable zones in phreatic aquifers of Nagpur city in India were evaluated using the modified DRASTIC method in the geographical Information System (GIS) environment. In the present research, the ANP was applied for the first time to DRASTIC parameters for weight modification. Vulnerable groundwater zones obtained from various DRASTIC approaches were compared and validated using field data on nitrate concentration. A better correlation was established with the proposed Modified DRASTIC ANP procedure.

Key words:

AHP, ANP, DRASTIC, GIS, groundwater vulnerability, nitrate

Forschungsbericht

[Sahajpreet Kaur Garewal, Avinash D. Vasudeo, Vishrut S. Landge, Aniruddha D. Ghare](#)

Grundwasserempfindlichkeitsdiagramm mithilfe des modifizierten DRASTIC ANP Verfahrens

Die Bewertung der Grundwasserempfindlichkeitszonen im unterirdischen Grundwasserleiter der Stadt Nagpura in Indien wurde mithilfe der modifizierten Methode DRASTIC in der Umgebung des geografischen Informationssystems (GIS) durchgeführt. In dieser Abhandlung wird der Arbeitsprozess ANP zum ersten Mal für die Modifizierung der Gewichtung der Parameter im Rahmen der Methode DRASTIC angewendet. Die Grundwasserempfindlichkeitszonen, die aufgrund unterschiedlicher Ansätze des DRASTIC erhalten wurden, werden verglichen und mithilfe der Felddaten über die Nitratkonzentration bestätigt. Eine bessere Korrelation wurde durch Anwendung des empfohlenen modifizierten Verfahrens DRASTIC ANP eingerichtet.

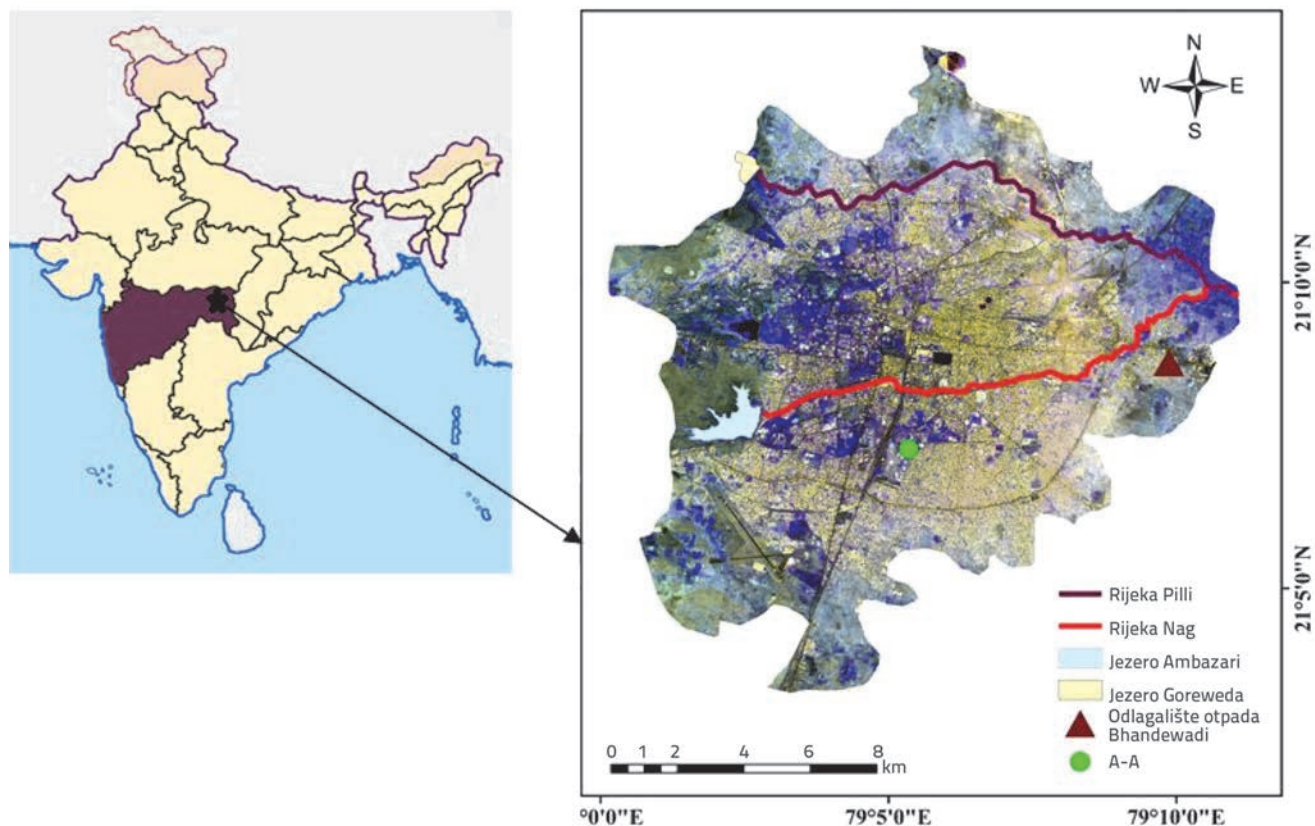
Schlüsselwörter:

AHP, ANP, DRASTIC, GIS, Grundwasserempfindlichkeit, Nitrat

1. Uvod

Podzemna voda je značajan resurs koji nalazimo u različitim stratigrafskim slojevima tla. Uz pitanje o dostupnim količinama podzemne vode, važno ekološko pitanje je i opća kvaliteta podzemne vode u vodonosnim slojevima. Kao jedna od posljedica sve veće urbanizacije, u svakodnevnim se aktivnostima koriste kemikalije što negativno utječe na kakvoću podzemne vode [1] s obzirom na praksu nekontroliranog ispuštanja otpadnih voda i drugih onečišćujućih tvari. Podzemna voda sve više dobiva na vrijednosti u područjima u kojima je lokalna vodoopskrbna mreža nedostatna, ili je voda onečišćena. Osnovni koncept da podzemna voda nije ugrožena inspiriran je postojanjem nepropusnih slojeva koji djeluju kao zaštitni filter [2]. Onečišćenje vode može se kontrolirati na samom izvoru, prije procjeđivanja, jer se nakon prodora - onečišćivača njegova svojstva mogu vrlo teško kontrolirati, a u nekim slučajevima to uopće nije moguće [3]. Kako raste svijest o važnosti podzemnih voda, tako postaju sve učestaliji i pokušaji da se smanji, spriječi te u potpunosti eliminiira onečišćenje podzemnih voda [4]. Zaštita podzemnih voda od ključnog je značenja za djelotvorno upravljanje tim značajnim resursom. Ciljevi zaštite podzemne vode mogu se ostvariti ocjenjivanjem njene osjetljivosti [5]. Mnogi su istraživači pokušali kartirati osjetljivost određenih područja kroz kombiniranu analizu hidrogeoloških faktora, antropogenih utjecaja i izvora onečišćenja u istraživanom području [6].

U literaturi se spominju brojne metodologije koje se koriste u svrhu ocjenjivanja osjetljivosti podzemnih voda. Neke od njih su GOD [7], DRASTIC [8] i SINTACS [9], a odabir konkretne metode ovisi o dostupnosti podataka. DRASTIC je jedna od poznatijih i često primjenjivanih preklopnih indeksnih metoda koja se diljem svijeta primjenjuje za ocjenjivanje osjetljivosti podzemnih voda [10-12]. Metodu DRASTIC razvila je Američka agencija za zaštitu okoliša (eng. *United States Environmental Protection Agency* - USEPA). U toj se metodi koristi sedam hidrogeoloških parametara za ocjenjivanje osjetljivosti podzemnih voda u određenom području. Metoda je pogodna za primjenu kako u krškim [13, 14] tako i u poroznim vodonosnicima [15]. Karte osjetljivosti koje se dobivaju nakon analize metodom DRASTIC mogu se koristiti samo za analizirano područje, tj. nije moguća primjena u različitim hidrogeološkim sredinama. Kako bi se smanjila subjektivnost metode DRASTIC i poboljšala sposobnost predviđanja osjetljivosti podzemnih voda, metoda je poboljšana uvođenjem različitih izmjena, ovisno o karakteristikama promatranog područja. U novijim su studijama uz standardnu metodu DRASTIC uvedeni novi vrlo značajni parametri kao što su korištenje zemljišta/obuhvat zemljišta, posebna obilježja itd. [2, 5] kako bi se uključivanjem takvih dodatnih parametara omogućila što bolja procjena osjetljivosti podzemnih voda. Ocjene i ponderi definirani pomoću DRASTIC-a mijenjaju se ovisno o lokalnom značenju pojedinih parametara. Za mijenjanje parametara koriste se



Slika 1. Prikaz promatranog područja

brojni pristupi kao što su neparametarsko statističko ispitivanje Wilcoxon Rank Sum [16], analitički hijerarhijski proces (AHP) [2, 17, 18], diskriminantna analiza [11] itd. Analiza osjetljivosti na bazi pojedinačnih parametara [19] koristi se kao sredstvo za određivanje utjecaja pojedinačnih parametara na druge parametre te na indeks osjetljivosti.

Kao izrazito urbanizirana sredina, grad Nagpur (smješten u indijskoj državi Maharashtra) suočen je s problemom pretjeranog korištenja i loše kvalitete podzemne vode u raznim dijelovima grada. Analizirani su podaci o kvaliteti podzemne vode iz kontrolnih bunara smještenih unutar područja koje nadzire Nagpursko komunalno poduzeća (NMC) kako bi se ocijenilo stvarno stanje podzemne vode u pojedinim urbanim zonama. Podaci dobiveni iz Središnjeg odbora za podzemne vode (CGWB) pokazuju da je koncentracija nitrata u lokalnim bazenima za praćenje vrlo visoka. Ostali terenski parametri iskazani u izvještajima CGWB-a, kao što su vrijednost pH, ukupna tvrdoća (TH) i ukupne otopljene tvari (TDS), itd, unutar su dopuštenih granica, osim u nekim manjim zonama.

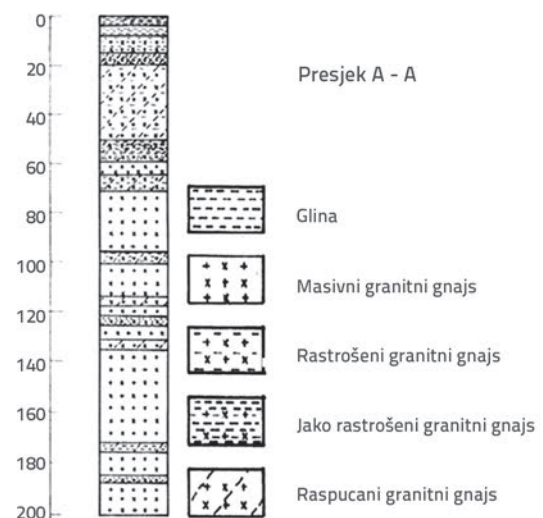
Grad je dobio ime po rijeci Nag (slika 1.) koja sada postaje jedan od glavnih izvora onečišćenja, što negativno utječe na kakvoću podzemnih voda u gradskom području. U stvari, u proteklom je desetljeću ta rijeka postala pravi kanalizacijski kanal zato što se u nju ispuštaju netretirane otpadne vode iz kućanstava, peradarskih farmi, malih industrijskih postrojenja itd. Rijeka Nag svojim tokom presijeca grad od zapada prema istoku. Rezultati kemijskih analiza pokazuju da se veće koncentracije nitrata bilježe u zonama pored rijeke Nag i u istočnom dijelu grada pored Bhandewadija (odlagališta otpada) [20]. Kruti se otpad prikuplja s raznih lokacija u gradu Nagpuru te se odlaže na spomenutom odlagalištu Bhandewadi (slika 1.). Proces infiltracije u tom području uzrokuje prodor štetnih tvari koje onečišćuju podzemne vode. Upravljanje podzemnim vodama i planiranje potrebnih radnji otežano je zbog činjenice da ta voda nije vidljiva u prirodi. Djelotvornije radnje moguće su na regionalnim razinama pri čemu se u obzir uzimaju lokalni parametri. Ocjenjivanje osjetljivosti podzemnih voda na području grada Nagpura treba provesti zato da se omogući izrada djelotvorne razvojne politike u ovom segmentu.

Na temelju prije spomenutih studija i podataka iz dostupne literature može se zaključiti da u proteklom razdoblju nije za podzemne vode provedeno ni jedno znanstveno istraživanje bazirano na analitičkom mrežnom procesu (ANP) i metodi DRASTIC. Ovo je istraživanje provedeno kako bi se ocijenila osjetljivost podzemnih voda u Nagpuru primjenom metode DRASTIC te njenih modifikacija, što uključuje uvođenje odgovarajućeg algoritma ANP-a.

2. Karakterizacija analiziranog područja

Grad Nagpur nalazi se u geografskom središtu Indije koje nosi oznaku nulte milje. Geografske koordinate grada su 21°00' - 21°15' N i 79°00' - 79°15' E, a smješten je na nadmorskoj visini od 310 m [21]. Nagpur je centralno urbanizirana aglomeracija

koja obuhvaća površinu otprilike od 218 km², a ima 2.405.665 stanovnika. Područje se stratigrafski sastoji od dekanskih trapova (57 %), arheanske formacije (23 %), gondvanskih stijena (12 %) i lametske formacije (8 %) [22]. Glavnina vodonosnika odgovarajućeg je kapaciteta, a nalazi se u matičnoj stijeni. Sjeverni dio grada karakteriziraju vodonosnici koji uključuju gnajs, granit itd. Vodonosnici pješčenjaka smješteni su u sjeveroistočnom dijelu grada, a prepoznati su po primarnoj i sekundarnoj poroznosti, što povećava njihovu vodonosnost. Lametska formacija prisutna je u središnjem dijelu grada i na potezu između sjevernog i južnog dijela aglomeracije. Geološki je tlo sastavljeno od bazaltnih tokova koji vuku podrijetlo od dekanskih trapova, a odijeljeni su intertrapskim slojevima. Slika 2. prikazuje litološki presjek označen na slici 1., iz kojeg se može dobiti opći dojam o slojevima koji su prisutni u analiziranom području. Topografija grada je strmija na zapadu, a kosine su mnogo blaže do neznatne na istoku. Dva glavna vodna toka koji prolaze kroz grad su rijeka Nag i rijeka Pili (slika 1.). Tok rijeke Nag počinje na jezeru Ambazari. U nastavku se rijeka Nag spaja s rijekom Pili (koja teče od jezera Gorewada) i u konačnici utječe u rijeku Kanhan, a ona se spaja s rijekom Wainganga koja se ulijeva u rijeku Godavari. Za ovaj grad su karakteristična vrlo vruća ljeta s temperaturama koje dosežu i do 45 °C te hladne zime kada se temperatura spušta do 12 °C. Prosječna godišnja količina padalina u ovom području doseže i do 1000 mm.



Slika 2. Litološki presjek A-A [23]

3. Materijali i metode

3.1. DRASTIC

Preklopna i indeksna metoda DRASTIC služi se za ocjenjivanje osjetljivosti podzemnih voda na temelju poznatih svojstava vodonosnika. Analiziraju se sljedeći parametri: dubina do razine podzemne vode (D), infiltracija (R), tip vodonosnika (A),

tip tla (S), topografija (T), utjecaj vadozne zone (V) i hidraulička provodljivost (C). Za ocjenjivanje i ponderiranje parametara koji su već dokumentirani u [8] primjenjuje se postupak Delphi. Parametri su podijeljeni u nekoliko potparametara ovisno o karakteristikama područja. Utjecaj svakog potparametra na osjetljivost podzemne vode ocjenjuje se na ljestvici od 1 do 10. Ponderi od 1 do 5 dodjeljuju se parametrima ovisno o njihovoj važnosti za ocjenjivanje osjetljivosti podzemne vode (tablica 1.). Indeks osjetljivosti (VI) određuje se linearnim povezivanjem svih parametara (jednadžba (1))

$$VI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

gdje je VI indeks osjetljivosti koji se koristi za ocjenjivanje osjetljivosti podzemne vode, a indeksi r i w označavaju ocjene tj. pondere parametara.

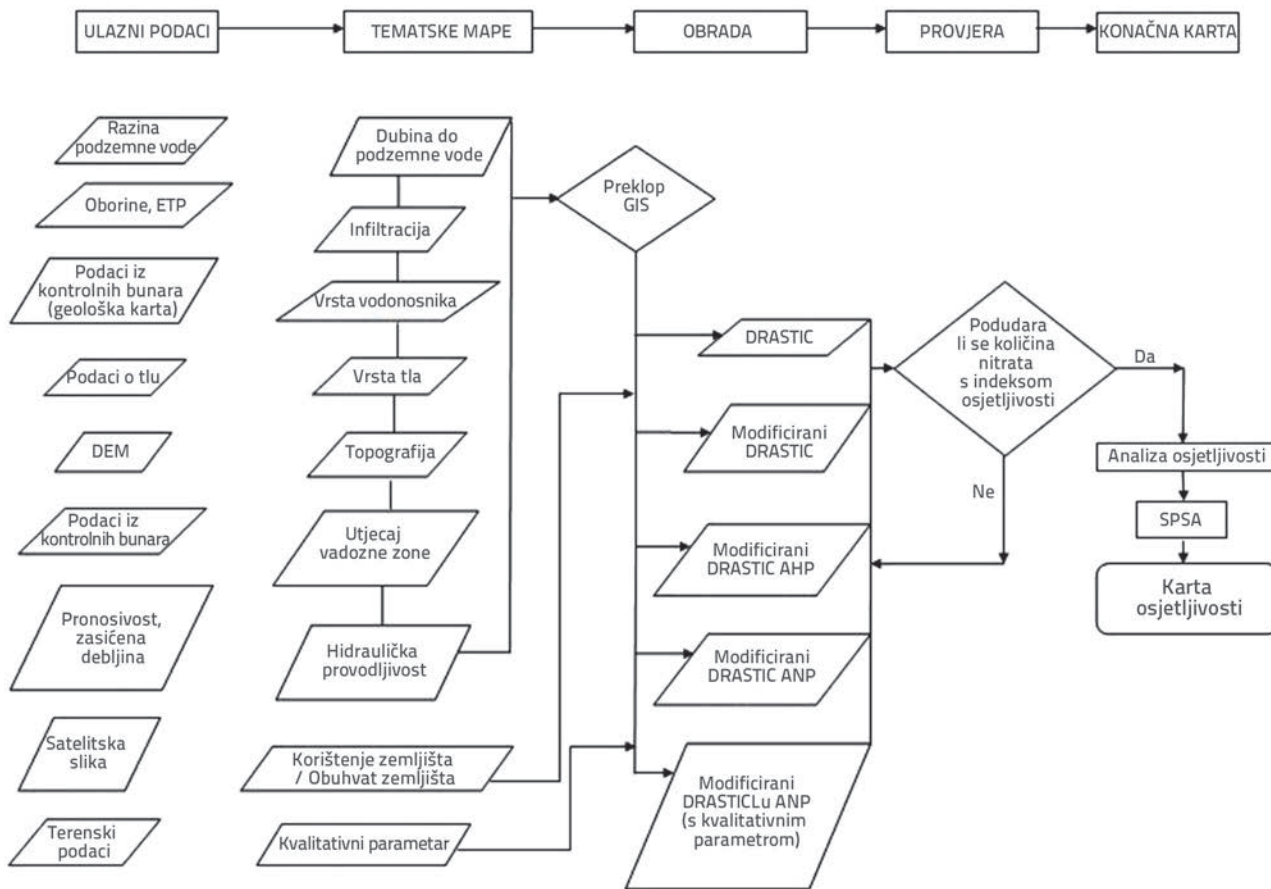
Sve parametarske karte i karte osjetljivosti izrađene su postupkom GIS i pritom je korišten program ArcGIS 10. Dijagram toka prikazan na slici 3. opisuje logički redoslijed aktivnosti koje se provode u okviru metode. Rezultirajuća karta osjetljivosti analiziranog područja podijeljena je na pet zona osjetljivosti s naznakom indeksa osjetljivosti za svaku zonu. Za klasifikaciju karata osjetljivosti primijenjena je Jenksova metoda optimizacije. Metoda DRASTIC može se prilagoditi za razne geološke i

hidrogeološke situacije u svrhu postizanja što točnijeg rezultata. Ovisno o području koje se analizira, mogu se dodati i neki novi parametri ili se pak mogu izbaciti neki od standardno korištenih parametara [5].

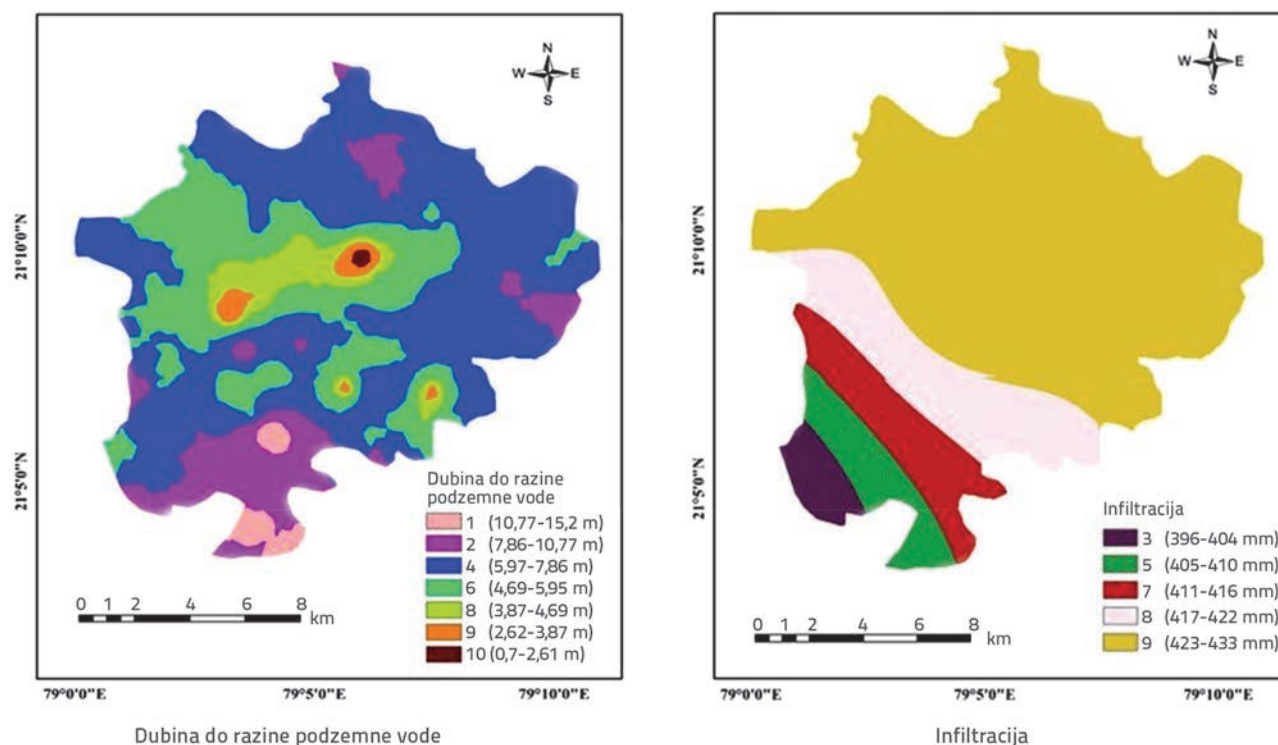
Za ocjenu osjetljivosti grada Nagpura korišteni su kontrolni parametri vodonosnika, a primjenjuje se pristup DRASTIC. Podaci korišteni u postupku dobiveni su od raznih državnih agencije, sa službenih internetskih stranica vlade te pregledom prije provedenih istraživačkih projekata.

Dubina do razine podzemne vode (D)

Dubina do razine podzemne vode je put koji onečišćivač mora prijeći da bi stigao do podzemne vode. Što je veća dubina, manje su mogućnosti da će doći do onečišćenja, i obratno. Za izradu tematske karte korišteni su podaci sa 45 kontrolnih bunara smještenih na različitim lokacijama u gradu. Podaci su dobiveni od Središnjeg odbora za podzemne vode (CGWB). Prikupljeni podaci su statistički diskretne informacije. Za digitalizaciju prostornog variranja razine vode u aglomeraciji korišten je interpolacijski alat Kriging u GIS-u. Definirana dubina do podzemne vode iskazana je u rezoluciji od 2 x 2 m, a dubina varira od 0,7 m do 15,2 m ispod razine tla. Ocjenjivanje je obavljeno primjenom postupka predloženog u radu [8] (slika 4.).



Slika 3. Metodologija primijenjena u ovom radu



Slika 4. Karte s prikazom podparametara i pripadajućih ocjena (D i R)

Infiltracija (R)

Oborine su osnovni izvor prihrane podzemnih voda u analiziranom području. Onečišćivači prodiru kroz površinu tla u vodonosnik tijekom postupka prihranjivanja podzemnih voda. Kao ulazni podaci za proračun korišteni su prosječni petogodišnji podaci o oborinama s obližnjih vodomjernih postaja. Podaci su dobiveni od Indijskog meteorološkog zavoda (IMD). Za potrebe ovog istraživanja izračunana je perkolacija (efektivna infiltracija) i pritom je usvojeno od 30 do 40 posto oborina [10, 24], a za ostale oborine prihvaćeno je da se radi o gubicima zbog isparavanja, transpiracije itd., ili pak o vodi izgubljenoj otjecanjem. Karta infiltracije analiziranog područja izražena je u rezoluciji od 2 x 2 m, a rezultati variraju od 396 mm do 433 mm. Ocjenjivanje je obavljeno prema radu [8] (slika 4.).

Tip vodonosnika (A)

Tip vodonosnika označava stijenske formacije koje mogu osigurati odgovarajuće količine vode te predstavljati vodonosnik u analiziranom području. Kako nisu bile na raspolaganju niti karte niti digitalne baze podataka, u prvom je koraku angažiran hidrogeolog radi izrade hidrogeološke karte na bazi litoloških podataka (CGWB) i topografije. Karta je digitalizirana i unesena u odgovarajući koordinatni sustav, nakon čega su podaci pretvoreni u raster (rezolucije 2 x 2 m) koji zadovoljava potrebe naknadnog postupka. Na analiziranom području uglavnom nalazimo tvrde stijenske formacije kao što su amgaonski gnajski kompleks (metamorfna stijena), neklasificirani-gnajski-tirodijski gnajski kompleks (metamorfna stijena), masivni bazalt (magmatska

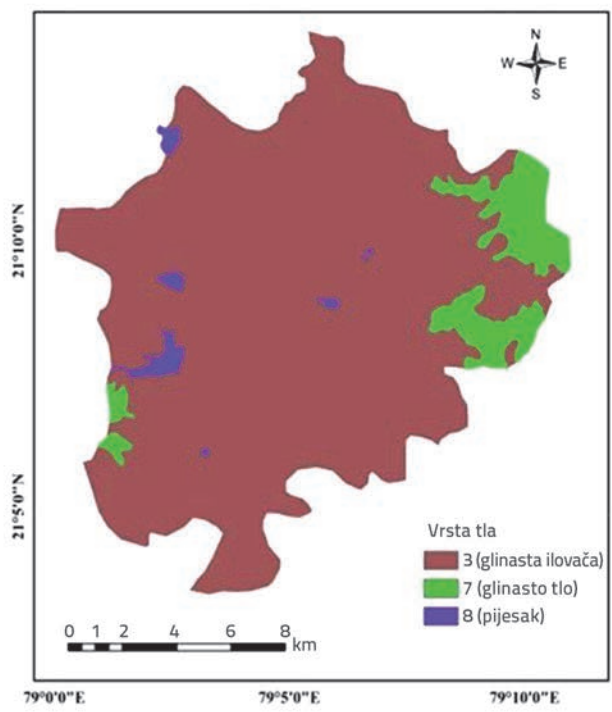
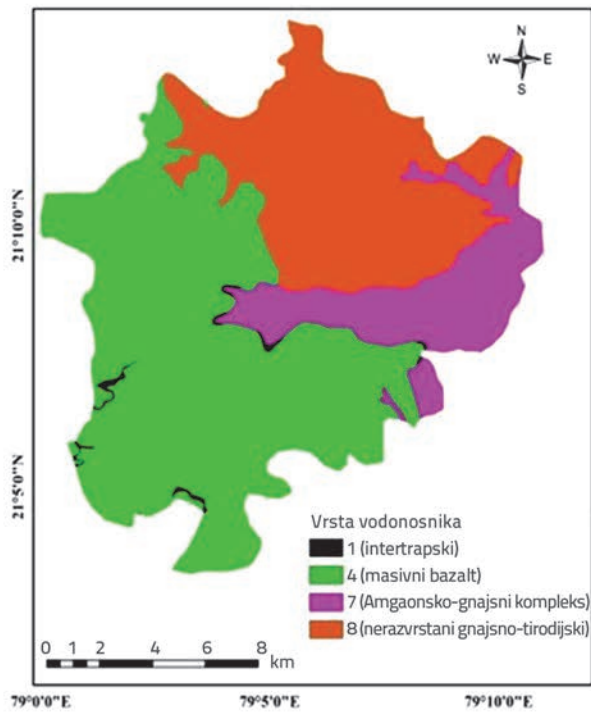
stijena) i intertrapski slojevi. Svi parametri, ocijenjeni prema [8], prikazani su na slici 5.

Tip tla (S)

Tip tla označava površinske slojeve tla koji djeluju kao osnovna zaštita i ograničavaju infiltraciju onečišćivača u podzemnu vodu. Karta tla analiziranog područja u mjerilu 1:50.000 dobivena je od Državnog ureda za geodetska istraživanja tla (NBSS) iz Nagpura. Dobivena karta je skenirana, digitalizirana, rasterizirana (u rezoluciji od 2 x 2 m) i klasificirana pomoću odgovarajućeg klasifikacijskog sustava koji podržava metodu DRASTIC. Materijali su zatim ocijenjeni prema [8] uzimajući u obzir njihov utjecaj na ocjenjivanje osjetljivosti (slika 5.).

Topografija (T)

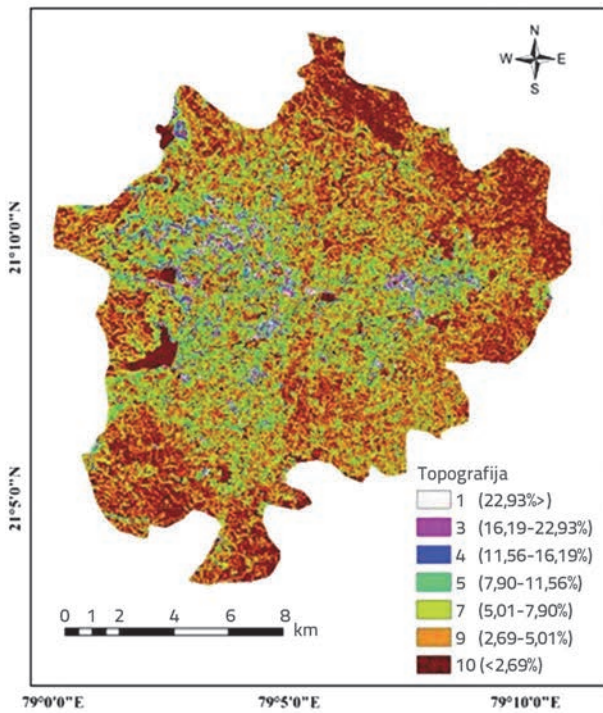
Topografija je izražena kao uzdužni pad (%), a određuje se prema digitalnom modelu visina (Cartosat). Digitalni model visina preuzet je sa službenih internetskih stranica (Bhuvan). Karta je georeferencirana i iskazana u formatu uzdužnih padova pomoću programa za prostornu analizu primjenom ArcGIS-a. Detaljna rezolucija karte je 2 x 2 m. Otpadne vode, ovisno o nagibu terena prodiru u tlo ili otječu. Što je veći pad terena veće je i otjecanje, a manji prodor u tlo jer se otpadne vode kraće zadržavaju na jednom mjestu. Suprotno vrijedi za blage padove. U analiziranom području, pad terena je velik u zapadnoj zoni, a mnogo je blaži u istočnoj zoni. Općenito uzevši, pad varira od 2,69 do 23 % (slika 6.). Ocjenjivanje je obavljeno naknadno na temelju postupka pomoću standardne metode DRASTIC [8].



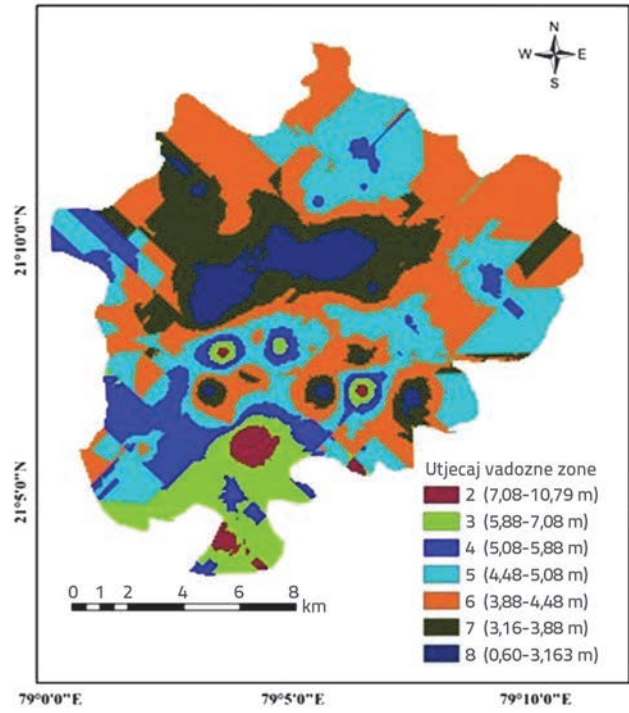
Vrsta vodonosnika

Vrsta tla

Slika 5. Karta potparametara i njihovih ocjena (A i S)

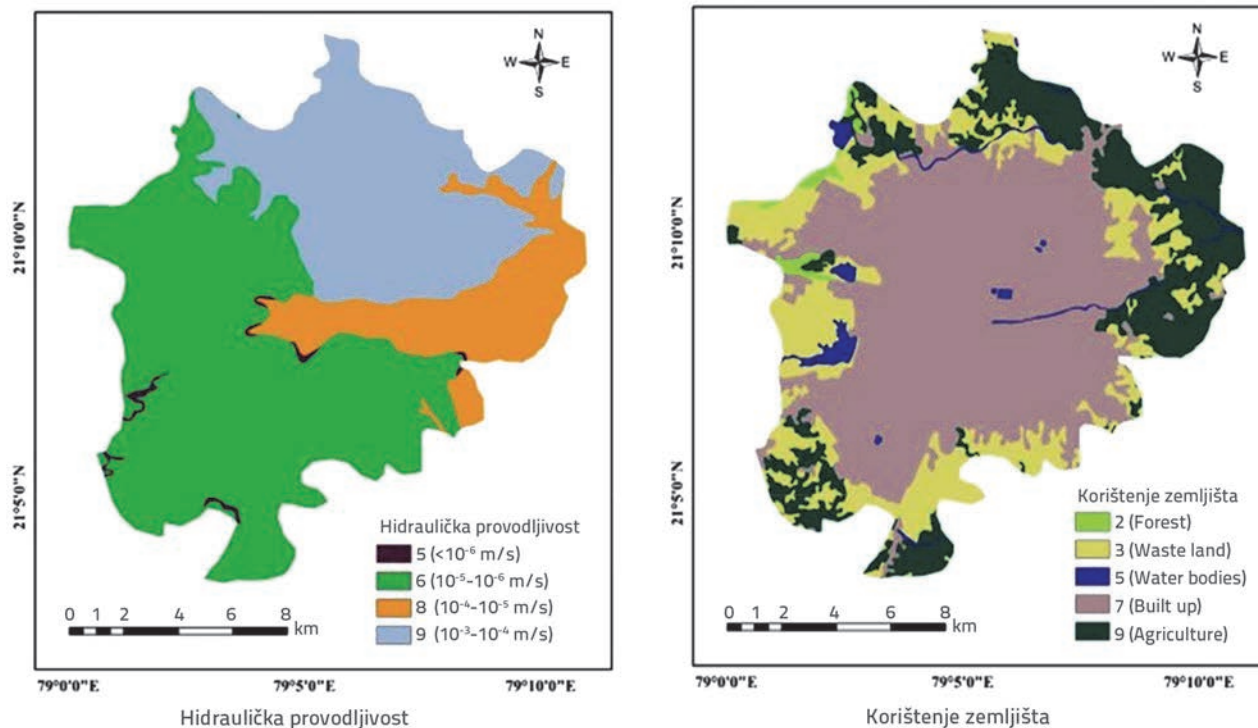


Topografija



Utjecaj vadozne zone

Slika 6. Karte s potparametrima i njihovim ocjenama (T i I)



Slika 7. Karte s potparametrima i njihovim ocjenama (C and Lu)

Utjecaj vadozne zone (I)

Vadozna zona je nezasićena zona koja se prostire između površine tla i vodonosnika. Debljina vadozne zone izračunana je pomoću digitalnog modela visina (DEM) i podataka o dubini podzemne vode [25]. Karta dubine do nivoa podzemne vode generirana interpolacijom ne sadrži topografske varijacije. To se može poboljšati odbijanjem interpolirane dubine od DEM-a dotičnog područja. Veličina ćelije na karti generiranog rastera iznosi 2 x 2 m, a debljina varira od 0,6 m do 10,79 m. Ocjenjivanje se provodi prema radu [8] (slika 6.). Tok je u ovoj zoni više-manje vertikalnan. Što je veća dubina to je manje i onečišćenje. U slučaju razlomljenog stijena, onečišćenje prolazi kroz pukotine i stiže u vodonosnu zonu vrlo brzo.

Hidraulička provodljivost (C)

Hidraulička provodljivost ovisi o sposobnosti pronosa vode u vodonosnik. Karta hidrauličke provodljivosti generirana je na temelju podataka iz kontrolnih bunara, te podataka o transmisivnosti i zasićenoj debljini. Za oba podatka slojnice su digitalizirane te je izrađena slika površine. Zatim je napravljena karta dijeljenjem transmisivnosti sa zasićenom debljinom. Rasterska je slika generirana u rezoluciji 2 x 2 m (slika 7.), a zatim je u skladu s [8] obavljena kategorizacija u kategorije prema DRASTIC-u.

Korištenje zemljišta / obuhvat zemljišta (Lu)

Karta "korištenje zemljišta" (eng. *Land use* - Lu) korištena je s ostalim parametrima primjenom modificirane metode

DRASTIC. Karta korištenja zemljišta izrađena je pomoću satelitskih podataka (LISS III) dobivenih sa službenih internetskih stranica (Bhuvan). Karta je georeferencirana i generirana je rasterska karta rezolucije 2x2 m. Analizirano je područje podijeljeno u pet kategorija: izgrađena područja (56 %), poljoprivredna zemljišta (20 %), neobrađena zemljišta/pustare (21 %), vodna tijela (2 %) i šumska područja (1 %). Svaka kategorija ocijenjena je od 1 do 10, ovisno o njenom utjecaju na osjetljivost podzemne vode (slika 7.).

3.2. Modificirani postupak DRASTIC

Karta osjetljivosti podzemnih voda ocijenjena pomoću standardnog postupka DRASTIC uzima u obzir samo suštinske značajke vodonosnika, neovisno o stvarnim antropogenim aktivnostima na površini [26]. Kako bi se u obzir uzelo stvarno zagađenje, uključen je i izvor zagađenja kao dodatan parametar (korištenje zemljišta / obuhvat zemljišta) Lu. Indeks osjetljivosti izračunat je pomoću modificirane metode DRASTIC izrazom (2), tj. primjenom linearne kombinacije standardnog VI izraza (1) i novog parametra (Lu).

$$MVI = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w + Lu_r Lu_w \quad (2)$$

gdje je MVI modificirani indeks osjetljivosti koji služi za ocjenjivanje kakvoće podzemne vode, a indeksi r i w znače ocjenu tj. ponder parametra.

3.3. Modificirani postupak DRASTIC AHP

Analitički hijerarhijski proces (AHP) dobro je strukturirani postupak za donošenje složenih odluka, a vrlo je djelotvoran za analizu složenih pitanja, pa kao takav pomaže donositeljima odluka u odabiru najboljega mogućeg rješenja. Postupak je razvio Thomas Saaty 1980. godine [27], a koprimjenjivosti se u raznim područjima. Prvobitno je razvijen za područje ekonomije, a kasnije je dodatno razrađen za primjenu u području zaštite okoliša [28-35]. Postupak AHP primijenjen je za modificiranje pondera parametara korištenih u modificiranoj metodi DRASTIC koja je prikazana u ovom radu. Za ocjenu osjetljivosti podzemne vode korišteni su izvedeni ponderi i ocijenjeni parametri. Parametri su uspoređeni na temelju njihovog značenja za ocjenjivanje osjetljivosti podzemne vode. Hijerarhija je uspostavljena rangiranjem parametara na standardnoj ljestvici koja se sastoji od devet razina. Na toj ljestvici razina 1 označava izuzetno nevažne parametre, a razina 9 označava izuzetno značajne parametre. Formirana je matrica za uspoređivanje parametara. Osnovne svojstvene vrijednosti i odgovarajući normalizirani svojstveni vektori korišteni su kao pomoć u donošenju konačne odluke. Koeficijent usklađenosti (CR) matrice predstavlja odnos između indeksa usklađenosti (CI) i indeksa nasumične usklađenosti (RI). Kako bi matrica bila usklađena, vrijednost CR treba biti manja ili jednaka vrijednosti 0,1. Ako to nije slučaj, odgovori na usporedbu trebaju se preispitati. Vrijednost RI dobro je definirana za razne stupnjeve matrice. Indeks usklađenosti (CI) procijenjen je pomoću izraza (3):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

gdje je λ_{max} najviša svojstvena vrijednost matrice reda n .

3.4. Modificirani postupak DRASTIC ANP

Analitički mrežni proces (ANP) zapravo je proširenje metode AHP za višekriterijsku analizu odluka (MCDA) koju je predložio Thomas L. Saaty. Ovdje se umjesto jednostavne hijerarhijske strukture koristi holarhijska struktura [36]. ANP se sastoji od skupova parametara, pri čemu je jedan skup povezan s drugim skupom ili s istim skupom, dok se u postupku AHP sve mreže ocjenjuju samo u jednom smjeru [37]. ANP predstavlja raspored usmjeren prema organiziranju mreža kriterija i potkriterija koji kontroliraju interakciju u strukturi i mreži između parametara i skupova, pa se tako može reći da je AHP poseban slučaj procesa ANP. U ovom radu, ANP se koristi za usporedbu slične usporedbama parova kod AHP-a, a također se koristi ljestvica relativnog značenja koju je razvio Saaty [27]. Svi parametri iz modificirane metode DRASTIC uspoređuju se u parovima u jednom smjeru, a također se uspoređuju i pojedinačni parametri kako bi se dobili što prikladniji ponderi, ovisni o utjecaju pojedinih parametara u ocjenjivanju

osjetljivosti podzemne vode. Sve aktivnosti unutar postupka ANP provedene su pomoću računalnog programa ANP solver 1.0.1 [38]. Saatyjeva metodologija je primijenjena pri izvođenju supermatrice, ponderirane supermatrice i granične supermatrice. Supermatrica mreže sastoji se od prioriternih vektora koji su izvedeni iz matrice usporedbe po parovima. Svaka komponenta tih prioriternih vektora predstavlja utjecaj nekog niza parametara u toj komponenti na bilo koji parametar u mreži. Nakon formiranja supermatrice, izvodi se ponderirana supermatrica. Sve komponente neponderirane supermatrice množe se s ponderom narednog skupa kako bi se dobila ponderirana supermatrica. Granična supermatrica je konvergirana matrica dobivena potenciranjem ponderirane supermatrice na nekoliko razina, čime se dobivaju prioritetni vektori [36]. Kod provjere prosudbenih kriterija matrica, omjer konzistencije (isto kao i kod metode AHP) ne smije biti manji ili jednak vrijednosti 0,1 [39].

3.5. Analiza osjetljivosti

Analizom osjetljivosti (SA) iskazuje se utjecaj pojedinačnih parametara na druge parametre, ali i na ukupnu ocjenu osjetljivosti, što predstavlja značajnu pomoć u postizanju prikladnijih rezultata. Rezultat u postupku DRASTIC varira ovisno u hidrogeološkim uvjetima. Neka prethodna istraživanja pokazala su da se osjetljivost podzemne vode može ocijeniti čak i bez analize svih dokumentiranih parametara postupka DRASTIC [4]. Ovisno o specifičnostima određenog područja, mogu se uvesti novi parametri, tj. mogu se iz istraživanja izbaciti parametri koji nisu dovoljno djelotvorni.

U ovom je istraživanju uz pomoć modificirane metode DRASTIC obavljena jednoparametarska analiza osjetljivosti (SPSA). Teoretski ponder parametra je ponder pripisan svakom parametru na bazi standardnog pristupa opisanog u [8]. Težinska vrijednost parametra je rezultat ocjene i pondera pripisanih pojedinačnim parametrima za ocjenjivanje osjetljivosti podzemne vode [40]. Djelotvorni ponderi svih parametara ocijenjeni su pomoću izraza (4) te su uspoređeni sa svojim odgovarajućim teoretskim ponderima.

$$W = \frac{Pr Pw}{MVI} \quad (4)$$

gdje je W težinska vrijednost parametra, Pr i Pw su ocjena i ponder parametra, a MVI je indeks osjetljivosti koji se koristi u modificiranoj metodi DRASTIC.

3.6. Modifikacija karte osjetljivosti podzemne vode

Osjetljivost podzemne vode u nekom području ocjenjuje se pomoću svojstvenih parametara vodonosnika koji uključuju parametre kao što su infiltracija i postupak ublažavanja utjecaja onečišćenja [41] te dodatni parametar - korištenje

Tablica 1. Standardni i modificirani ponderi za različite postupke prema metodi DRASTIC

Parametar	Ponder			
	DRASTIC	Modificirani DRASTIC	Modificirani DRASTIC AHP	Modificirani DRASTIC ANP
Dubina vode (D)	5	5	0,035	0,029
Infiltracija (R)	4	4	0,160	0,165
Vrsta vodonosnika (A)	3	3	0,198	0,241
Vrsta tla (S)	2	2	0,047	0,055
Topografija (T)	1	1	0,089	0,106
Utjecaj vadozne zone (I)	5	5	0,037	0,032
Hidraulička provodljivost (C)	3	3	0,172	0,205
Korištenje zemljišta/obuhvat zemljišta (Lu)	-	5	0,262	0,166

zemljišta / obuhvat zemljišta - koji u obzir uzima izvor onečišćenja. Onečišćenje podzemne vode ne ovisi samo o izvoru onečišćenja već i o ponašanju onečišćenja u slojevima različitih hidrogeoloških svojstava [42]. Kvalitetni terenski podaci prikupljeni na kontrolnim bunarima obrađuju se interpolacijskim postupkom Kriging u okruženju ArcGIS. Korištenje terenskih podataka izuzetno je značajno u provedbi analiza za ocjenu rizika [43].

U ovom se radu karta osjetljivosti podzemne vode - izrađena pomoću svojstvenih parametara i parametra o korištenju zemljišta - multiplicira s prostornom varijacijom onečišćenja kako bi se u obzir uzela varijacija koncentracije onečišćenja unutar analiziranog područja.

Podaci o kakvoći podzemne vode iz kontrolnih bunara dobiveni su od Nagpurskog odjela indijskog Središnjeg odbora za podzemne vode. Za izradu karte površine s prostornim varijacijama ukupne količine otopljenih krutih tvari (TDS) korišten je interpolacijski postupak Kriging. Prije upotrebe karte terenskih parametara za mijenjanje procijenjene karte osjetljivosti podzemne vode korištena je Jenksova metoda optimizacije za podjelu karte u pet zona prema koncentraciji onečišćenja u odnosu na dopuštene vrijednosti. Karta je zatim normalizirana tako da jedinica na sloju postane bezdimenzijska i mjerljiva primjenom iste numeričke ljestvice. Konačna karta parametara kvalitete dobivena nakon obrade korištena je zajedno s kartom osjetljivosti podzemne vode kako bi se odredila područja prema osjetljivosti na onečišćenje.

4. Rezultati

4.1. DRASTIC

Karta osjetljivosti podzemne vode u analiziranom području izrađena je na bazi sedam ocijenjenih kontrolnih parametara koji se predlažu prema postupku DRASTIC [8] (tablica 1.). Konačni je rezultat preklopna analiza odabranih parametara, izraz (1). Karta osjetljivosti podijeljena je na zone osjetljivosti pomoću Jenksove metode optimizacije u okruženju ArcGIS.

Grad je prema stupnju osjetljivosti podijeljen u pet zona (slika 10.): vrlo visoka osjetljivost (14,20 %), visoka osjetljivost (49,30 %), srednja osjetljivost (19,02 %), niska osjetljivost (10,09 %) i vrlo niska osjetljivost (7,39 %). Rezultirajuća karta osjetljivosti podzemne vode (slika 8.a) pokazuje da su sjeverni i sjeveroistočni dijelovi grada zone visokog rizika onečišćenja, na što upozorava vrlo visoki do visoki pokazatelji osjetljivosti. Srednja osjetljivost zabilježena je u središnjem dijelu grada, a onečišćenje je najniže u južnim i jugozapadnim dijelovima grada, na što upućuje najniži indeks osjetljivosti.

4.2. Modificirani postupak DRASTIC

Kako bi se omogućila što kvalitetnija ocjena osjetljivosti podzemne vode, standardnim parametrima koji se koriste u postupku DRASTIC dodan je i parametar koji uzima u obzir lokalne faktore koji utječu na podzemnu vodu, a radi se o parametru "korištenje zemljišta/obuhvat zemljišta". Indeksna karta osjetljivosti podzemne vode u analiziranom području procijenjena je pomoću osam ocijenjenih parametara i standardnih pondera (tablica 1.), a za to je korišten izraz (2). Koristeći isti postupak, rezultirajuća karta je podijeljena na nekoliko zona osjetljivosti, i to počevši od zone vrlo niske osjetljivosti pa do zone vrlo visoke osjetljivosti. Ako se usporede s rezultatima standardne metode DRASTIC, rezultati dobiveni modificiranom metodom DRASTIC pokazuju da se područje opisano kao zona vrlo visoke osjetljivosti povećava za 10,48 %, zona visoke osjetljivosti smanjuje se za 17,31 %, zona srednje osjetljivosti povećava se za 4,66 %, zona niske osjetljivosti povećava se za 10,48 %, a zona vrlo niske osjetljivosti smanjuje se za 1,80 % (slika 10.). Detaljnom analizom karte osjetljivosti koja se bazira na modificiranoj metodi DRASTIC može se uočiti da se središnja i sjeveroistočna područja grada nalaze u zoni visoke do vrlo visoke osjetljivosti podzemne vode (slika 8.b). S druge se strane može zaključiti da je južno područje grada zaštićeno od onečišćenja, jer i standardna i modificirana metoda DRASTIC pokazuje da su u tom području zabilježene najniže razine osjetljivosti.

Tablica 2. Sažeti statistički prikaz i rezultati SPSA

Parametar	1. stupac			2. stupac		3. stupac		
	Statistički prikaz			Teoretski ponder	Teoretski ponder [%]	Stvarni ponder [%]		
	Min.	Srednji	Maks.			Min.	Srednji	Maks.
D	1	4,47	10	5	17,86	3	13,71	29
R	2	6,94	8	4	14,28	5	17,12	28
A	3	5,69	8	3	10,71	4	10,33	17
S	2	5,63	6	2	7,14	1	2,37	10
T	1	8,22	10	1	3,57	0	4,95	12
I	2	5,51	8	5	17,86	7	17,04	30
C	5	5,69	8	4	10,71	4	10,33	17
Lu	2	6,49	9	5	17,86	6	20,28	43

*Min. = minimalni, Maks. = maksimalni

4.3. Analiza osjetljivosti

Analiza osjetljivosti provedena je pomoću parametara iz modificiranog postupka DRASTIC kako bi se odredio njihov utjecaj na rezultirajuću osjetljivost podzemne vode. Doprinos pojedinačnih parametara u indeksu osjetljivost određen je uspoređivanjem srednjih vrijednosti parametara. Rezultati iskazani u tablici 2. (1. stupac) pokazuju da indeksu osjetljivosti najviše doprinosi topografija, infiltracija i korištenje zemljišta, dok je doprinos ostalih parametara niži (vrsta vodonosnika, hidraulička provodljivost, vrsta tla, utjecaj vadozne zone i dubina do podzemne vode).

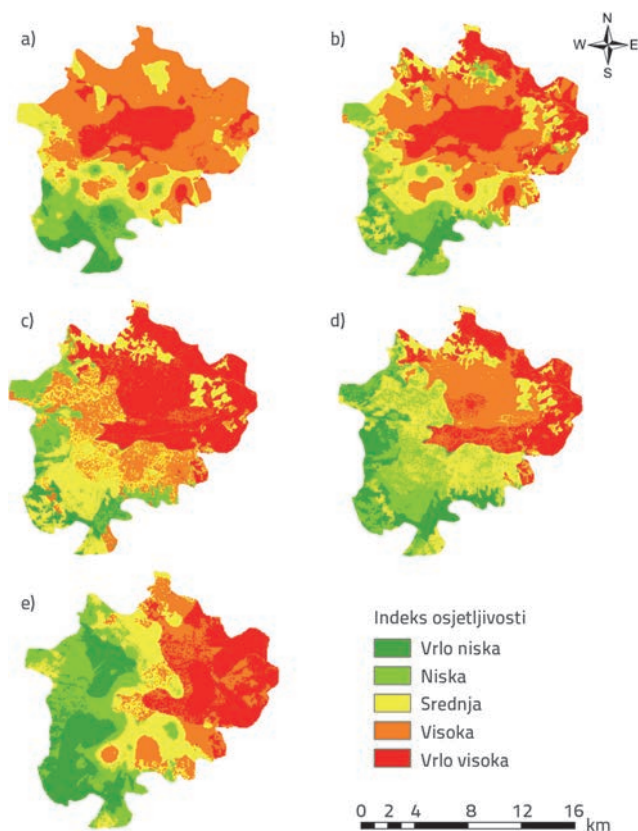
Jednoparametarska analiza osjetljivosti (SPSA) provedena je kako bi se odredili najprikladniji parametri za ocjenu osjetljivosti podzemne vode, i to uspoređivanjem teoretskog pondera s odgovarajućim djelotvornim ponderom parametara. Teoretski ponder, prikazan u tablici 2. (2. stupac) jest ponder koji se primjenjuje na parametre tijekom ocjenjivanja osjetljivosti podzemne vode. Težinska vrijednost parametara ocjenjuje se pomoću izraza (4). Odgovarajući rezultati iskazani su u trećem stupcu tablice 2. Rezultati SPSA (tablica 2.) pokazuju da su infiltracija, korištenje zemljišta i topografija najdjelotvorniji parametri jer su njihove težinske vrijednosti više od odgovarajućih teoretskih pondera, te zato što bitno utječu na ocjenu osjetljivosti. Uočeno je da svi ostali parametri imaju niže težinske vrijednosti u odnosu na teoretske pondere, sa srednjim utjecajem na osjetljivost podzemne vode u analiziranom području. Ustanovljeno je da su u analiziranom području infiltracija i topografija parametri koji značajno doprinose ocjeni osjetljivosti podzemne vode. Kako je infiltracija u analiziranom području gotovo konstantna, smatra se da je to jedan od faktora koji doprinose većem onečišćenju podzemne vode. Topografija područja je heterogena, s većim kosinama na zapadu, a manjim na istoku, što znači da je koncentracija onečišćenja veća u istočnom dijelu grada.

4.4. Modificirani postupak AHP

Analitički hijerarhijski proces (AHP) je metoda višekriterijskog odlučivanja (MCDA), a u ovom se radu primjenjuje za reviziju pondera parametara koji se koriste u modificiranom postupku DRASTIC. Osjetljivost podzemne vode definirana je pomoću ulaznih parametara koji su ocijenjeni pomoću standardnog postupka Delphi. Modificirani ponderi dobiveni su primjenom postupka AHP (tablica 1.). Rezultirajuća karta osjetljivosti podijeljena je na nekoliko kategorija, od vrlo niske do vrlo visoke osjetljivosti, a za to je korištena Jenksova metoda optimizacije. Gradska područja zastupljena u svakom stupnju osjetljivosti mogu se iskazati kao postotak: vrlo visoka osjetljivost (36,03 %), visoka osjetljivost (20,69 %), srednja osjetljivost (27,51 %), niska osjetljivost (10,48 %) i vrlo niska osjetljivost (5,28 %) (slika 10.). Još jednom je utvrđeno da su sjeverna i sjeveroistočna područja grada sigurnija, tj. u tim područjima osjetljivost podzemne vode varira od srednje do najniže (slika 8.c).

4.5. Modificirani postupak DRASTIC ANP

Analitički mrežni proces (ANP) primjenjen je za modificiranje pondera uspoređivanjem parova u nizu parametara, pri čemu se jedan niz spaja s drugim nizom ili s istim nizom. Osjetljivost podzemne vode određena je pomoću svih osam parametara, a ocjenjivanje je provedeno primjenom standardnog pristupa i modificiranih pondera u okviru ANP-a (tablica 1.). Gradska područja zastupljena u svakom stupnju osjetljivosti mogu se iskazati kao postotak: vrlo visoka osjetljivost (20,70 %), visoka osjetljivost (19,26 %), srednja osjetljivost (26,30 %), niska osjetljivost (22,82 %) i vrlo niska osjetljivost (10,91 %) (slika 10.). Srednja do vrlo niska osjetljivost bilježi se na potezu od središnjeg do južnog dijela grada te u zapadnim područjima, dok potez od središta prema sjeveru te sjeveroistočno područje predstavljaju zone visokog rizika jer je tamo osjetljivost vrlo visoka do visoka (slika 8.d).

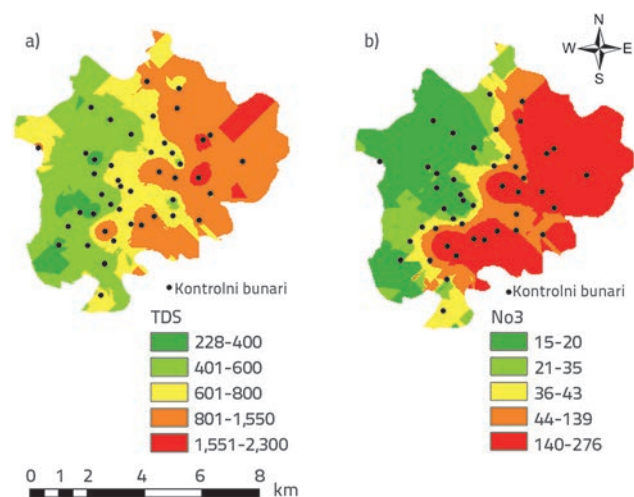


Slika 8. Karte osjetljivosti podzemne vode izrađene prema: a) postupku DRASTIC; b) modificiranom postupku DRASTIC; c) modificiranom postupku DRASTIC AHP; d) modificiranom postupku DRASTIC ANP, e) modificiranom postupku DRASTIC ANP (uključujući i parametar kvalitete)

4.6. Provjera

Karte osjetljivosti podzemne vode generirane za grad Nagpur pomoću postupaka DRASTIC bazirane su na velikom broju parametara i jedinstvene su zbog specifičnih hidrogeoloških obilježja. Zato je potrebna njihova provjera. Za provjeru rezultirajuće karte osjetljivosti podzemne vode (slika 9.b) korišteni su terenski podaci o količini nitrata koji su prikupljeni na analiziranom području. Općenito uzevši, koncentracija nitrata u podzemnoj vodi u normalnim je okolnostima uglavnom zanemariva, a prisutnost nitrata najčešće upućuje na antropogene aktivnosti. Rezultirajuće karte osjetljivosti

izrađene pomoću metode DRASTIC, tj. na temelju modifikacije te metode, provjerene su na bazi koncentracije nitrata, a u tu su svrhu korištene različite korelacijske metode (tablica 3.). Rezultati prikazani u tablici 3. upućuju na viši stupanj korelacije između karte osjetljivosti prema modificiranoj metodi DRASTIC ANP i koncentracije nitrata, ako se ti rezultati usporede s drugim metodama koje su primijenjene u ovom radu. Ako rezultirajuća karta osjetljivosti podzemne vode ne pokazuje odgovarajuću korelaciju s terenskim podacima (količina nitrata), tada se mogu provesti dodatne izmjene kao što su revizija pondera parametara ili uključivanje novih parametara u svrhu boljeg predviđanja zona osjetljivosti.



Slika 9. Karte kakvoće vode: a) ukupne otopljene tvari (TDS); b) količina nitrata (No₃)

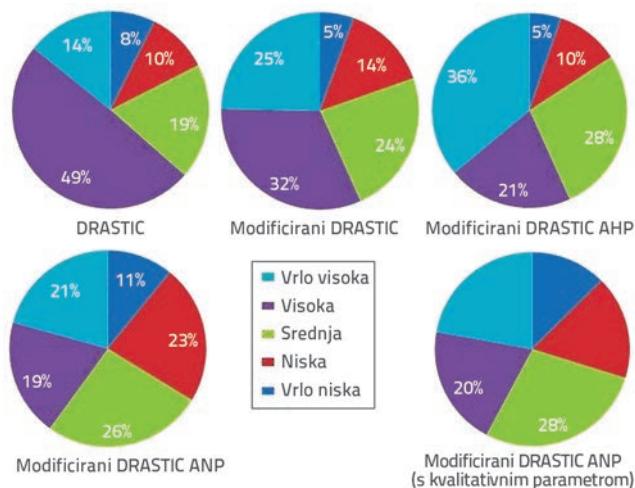
4.7. Izmjena karte osjetljivosti podzemne vode

Karta osjetljivosti podzemne vode izrađena primjenom modificiranog pristupa DRASTIC ANP bolje se podudara s koncentracijom nitrata u gradu od ostalih pristupa koji su primijenjeni u ovom radu. Rezultirajuća karta osjetljivosti podzemne vode dodatno je modificirana primjenom kvalitativnih terenskih podataka. Parametar kvalitete (TDS) prikazan na slici 9.a pomnožen je s rezultirajućom kartom osjetljivosti (modificirani DRASTIC ANP) područja kako bi se dobila realnija karta koja u obzir uzima prostorne varijacije onečišćenja unutar granica grada.

Tablica 3. Korelacija između karata osjetljivosti podzemne vode i koncentracije nitrata

Karta osjetljivosti	Postupak DRASTIC	Modificirani postupak DRASTIC	Modificirani postupak DRASTIC AHP	Modificirani postupak DRASTIC ANP	Modificirani postupak DRASTIC ANP (s parametrom kvalitete)
Pearsonov koeficijent	0,249	0,310	0,497	0,553	0,736
Kendallov koeficijent	0,130	0,154	0,333	0,394	0,691
Spearmanov koeficijent	0,174	0,215	0,462	0,530	0,846

Iz rezultirajuće karta (slika 8.e) vidimo da je osjetljivost vrlo visoka do visoka u sjeveroistočnoj zoni. Osjetljivost je osrednja na potezu od središnjih do sjevernih područja, dok se područja na jugozapadu i jugu smatraju sigurnima jer su njihovi pokazatelji osjetljivosti niski do vrlo niski. Prostorni raspored zona osjetljivosti prikazan je na slici 9. Karta osjetljivosti podzemne vode (slika 8.e) dobivena pomoću modificiranog postupka DRASTIC AHP (s parametrom kvalitete) pokazuje bolju podudarnost s koncentracijom nitrata od ostalih postupaka DRASTIC (tablica 3.).



Slika 10. Zone osjetljivosti prema metodama u ovom istraživanju

Rezultirajuće karte osjetljivosti podzemne vode pokazuju da se u nekim područjima grada bilježi visoka do vrlo visoka osjetljivost podzemne vode. Onečišćenje podzemne vode moglo bi se u gradskom području smanjiti uz primjenu odgovarajućih mjera. Tako bi se na primjer kruti otpad koji se prikuplja u raznim dijelovima grada trebao deponirati na odlagalištu udaljenom od mjesta na kojima obitavaju ljudi, tj. u zoni koja je manje osjetljiva na onečišćenje, naročito na ono koje se odnosi na hidrogeologiju. Trebao bi se također povećati kapacitet postojećeg postrojenja

za pročišćavanje otpadnih voda tako da može djelotvorno postupati sa svim otpadom koji se generira u gradu. Mogle bi se primijeniti i znanstvene metode sakupljanja kišnice kao način prihranjivanja podzemne vode, što bi pomoglo u otapanju onečišćivača.

5. Zaključak

Ocjena osjetljivosti podzemne vode provedena je u gradu Nagpuru pomoću postupka DRASTIC i njegovih izmjena. Primjenom pristupa MCDA, u analizu su uključeni i revidirani ponderi parametara isto i dodatni parametar za korištenje zemljišta. Za poboljšanje ocjene osjetljivosti podzemne vode primijenjeni su postupci ANP i AHP. Dobiveni se rezultati mogu sažeti kako slijedi:

- Karta osjetljivosti otpadnih voda dobivena modificiranim postupkom DRASTIC ANP za analizirano je područje prikladnija od karata dobivenih modificiranim postupkom DRASTIC AHP, modificiranim postupkom DRASTIC i postupkom DRASTIC.
- Analiza osjetljivosti pokazuje da sljedeći parametri bitno utječu na ocjenjivanje osjetljivosti podzemne vode u analiziranom području: topografija, infiltracija i korištenje zemljišta.
- Izmjena rezultirajuće karte osjetljivosti podzemne vode (modificirani postupak DRASTIC ANP), bazirana na kvalitativnim terenskim podacima, pomogla je u izradi pouzdanije karte, na kojoj su bolje definirana područja koja su manje ili više osjetljiva na onečišćenje; postignuta je dobra podudarnost s očitom koncentracijom nitrata.

Za postizanje višeg stupnja točnosti u određivanju zona osjetljivosti podzemne vode, naknadnim bi se istraživanjima trebalo obuhvatiti šire područje te dodatno ispitati na koji način hidrogeološka svojstva i antropogene aktivnosti u susjednim područjima utječu na kvalitetu podzemne vode na području grada Nagpura.

LITERATURA

- [1] Driscoll, M.O., Clinton, S., Jefferson, A., Manda, A., McMillan, S.: Urbanization Effects on Watershed Hydrology and In-Stream Processes in the Southern United States. *Water*, 2 (2010), pp. 605-648, <https://doi.org/10.3390/w2030605>.
- [2] Umar, R., Ahmed, I., Alam, F.A.: Mapping Groundwater Vulnerable Zones Using Modified DRASTIC Approach of an Alluvial Aquifer in Parts of Central Ganga Plain, Western Uttar Pradesh, *Journal Geological Society of India*, 73 (2009) 2, pp. 193-201, <https://doi.org/10.1007/s12594-009-0075-z>.
- [3] Johnson, C.C.: Land application of water-an accident waiting to happen, *Ground Water. Earth science*, 17 (1979) 1, pp. 69-72, <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1979.tb03277.x>.
- [4] Rahman, A.: A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India, *Applied Geography*, 28 (2008) 1, pp. 32-53, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2007.07.008>.
- [5] Sener, E., Davraz, A.: Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey), *Hydrogeology Journal*, 21 (2013) 3, pp. 701-714, <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0947-y>.
- [6] Abdulla, M.A., Nadhir, A.A., Ahmed, A.A., Fadi, L.A., Sven, K.: Modeling the Risk of Groundwater Contamination using Modified DRASTIC and GIS in Amman-Zerqa Basin, Jordan. *Central European Journal Engineering*, 4 (2014) 3, pp. 264-280, <https://doi.org/10.2478/s13531-013-0163-0>.

- [7] Foster, S.: Fundamental concept in aquifer vulnerability pollution risk and protection strateg, *Proceedings and Information*, pp. 69-86, 1987.
- [8] Aller, L., Lehr, J., Petty, R., Bennett, T.: A standardized system to evaluate Groundwater Pollution using Hydrogeologic setting, *Journal of the Geological Society of India*, 29 (1987) 1, pp. 23-37.
- [9] Civita, M., De Maio, M.: Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilita' degli acquiferi all'inquinamento, Bologna: Pitagora Editrice. 1997.
- [10] Gupta, N.: Groundwater Vulnerability Assessment using DRASTIC Method in Jabalpur District of Madhya Pradesh. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 3 (2014) 3, pp. 36-43, <https://doi.org/10.4236/ijr.2016.74043>
- [11] Jang, C.S., Lin, C.W., Liang, C.P., Chen, J.-S.: Developing a reliable model for aquifer vulnerability, *Stochastic Environment Research and Risk Assessment*, 30 (2015) 1, pp. 175-187, <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1063-z>
- [12] Sadeghfam, S., Hassanzadeh, Y., Nadiri, A.A., Zarghami, M.: Localization of Groundwater Vulnerability Assessment Using Catastrophe Theory. *Water Resources Management*, 30 (2016), pp. 4585-4601, <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1440-5>.
- [13] Mimi, Z.A., Mahmoud, N., Madi, M.A.: A Modified DRASTIC Model for Intrinsic Vulnerability Mapping for Karst Aquifers: A Case Study. *Environmental Earth Sciences*, 66 (2012) 2, pp. 447-456, <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1252-0>.
- [14] Bartzas, G., Zaharaki, D., Hernández-Fernández, M.T., Ortego, J.L., Komnitsas, K.: Assessment of Aquifer Vulnerability in an Agricultural Area in Spain Using the DRASTIC Model. *Environmental Forensics*, 16 (2015) pp. 356-373, <https://doi.org/10.1080/15275922.2015.1091407>.
- [15] Kazakis, N., Voudouris, K.S.: Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology*, 525, (2015), pp. 13-25, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.035>.
- [16] Neshat, A., Pradhan, B., Pirasteh, S., Mohd Shafri, H.Z.: Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran, *Environmental Earth Science*, 71 (2013) 7, pp. 3119-3131, <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2690-7>.
- [17] Agarwal, R., Garg, P.: Remote Sensing and GIS Based Groundwater Potential & Recharge Zones Mapping Using Multi-Criteria Decision Making Technique, *Water Resources Management*, 30 (2016) 1, pp. 243-260, <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1159-8>.
- [18] Jaiswal, R., Thomas, T., Galkate, R., Ghosh, N.C., Singh, S.: Watershed Prioritization Using Saaty's AHP Based Decision Support for Soil Conservation Measures, *Water Resources Management*, 28 (2014) 2, pp. 475-494, <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0494-x>.
- [19] Wu, W., Yin, S., Chen, H.L.: Groundwater Vulnerability Assessment and Feasibility Mapping Under Reclaimed Water Irrigation by a Modified DRASTIC Model, *Water Resources Management*, 28 (2014) 5, pp. 1219-1234, <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0536-z>.
- [20] Jain, S.K., Sharma, V.: Contamination of Ground Water by Sewage. Faridabad: Central Ground Water Board, 2011.
- [21] Mandal, D.N.: Government of India Ministry of Water Resources Central Ground Water Board. Nagpur: CGWB, 2011.
- [22] Dhiman, S.C., Kunar, S.: Ground water scenario in major cities of india. Faridabad: Central Ground Water Board, 2011.
- [23] Ranjan, B.: Basic Report of exploratory well (1079/BDR/2001). Nagpur, CGWB, 2002
- [24] Baalousha, H.: Vulnerability assessment for the Gaza Strip, Palestine using DRASTIC, *Environmental Geology*, 50 (2006) 3, pp. 405-415, <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0219-z>.
- [25] Li, R., Zhao, L.: Vadose Zone Mapping Using Geographic Information Systems and Geostatistics A case study in the Elkhorn River Basin, Nebraska, USA. *International Symposium on Water Resource and Environmental Protection*, IEEE pp. 3177-3179, 2011. <https://doi.org/10.1109/ISWREP.2011.5893555>.
- [26] Leone, A., Ripa, M., Uricchio, V., Deak, J., Vargay, Z.: Vulnerability and risk evaluation of agricultural nitrogen pollution for Hungary's main aquifer using DRASTIC and GLEAMS models, *Journal of Environmental Management*, 90 (2009), pp. 2969-2978, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.08.009>.
- [27] Saaty, T.: *The Analytic Hierarchy Process*, New York, McGraw-Hill 1980.
- [28] Triantaphyllou, E., Mann, H.S.: Using the analytic hierarchy process for decision making in engineering applications: some challenges, *International Journal of Industrial Engineering, Applications and Practice*, 2 (1995) 1, pp. 35-44,
- [29] Ramanathan, R.: A note on the use of the analytic hierarchy process for environmental impact assessment. *Journal of Environmental Management*, 63 (2001), pp. 27-35, <https://doi.org/10.1006/jema.2001.0455>.
- [30] Sipahi, S., Timor, M.: The analytic hierarchy process and analytic network process: an overview of applications. *Management Decision*, 48 (2010) 5, pp. 775-808, <https://doi.org/10.1108/00251741011043920>.
- [31] Thirumalaivasan, D., Karmegam, M., Venugopal, K.: AHP-DRASTIC software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. *Environmental Modelling & Software*, 18 (2003) 7, pp. 645-656, [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00051-3).
- [32] Gangadharan, R., Nila Rekha, P., Vinoth, S.: Assessment of groundwater vulnerability mapping using AHP method in coastal watershed of shrimp farming area. *Arabian Journal of Geoscience*, 9 (2016) 107, <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2230-8>.
- [33] Suhua, Z., Guangqi, C., Ligang, F., Yunwen, N.: GIS-Based Integration of Subjective and Objective Weighting Methods for Regional Landslides Susceptibility Mapping, *MDPI Sustainability*, 8 (2016) 334, <https://doi.org/10.3390/su8040334>.
- [34] Achour, Y., Boumezbear, A., Hadji, R.: Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. *Arabian Journal of Geoscience*, 10 (2017) 194, <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2980-6>.
- [35] Calligaris, C., Tariq, S., Khan, H., Poretti, G.: Landslide susceptibility analysis in Arandu area Shigar valley, CKNP (Gilgit-Baltistan-Pakistan). *Advancing Culture of Living with Landslides*, pp. 909-916, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53498-5_103.
- [36] Afzali, A., Sabri, S., Rashid, M., Samani, J.M., Ludin, A.N.: Inter-Municipal Landfill Site Selection Using Analytic Network Process, *Water Resources Management*, 28 (2014) 8, pp. 2179-2194, <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0605-3>
- [37] Saaty, T.L.: Applications of Analytic Network Process in entertainment, *Iranian Journal of Operational Research*, 1 (2009) 2, pp. 41-55.
- [38] ANP Solver, <http://kkir.simor.ntua.gr/anpsolver.html>, 22.04.2016

- [39] Saaty, T.L.: Decision making with dependence and feedback: The Analytic Network Process, Second edition, Pittsburgh, USA, RWS Publications, 2001.
- [40] Babiker, I.S., Mohamed, M.A., Hiyama, T., Kato, K.: A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan, *Science of the Total Environment*, 345 (2005) 1-3, pp. 127-140, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.005>
- [41] Kaddour, K., Houcine, B., Smail, M.: Assessment of the vulnerability of an aquifer by DRASTIC and SYNTACS methods: Aquifer of BazeGeult Zerga area (northeast Algeria). *Journal of Environmental Research and Management*, 5 (2014) 9, pp. 169-179.
- [42] Wang, J., He, J., Chen, H.: Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China. *Science of the Total Environment*, 432, (2012), pp. 216-226, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.005>.
- [43] Jafari, F., Javadi, S., Golmohammadi, G., Mohammadi, K., Khodadadi, A., Mohammadzadeh, M.: Groundwater risk mapping prediction using mathematical modeling and the Monte Carlo technique. *Environmental Earth Science*, 75 (2016) 491, <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5335-9>.