

MONITORING PODZEMIH VODA BELJANIČKOG MASIVA U FUNKCIJI FORMIRANJA MODELA KARSTNOG SISTEMA

Saša MILANOVIĆ, Zoran STEVANOVIĆ, Ljiljana VASIĆ
Rudarsko-geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu

REZIME

Generalno, veoma je teško definisati hidrauličke i fizičke parametre nehomogene sredine kakva je karst. Čak i kada su izvedena obimna istraživanja, rezultati u slučaju karstnih terena ne mogu biti sasvim sigurni i pouzdani. Često nije moguće verifikovati dobijene vrednosti, niti determinisati koji deo karstnih kanala je hidrogeološki aktivan, a koji je van funkcije (npr. zapunjen glinom ili kalcitom).

U radu je glavni fokus usmeren ka terenskim simultanim merenjima izdašnosti i određenih fizičko-hemijskih karakteristika vrela koja dreniraju Beljanički masiv kao i na njihovo "uvezivanje" u 3D model rasprostranjenja karstnih kanala. Zapravo se radi o rezultatima istraživanja u gornjim dostupnim delovima karstne izdani kao što su ponori i ponorske zone, jame, pećine i vrtače i istraživanjima u saturisanom i stalno aktivnom delu karstne izdani odnosno kvalitativno-kuantitativnom praćenju karstnih vrela.

Glavni cilj ovog rada je rekonstrukcija i modeliranje hidrogeoloških karakteristika podzemnih voda složenih karstnih izdani. Pored obimnog terenskog rada u formiranju i interpretaciji modela, korišćeni su kvalitetni i kompleksni programi kao što je ArcGIS (primenjen u izradi ovog rada), koji je omogućio da se izvedu prostorne kvantitativne i kvalitativne analize geneze i funkcionisanja karstnih provodnika.

Ključne reči: karst, monitoring, model, Beljanica, fizičko-hemijske karakteristike, izdašnost

UVOD

Karstni tereni prekrivaju gotovo 12% svetskog kopna. Debljina karbonatnih naslaga na pojedinim delovima Zemlje prelazi više hiljada metara, sa zapreminom od više hiljada kubnih kilometara. Značaj karstnih terena

najbolje ilustruje činjenica da se približno 25% svetske populacije snabdeva pijaćom vodom upravo iz karstnih terena (Ford, 1989).

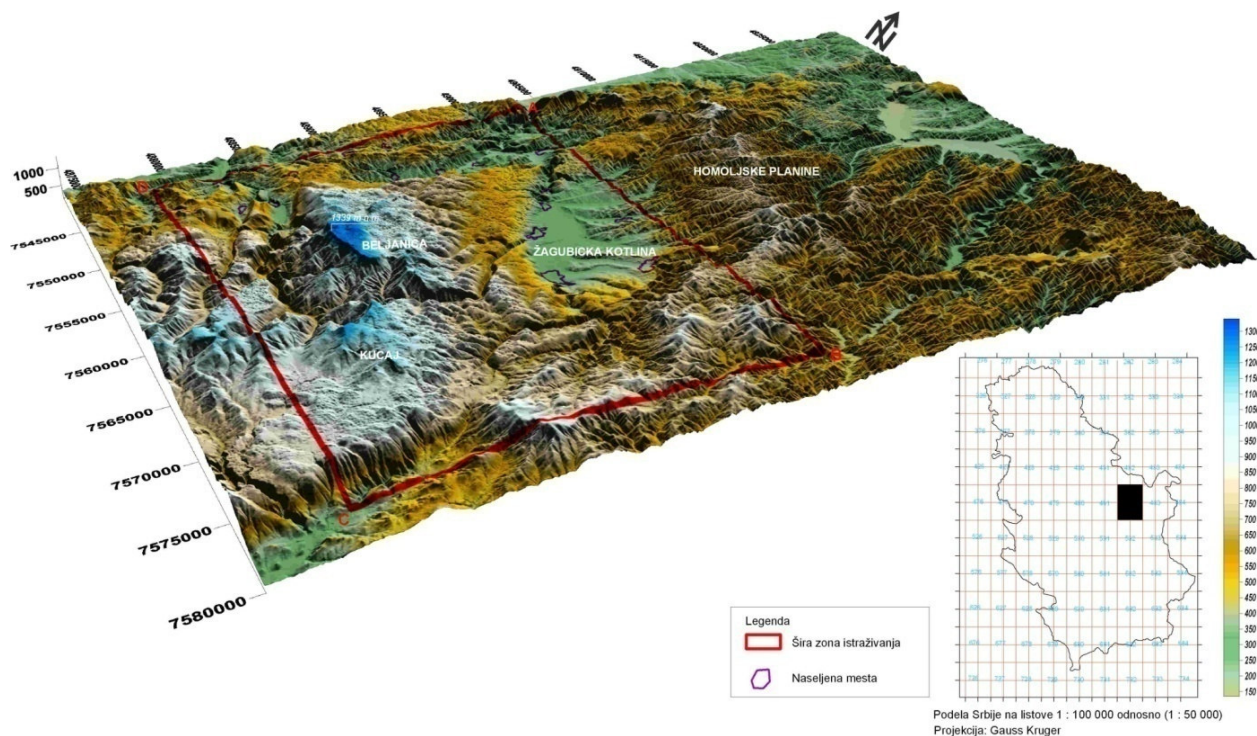
Cilj istraživanja karstne izdani, posebno morfologije njenih glavnih provodnika, može da bude veoma raznovrsan, počev od želje za otkrivanjem novog i nepoznatog, preko istraživanja u turističke svrhe, do isključivo naučnih istraživanja i ispitivanja koja su vezana za rešavanje konkretnog inženjersko-geološkog ili hidrotehničkog problema.

Analiziranje geometrije glavnih karstnih provodnika u saturisanoj zoni, kao i njihova veza sa podzemnim morfološkim objektima iznad nivoa podzemnih voda, treba da omogući uvid u speleogenezu, koja predstavlja osnovu za detaljno poznavanje i predviđanje rasporeda glavnih karstnih provodnika, odnosno mreže karstnih kanala i kaverni.

Podaci o hidrogeološkim karakteristikama podzemnih morfoloških oblika pružaju veoma korisne informacije za interpretaciju rasporeda i rasprostranjenja glavnih karstnih kanala, proučavanje migracije zagađivača, potencijalnih mesta vodozahvata i sl.

Hidrogeološka istraživanja karstnih terena za potrebe zahvatanja podzemnih voda se najčešće fokusiraju na određen uzan prostor zone dreniranja neke karstne izdani. Pri tom su drenažne zone često predisponirane nekim speleološkim objektom sa hidrogeološkom funkcijom. Istraživanjem takvih objekata, ukoliko postoje realni uslovi za istraživanje, dolazi se do podataka koji gotovo uvek predstavljaju glavnu smernicu u pronalaženju najpraktičnijeg i najsigurnijeg rešenja u cilju zahvatanja podzemnih voda.

Analizom različitih parametara dobijenih monitoringom kvalitativnih i kvantitativnih karakteristika podzemnih voda, a kroz formirani fizički model karstne izdani, mogu



Slika 1. 3D model Beljaničkog masiva sa širom zonom istraživanja

se dobiti podaci o vezama prihranjivanja i isticanja voda na Beljaničkom masivu, kao i približna trodimenzionalna slika rasporeda karstnih kanala u unutrašnjosti karstne izdani Beljaničkog masiva.

OPŠTI PODACI O BELJANIČKOM MASIVU

Oblast Beljaničkog masiva nalazi se u istočnom delu Srbije. Beljanica predstavlja severni deo jedinstvenog Kučajsko – Beljaničkog masiva, koji se blago spušta u Žagubičku kotlinu, ujedno granicu Homoljskih i Kučajskih planina, slika 1.

Geografski položaj - Oblast istraživanja čini planinski masiv Beljanice i deo Kučajskog masiva koji zahvata jugoistočni deo istraživanog područja deo Dubašnice do Zlota. Severnu granicu istraživanog terena predstavlja završetak Žagubičkog neogenog basena i početak Homoljskih planina. Zapadni obod predstavlja brdsko područje od Gornjačke klisure na severu do naselja Resavice na jugu, dalje prema zapadu ovaj deo terena produžava do Velikomoravske kotline. Južni obod se prostire preko Kučajskih planina, između kanjona Resavice i Kločanice.

Planinski masiv Beljanice, izgrađen je od karbonatnih stena generalno nagnutih od centralnih ka perifernim delovima masiva. Na istraživanom terenu najviša kота je vrh Beljanice (Piramida), sa nadmorskom visinom od 1339 m n.m. dok je prosečna nadmorska visina između 800 i 900 m n.m.

Hidrografske karakteristike - Istraživanu oblast karakteriše gusta hidrografska mreža po obodima masiva, kao i veliki broj karstnih izvora veće i manje izdašnosti koji dreniraju Beljanički masiv. Sam masiv Beljanice se odlikuje gotovo potpunim odsustvom površinskih tokova. Svi tokovi šire zone istraživanja pripadaju slivovima Mlave i Resave. Prosečna gustina rečne mreže na Beljaničkom masivu koji zahvataju karstni tereni tj. 269 km² i delovi koji pripadaju nekarstnim terenima sa 68 km², prikazana je u tabeli 1.

Tabela 1. Gustina rečne mreže na Beljaničkom masivu

N ^o	Pripadnost formaciji	ΣL km	F km ²	D m/km ²	L _y m
1	Karst	83	269	308	1620
2	Nekarst	128	68	1882	531

gde su:

ΣL - dužina svih prisutnih tokova na datoj oblasti ili slivnoj površini (km)

F - površina date oblasti ili sliva (km²)

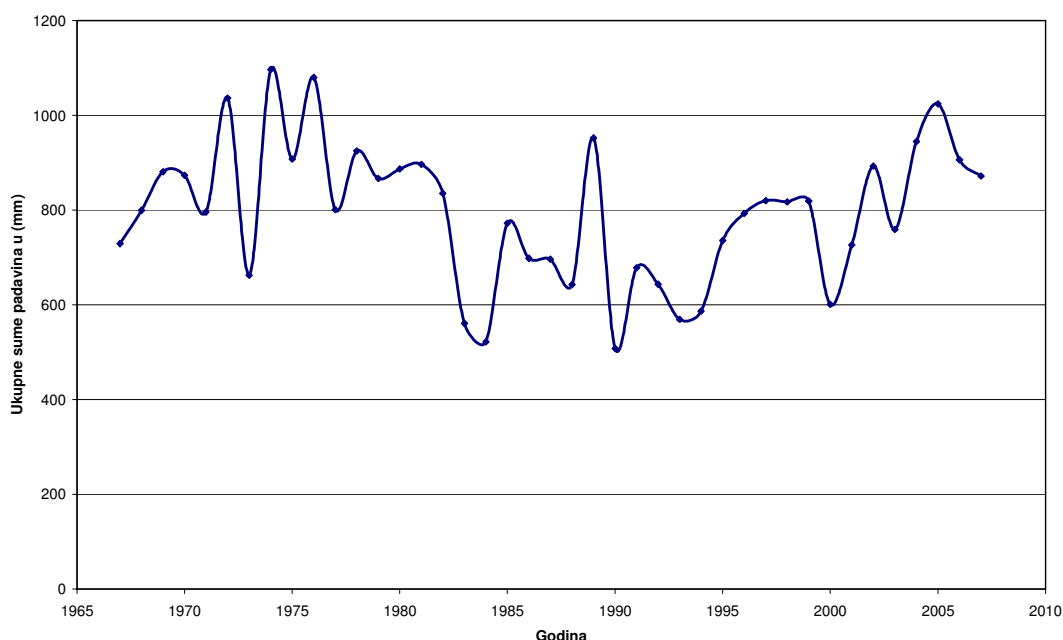
D - gustina rečne mreže (m/km²)

L_y - dužina slivanja padavina niz padine u curcima do stalnih vodotoka, dobija se:

$$L_y = \frac{F}{2 \cdot \Sigma L}$$

Klimatske karakteristike - Oblast Beljaničkog masiva pripada području sa umereno-kontinentalnom klimom, gde se u višim delovima masiva, na visinama preko 800 m javlja prelaz ka planinskoj klimi.

Kao najbitniji element klimatskih faktora na karstnim terenima izdvajaju se padavine. Na osnovu analiziranih podataka za ukupan period od 40 god., prikazano na slici 2., možemo da konstatujemo sledeće. Prosečne godišnje visine padavina za MS Crni Vrh kreću se od 508,7 mm, u ekstremno sušnoj 1990 godini, do 1096 mm u 1974 godini. Prosečna višegodišnja vrednost za osmatrani period kreće se oko 795 mm. Meseci sa najviše padavina su prolećni (april i maj), bez izraženog mesečnog maksimuma, pri čemu je ekstremni mesečni maksimum zabeležen u junu 1986. godine i iznosio je 212 mm. Kao mesec sa ekstremno minimalnim padavinama zabeležen je avgust 1992. godine sa samo 0.1 mm (Ristić, 2007).



Slika 2. Ukupne sume padavina za period 1967-2007. god. (Ristić, 2010)

Geomorfološke odlike terena - Složena geomorfološka građa i prisustvo različitih geomorfoloških procesa, posledica su složene geološke građe ovog područja, kao i Karpato-balkanida uopšte. Istraživani teren možemo generalno podeliti na dve celine. Prva je predstavljena planinskim delom terena izgrađenim od karbonatnih stena, a druga na zapadnom i krajnjem severoistočnom delu nekarbonatnim stenama.

Karst Beljaničkog masiva se odlikuje velikim brojem površinskih i podzemnih morfoloških oblika. Površinski

oblici su veoma dobro razvijeni i imaju široko rasprostranjenje. Po dimenzijama se mogu svrstati u dve grupe i to mikro i makro oblike. Mikrooblici se javljaju praktično u svim zonama karsta. Škrape su posebno dobro razvijene na istaknutim planinskim grebenima i liticama, kao što je južni odsek Beljaničkog masiva. Uglavnom su cm i dm reda veličina i često su zapunjene crvenicom. Mikrooblici su značajni za cirkulaciju, kako atmosferskih, tako i izdanskih voda u karstu, naročito u odsustvu naslaga crvenice (Stevanović, 1981).

Od makrooblika najčešće se javljaju vrtače. One su jedan od nazastupljenijih morfoloških oblika u karstu Beljaničkog masiva i njihova analiza ima značajan težinski aspekt za izradu modela karstne izdani. Rastvaračko dejstvo vode i prisustvo razvijene mreža pukotina i raseda, ima za posledicu formiranje vrtača - udubljenja levkastog, bunarastog, tanjirastog i drugih oblika (Cvijić, 1989), dubine 5-30 m, a širine 10-100 i više metara, kao npr. u uvali Busovate i Rečke.

Ukupno je na Beljaničkom masivu registrovano 1682 vrtača i to sa najvećom površinom od 82440 m², pa do vrtače sa najmanjom površinom od svega 19 m². Najzastupljenije su levkaste jednostavne vrtače, koje su uglavnom metarskih do dekametarskih dubina, sa prečnicima dekametarskog reda veličina (Milanović, 2010).

Nizovi vrtača su verovatno najbolji geomorfološki pokazatelj podzemnog uticaja karstifikacije na površinske oblike. Oni često prate zone glavnih pravaca cirkulacije podzemnih voda u karstu. Nizove vrtača možemo smatrati za celine kod onih delove terena gde tri ili više vrtača (nekada više od 15, pa čak i 20) imaju veoma blisku udaljenost i prostorno mogu oslikavati pružanje nekog potencijalnog karstnog kanala.

Podzemni karstni morfološki oblici imaju veliki značaj kako u izučavanju karstnih terena, tako i u formiranju fizičkog modela karstne izdani i čine osnovu za sagledavanje razvića karstne izdani po dubini. Upravo je masiv Beljanice i poznat po velikom broju najraznovrsnijih podzemnih morfoloških oblika. Do sada ih je registrovano 69 (Milanović, 2010).

Izrada karte speleoloških objekata, intenziteta, zastupljenosti, orijentacije i gustine je na osnovi 1 :

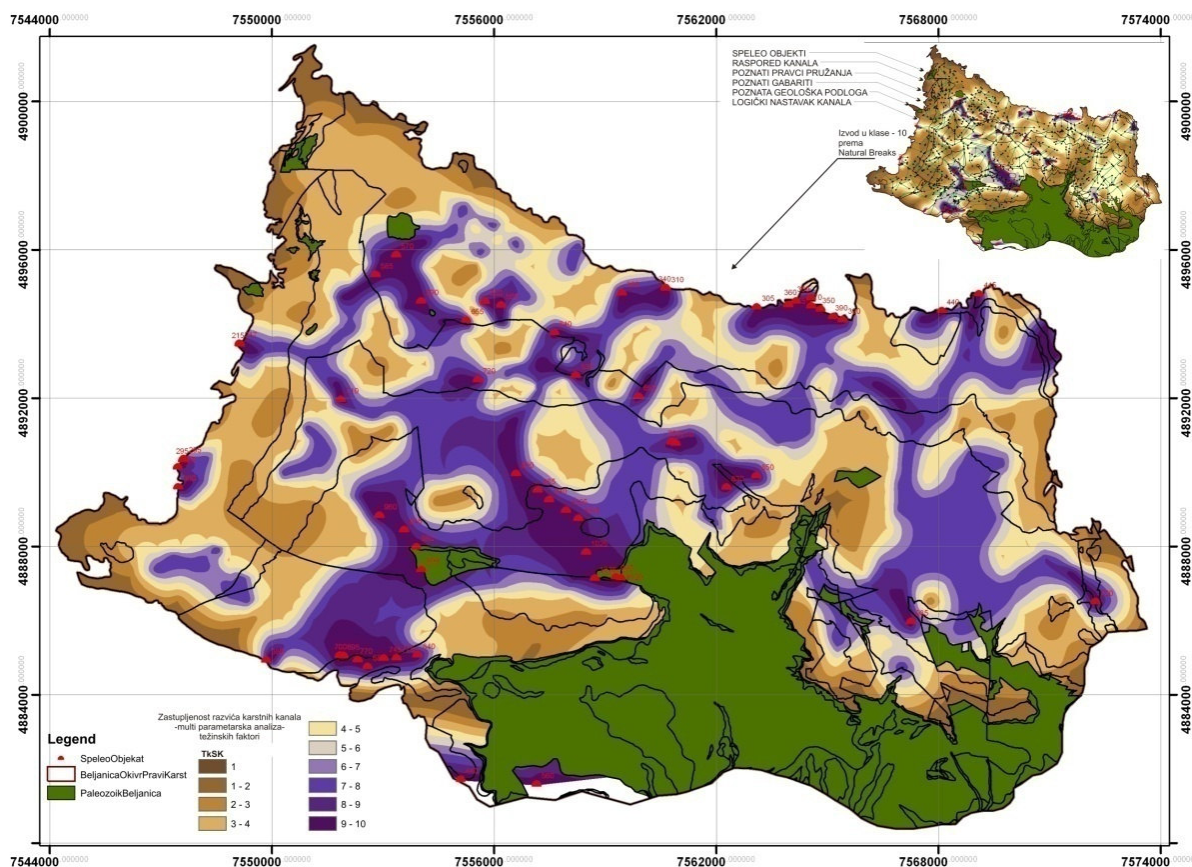
5000 i po završetku je podignuta na nivo 1 : 25 000 i sitnijih razmera, kako bi bilo moguće njeno prikazivanje i interpretacija sa ostalim elementima karstne morfologije. Na slici 3. dat je prikaz rasprostranjenja speleoloških objekata sa prikazom zastupljenosti karstnih kanala na osnovu njihove multiparametarske analize i dobijenih težinskih koeficijenata prikazanih u tabeli 2.

Litološke karakteristike - Beljanički masiv i njegova šira okolina obuhvaćena ovim istraživanjima predstavljen je geološkim formacijama od najstarijih prekambrijskih, do najmlađih kvartarnih tvorevina. Prekambrijske tvorevine predstavljene su uglavnom metamorfita, magmatskog i sedimentnog porekla višeg stepena kristaliniteta, preko kojih transgresivno leže škriljci ordovicijuma, silura i devona. Nakon devona nastaje hijatus u sedimentaciji koji traje sve do perma, dok centralni delovi terena bivaju zahvaćeni tek srednjajurskom transgresijom. Ovaj sedimentacioni ciklus traje sve do kraja donje krede (alb). Tvorevine gornje krede konstatovane su na istočnom obodu masiva u oblasti timočkog andezitskog rova. Tokom tercijera sedimentacija se odvija u izolovanim jezerskim basenima, predisponiranim pretežno tektonskom aktivnošću. U kvartaru, sa formiranjem rečne mreže približno današnjeg rasporeda, nastavljeno je stvaranje aluvijalnih naslaga, kao i drugih produkata savremenih geoloških i geomorfoloških procesa (Stevanović, 1981, 1991).

Gotovo sve vreme taloženja ovih naslaga, odvija se intenzivna tektonska aktivnost, posebno izražena u periodima regresije mora. Ovo je imalo za posledicu stvaranje mnogobrojnih magmatskih intruzija i izliva vulkanita.

Tabela 2. Verovatnoća rasprostranjenja karstnih kanala kroz pregled težinskih koeficijenata u zavisnosti od parametara speleološkog objekta (Milanović, 2010)

Zona - Speleološki objekat/kanal	Težinski faktor-TkSK
Zona oko objekta sa potpuno definisanim kanalima/gabaritima i pružanjem/sa jasno pretpostavljenim daljim nastavkom	10
Zona oko objekta sa potpuno definisanim kanalima/gabaritima i pružanjem	9
Potencijalna zona sa realnom mogućnošću pojave kanala značajnih dimenzija	8
Zona mogućeg razvića karstnih provodnika	7
Zona delimičnog razvića sitnijih karstnih kanala	6
Sekundarno razviće karstne mreže	5
Udaljena zona od cirkulacije podzemnih voda kroz veće provodnike	4
Zone kanala trećeg reda	3
Zona sa slabom mogućnošću razvića karstnih provodnika	2
Zona bez mogućnošću razvića karstnih provodnika	1



Slika 3. Karta zastupljenosti speleoloških objekata na osnovu njihovih težinskih parametara

Hidrogeološke karakteristike Beljaničkog masiva - U okviru Beljaničkog masiva i njegove šire zone, na osnovu hidrogeoloških karakteristika, mogu se izdvojiti nekarbonatni i karbonatni kompleks stenapri čemu je posebna pažnja posvećena karstnom tipu izdani.

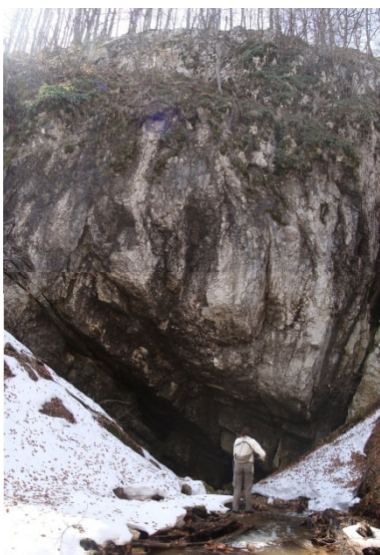
Za potrebe formiranja hidrogeološkog modela jedne karstne izdani kao što je izdan Beljaničkog masiva, bilo je neophodno analizirati sve hidrogeološke aspekte i faktore koji se mogu prikazati u numeričkom i prostornom okruženju. Hidrogeološke karakteristike karstne izdani obrađene su i sortirane (klasifikovane) kroz više različitih baznih osnova, pri čemu je pažnja bila usmerena ka simultanim merenjima izdašnosti i fizičko hemijskih karakteristika glavnih drenažnih zona Beljaničkog masiva.

Predmet posebnog razmatranja ovog rada, pored analize hidrogeoloških svojstava karstnog masiva Beljanice sa ciljem definisanja režima i funkcionisanja karstne izdani, je i formiranje određenih zavisnosti između

circulacije podzemne vode i promene njenih fizičko-hemijskih karakteristika u vremenu.

Osnovni vid prihranjivanja karstne izdani vezan je za infiltraciju voda od atmosferskih padavina koje direktno padnu na karstni teren i infiltriraju se, ili se pak, slivaju u vidu površinskih tokova sa nekarstnih terena. Smer tokova uslovljen je nagibom terena, tako da otiču prema lokalnim erozionim bazisima u različitim smerovima od centralnih delova masiva. Ovi tokovi nizvodnije uglavnom protiču kroz krečnjačke terene. Najveći deo voda se gubi u brojnim ponorima u rečnim koritima, u koritu Crne reke, Male Tisnice ili Suvog Dola, uglavnom u bližoj zoni kontakta karbonatnih i nekarbonatnih stena. Jedan deo većih tokova ne presušuje ni u periodu niskih voda, a sa druge strane konstatovan je čitav niz koncentričnih ponora u koje poniru celokupne količine voda (Ponor Rečke slika 4., Ponor Busovate, Krivulje, Ponor Beljaničke Rečke). U periodu niskih voda, njihovi tokovi se završavaju u ponorima na samom kontaktu sa karstnim stenama kao

što je već pomenuto (Crna reka), ili postepenim poniranjem duž pukotina i izduha na dnu ili po bokovima korita (Velika i Mala Tisnica, Suvi Do, Valja Strnž).



Slika 4. Ponor Rečke

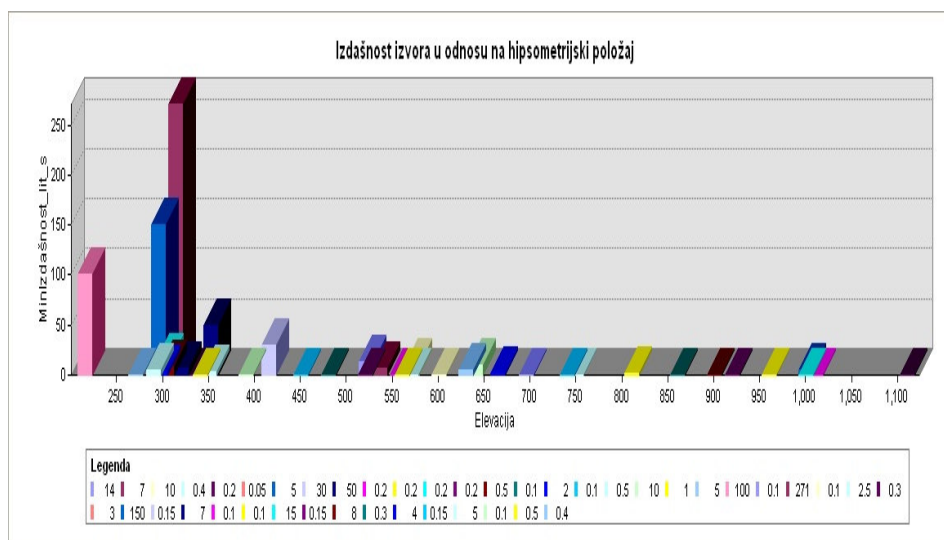
Dreniranje masiva Beljanice se vrši preko velikog broja karstnih vrela i izvora po gotovo celokupnom obodu masiva. Pored površinskog isticanja, karstne izdanske vode ističu i podzemnim putem u druge propusne sredine i to tamo gde hidrogeološki uslovi to dozvoljavaju. To se pre svega odnosi na neogene sedimente Žagubičke kotline na severu. U oblasti Beljaničkog masiva registrovano je 45 karstnih vrela i

izvora. Najveći je broj karstnih izvora koji se dreniraju lokalno iz epikarst zone Beljanice, sa relativno malim izdašnostima koje retko prelaze 0.5 l/s. Pored njih registrovan je i niz izvora i karstnih vrela po obodu Beljaničkog masiva, koji imaju znatno veću izdašnost, a iz pojedinih karstna vrela u minimumu ističe i preko 100 l/s. Registrovana vrela prikazana su u formi histograma na osnovu podataka iz modelske baze (slika 5).

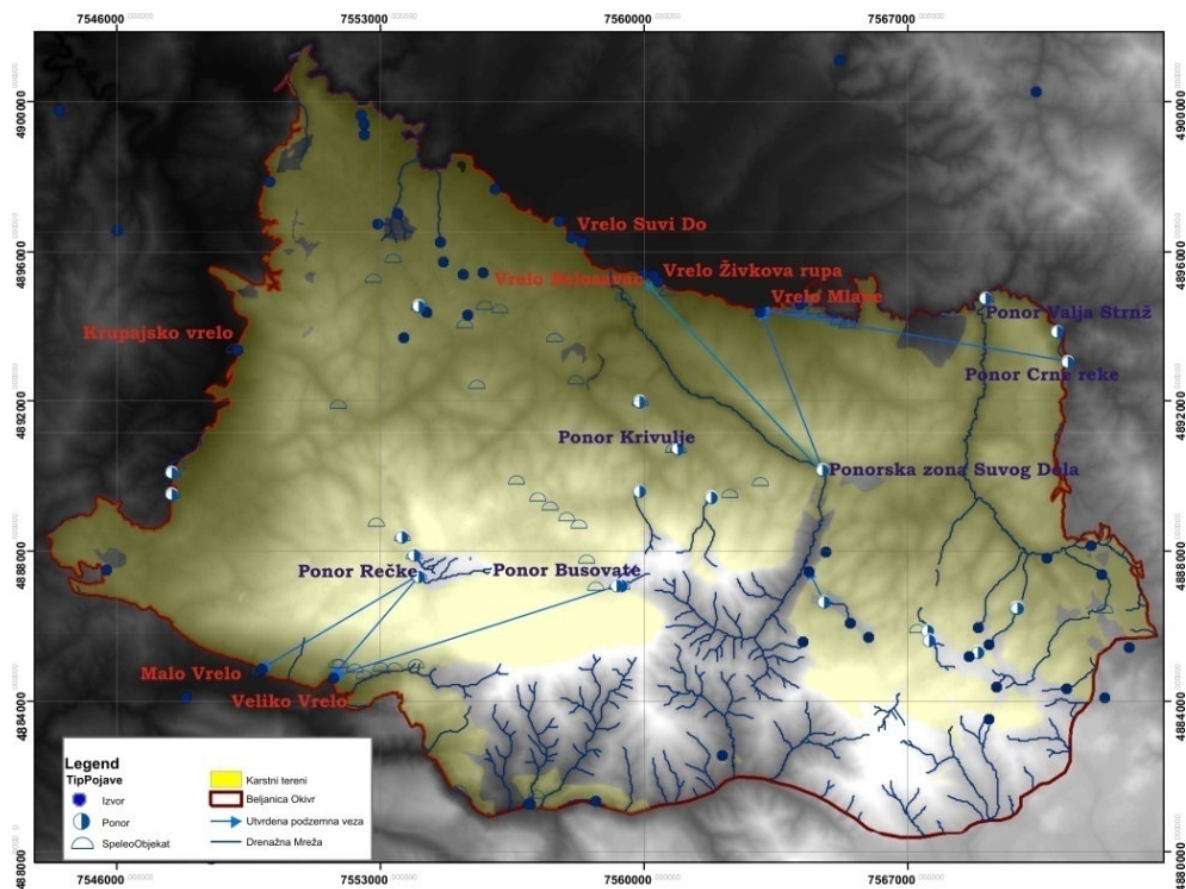
U sklopu realizacije grupe strateških hidrogeoloških projekata koji se realizuju za potrebe sagledavanja bilansa i uspostavljanja monitoringa podzemnih voda u Srbiji od strane Instituta za vodoprivredu "Jaroslav Černi", Rudarsko Geološkog fakulteta i Geološkog instituta Srbije, uspostavljen je i monitoring nad vodnim telom Beljanice. Glavna vrela na kojima se sprovode osmatranja na obodu Beljaničkog masiva su:

- Vrelo Mlave (izdašnosti i fizičko-hemijske karakteristike)
- Vrelo Belosavac (izdašnosti i fizičko-hemijske karakteristike)
- Vrelo Živkova Rupa (izdašnosti i fizičko-hemijske karakteristike)
- Vrela Suvi Do (fizičko-hemijske karakteristike)
- Krupajsko vrelo (izdašnosti i fizičko-hemijske karakteristike)
- Malo Vrelo (izdašnosti i fizičko-hemijske karakteristike)
- Veliko Vrelo (izdašnosti i fizičko-hemijske karakteristike)

Položaj glavnih ponora i izvora Beljaničkog masiva dat je na slici 6. ovog rada.



Slika 5. Histogram karstnih izvora Beljanice na osnovu njihove izdašnosti i hipsometrijskog položaja



Slika 6. Položaj ponora i karstnih vrela Beljaničkog masiva sa optima trasiranja utvrđenim podzemnim vezama

3D MODEL RASPROSTRANJENJA KARSTNIH KANALA BELJANICE

Formiranje modela karstnog sistema Beljanice i njegova analiza treba da dokaže, da se sa jasnom kvantifikacijom i upotrebom novih softverskih alata u sprezi sa kvalitetnim podacima uporednog simultanog monitoringa podzemnih voda, može ući u znatno sigurnije predviđanje rasprostranjenja nedostupnih delova karstnog podzemlja i analizu njegove speleogeneze. Za formiranje ovakvog modela neophodan je sistematski pristup, kako u samim istraživanjima, tako i u klasifikaciji i interpretaciji rezultata.

Za izradu modela, kao što je već navedeno u tekstu, odabran je ArcGIS 9.3. i njemu pridruženi, prateći i prilagođeni programi za ovu svrhu. Da bi se model postavio u realne prostorne okvire, treba da su detaljno izrađeni prostorno-površinski slojevi, kao i vremenske serije simultanih merenja, koji su kasnije zajedno činili

podlogu za formiranje modela. Tako povezane podloge i prateće baze čine potpunu osnovu za dalju analizu karstne izdani kroz različite modelske komponente.

Formiranje 3D modela karstnih kanala je konverzija poznatih čvorova pravaca kretanja podzemnih voda iz 2D u 3D model. Samo formiranje modela se vrši preko poznatih faktora, koji su mogli biti upotrebljeni za kreiranje 3D mreže. Jedan od osnovnih parametara je formiranje 3D modela su razlomne strukture i njihovi međusobni preseki. Model pretvaranja 2D u 3D tačaka, odnosno određivanje Z koordinate (uz eventualnu korekciju položaja X, Y koordinata), raden je po principu koji je ustanovljen i razvijen tokom formiranja 3D modela karstnih kanala za potrebe rešavanja procurivanja ispod tela brane Višegrad, koji je kasnije i verifikovan kroz matematički model. (Grupa autora IJČ, 2009).

Podloga potencijalnog rasprostranjenja karstnih kanala ima za osnov definisanje glavnih pravaca i orijentacije

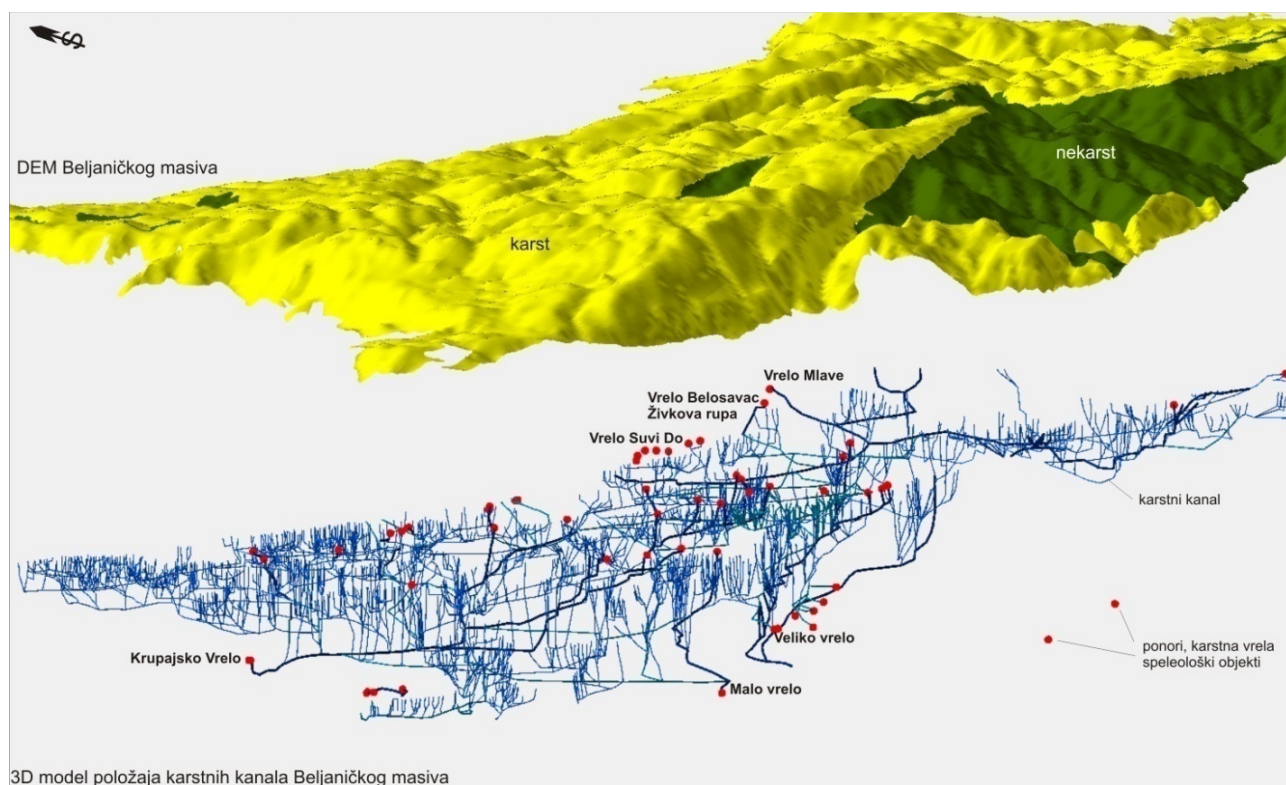
karstnih kanala izdani, koji se sledeći determinističke zakonitosti mogu ustanoviti sa malim procentom greške. Ono što je od značaja za formiranje modela koji će imati i definisane ulazne parametre (izlazni su sve zone isticanja), je da se glavni kanali, odnosno kanali prvog i drugog reda, povezuju sa sporednim kanalima, u funkciji transfera vode od površine terena dublje u podzemlje. Za rešavanje pitanja ulaznih kanala u model iskorišćeni su pored postojećih 69 speleoloških objekata, i podaci 15 ponora kao i svih vrtača na karstnom masivu Beljanice. Analizom površinske morfologije terena u razmeri 1 : 25 000 detektovano je i klasifikovno 1682 vrtača.

Za formiranje 3D položaja kanala za potrebe modela korišćene su i sledeće podloge:

- Površinska 2D podloga rasprostranjenja potencijalnih i utvrđenih karstnih kanala
- Ponori, speleološki objekti i vrtače - kao podloga tačkastih entiteta koji predstavljaju ulazne zone u karstni sistem Beljanice

- Speleokanali - kao ulazni elementi poznatog rasprostranjenja karstnih provodnika u 3D, predstavljeni su kroz linijske entitete - mrežu sigurnih tokova i njihovu pravaca
- Tektonika - kao faktor koji će zajedno sa kartom potencijalnog rasprostranjenja karstnih kanala dati prostorno odnosno vertikalno rasprostranjenje karstnih kanala
- DEM topografije Beljaničkog masiva kao gornja granica vertikalnog rasprostranjenja
- DEM baze karstifikacije Beljaničkog masiva kao donja maksimalna granica dubine zaleganja karstnih kanala

Nakon postavke svih elemenata u 3D okruženje, dobijena je realna prostorno orijentisana mreža potencijalnog pružanja karstnih kanala, koja je poslužila kao ulazni parametar za dalje modeliranje podzemnog karstnog razvića, odnosno položaja i rasprostranjenja podzemnih provodnika (slika 7).



Slika 7. Rasprostranjenje mreže karstnih kanala i njihov 3D prostorni položaj

SIMULTANI MONITORING IZDAŠNOSTI I FIZIČKO-HEMIJSKIH KARAKTERISTIKA VODA KARSTNOG MASIVA BELJANICE

Na području Beljanice je u periodu 2009. i 2010. god., uz stalni monitoring izdašnosti vrela, izveden je i niz simultanih monitoring osmatranja izdašnosti i kvaliteta voda za potrebe definisanja režima karstne izdani Beljanice, odnosno za korelaciju podataka sa prethodno prikazanim fizičkim modelom karstne izdani. Za potrebe formiranja kvalitetne osmatračke mreže Beljaničkog karstnog masiva, bilo je potrebno definisati broj osmatračkih punktova i način njihovog osmatranja. Odlučeno je da se na 5 punktova, odnosno najznačajnijih karstnih vrela, formiraju osmatračke-monitoring stanice, i to letve ili "dajveri" za dnevna osmatranja nivoa voda i merni profili koji će se u različitim hidrološkim uslovima pratiti radi dobijanja što tačnije krive Q/H . Na istim vrelima je, takođe, uspostavljen i monitoring kvaliteta voda, odnosno fizičko-hemijskih i bakterioloških karakteristika podzemnih voda Beljaničkog masiva. Takav monitoring ujedno ima za cilj da se u vremenu uspostavi zavisnost izdašnosti i promene nekih osnovnih fizičko-hemijskih parametara voda karstne izdani.

Podaci dobijeni simultanim monitoringom kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika karstnih vrela koja dreniraju Beljanički masiv su znatno doprineli definisanju unutrašnjih slivnih površina. Takođe su imali značajnu ulogu u praćenju oscilacija nivoa podzemnih voda unutar karstnog sistema i ocene debljine zone saturacije.

Podaci dobijeni ovakvim merenjima pored izvedenih traserskih ispitivanja, kvantifikuju i ulazne odnosno izlazne parametre modela, odnosno služe za njegovu kalibraciju.

Na osnovu hidroloških podataka za šest vrela koja dreniraju Beljanički masiv, (2009-2010), izrađena su dva uporedna dijagrama izdašnosti i padavina osmatranih vrela. Uporedni dijagrami su urađena za vrela koja dreniraju severnu stranu Beljaničkog masiva, i spadaju u grupu dubokih sifonskih vrela, odnosno Mlava, Belosavac, Živkova rupa i Krupajsko vrelo. Dok je za južni obod Beljaničkog masiva, odnosno za Malo i Veliko vrelo, urađen poseban uporedni dijagram, budući da se radi o vrelima koji imaju gravitacioni karakter isticanja. Uporedni dijagrami sa histogramom padavina prikazan je na slici 8.

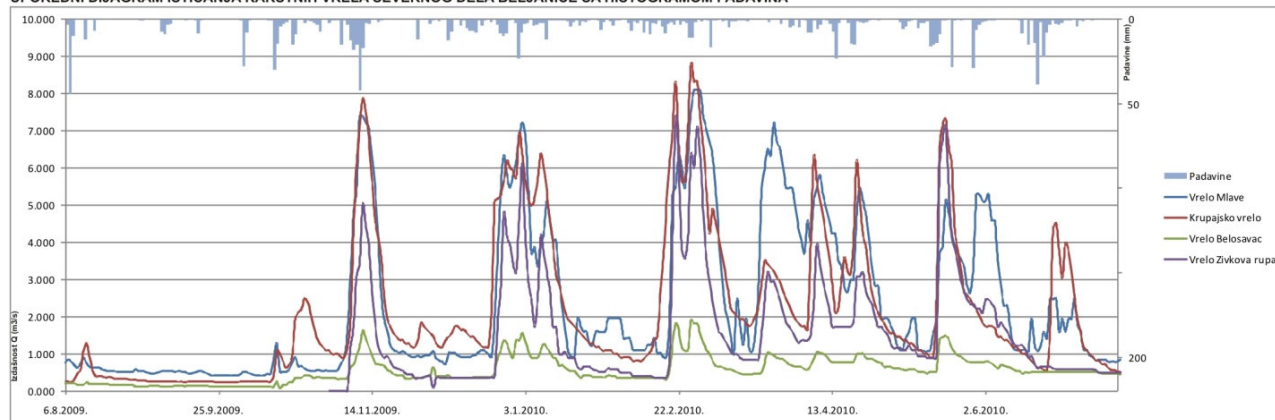
Na osnovu podataka dobijenih tokom monitoringa dobija se da je srednja izdašnost vrela koji dreniraju severni deo Beljanice Q_{sr} 6.113 m³/s, dok je Q_{sr} za južni obod Beljanice odnosno za Malo i Veliko vrelo 1.248 m³/s, što ukupno dovodi do sume srednje izdašnosti celog masiva Beljanice od Q_{sr} 7.361 m³/s. Kada se ovi podaci uporede sa srednjegodišnjim podacima za period 1961-2000., a za vrela Mlavu, Malo i Veliko vrelo, generalno se dobija da je srednji godišnji proticaj perioda 2009-2010., veći u proseku za 20 % od prethodno navedenog perioda. Ovakvi odnosi se mogu pripisati izuzetno kišnoj hidrološkoj godini, kakva je bila u osmatranom periodu odnosno od juna 2009. do juna 2010. god.

Tokom navedene hidrološke godine u periodima različitih hidroloških situacija, pored izdašnosti karstnih vrela, simultano su određivane fizičko-hemijske karakteristike voda. Upravo zbog same specifičnosti karsta, karakteristične strukture terena, odnosno spelogeneze, kvalitativna svojstva vode mogu varirati, uglavnom sezonski. Sve varijacije fizičko-hemijskih karakteristika voda uslovljene su obilnim padavinama ili recesionim uslovima, odnosno minimalnim izdašnostima. Podaci simultanih merenja kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika karstne izdani Beljaničkog masiva dati su u tabeli 3.

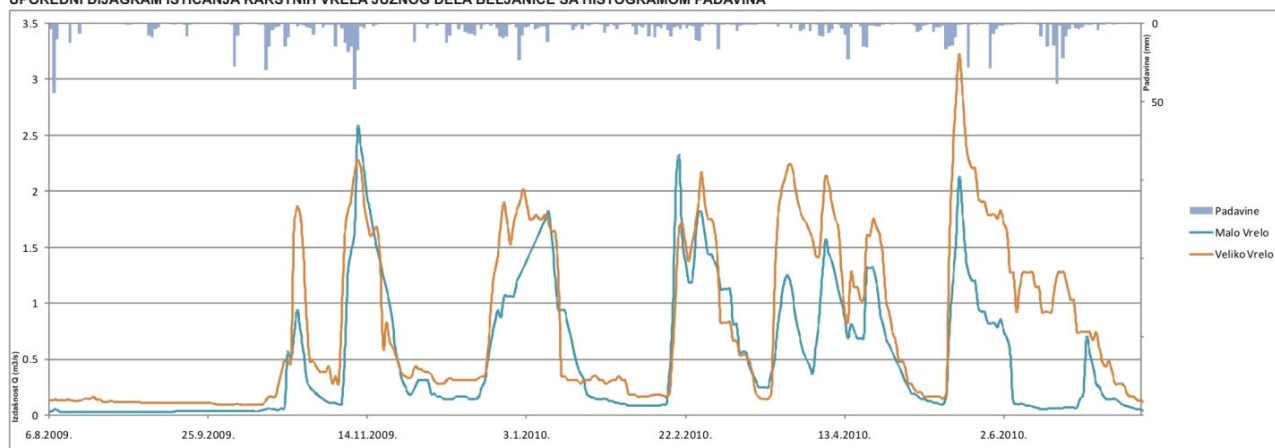
Na osnovu gore navedenih podataka urađeni su uporedni dijagrami izdašnosti i promene pH vrednosti, odnosno temperature kroz vreme (slike 9 i 10). Na dijagramima se uočava da zavisno od izdašnosti vrela dolazi do promene pH vrednosti i temperature, tako što se povećanjem izdašnosti na vrelu Mlave i Krupajskom vrelu povećava i pH vrednost, dok se kod preostalih osmatranih vrela (Belosavac, Malo i Veliko vrelo) sa povećanjem izdašnosti smanjuje pH vrednost, odnosno u recesionim periodima pH vrednost raste i do 8.5. Ovakav porast pH vrednosti u izuzetno sušnom periodu ukazuje na znatan uticaj prihranjivanja sa dela centralnog Beljaničkog masiva, odnosno paleozojskih škriljaca u odnosu na vode koje se filtriraju kroz debeli nadsloj karstnog masiva (epikarst i otvoreni karst). Sa povećanjem padavina i znatnijom infiltracijom dolazi i do opadanja pH.

Za razliku od prethodno pomenutih vrela, kod vrela Mlave i Krupajskog vrela se pri velikim vodama aktiviraju ponorske zone, koje su u drugim hidrološkim situacijama gotovo uvek suve, te se kroz njih površinski tokovi formirani na nekarstnim terenima filtriraju i u manjoj meri menjaju hemizam podzemnih voda.

UPOREDNI DIJAGRAM ISTICANJA KARSTNIH VRELA SEVERNOG DELA BELJANICE SA HISTOGRAMOM PADAVINA



UPOREDNI DIJAGRAM ISTICANJA KARSTNIH VRELA JUŽNOG DELA BELJANICE SA HISTOGRAMOM PADAVINA



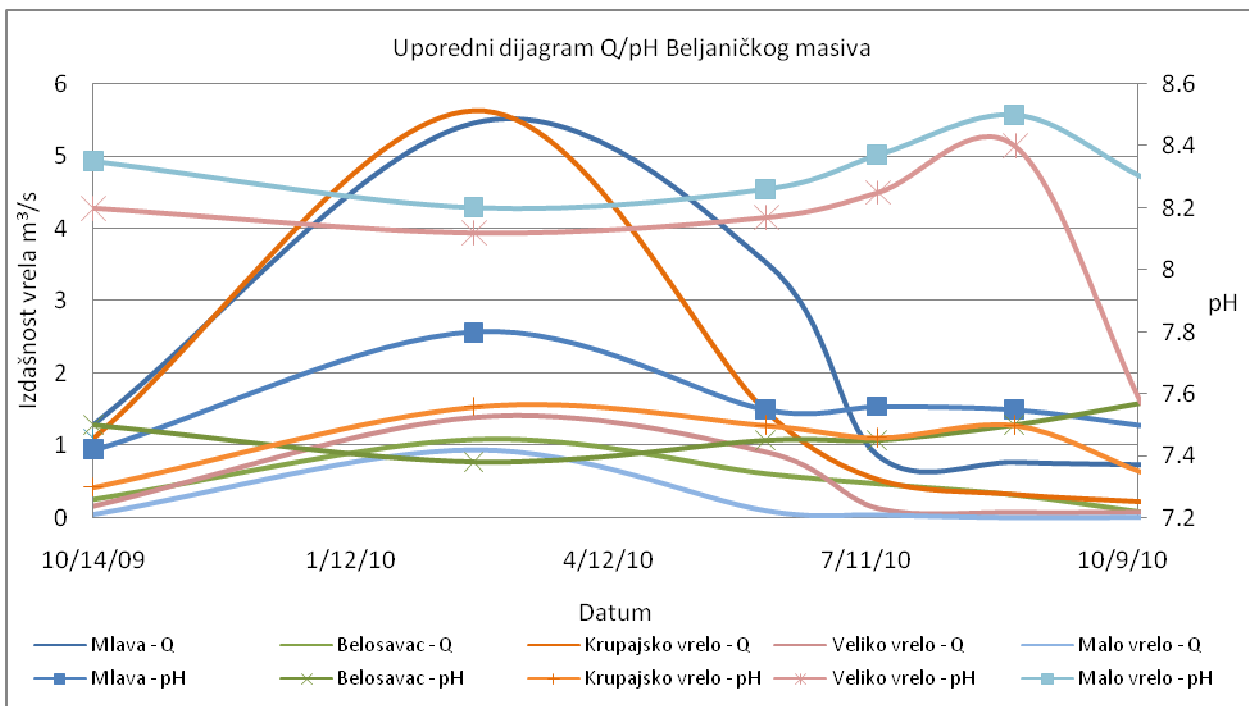
Slika 8. Upporedni dijagram izdašnosti karstnih vrela Beljaničkog masiva sa histogramom padavina

Tabela 3. Prikaz podataka izdašnosti Q (m^3/s), pH, temperature ($^{\circ}C$) i kiseonika (mg/l) (na osnovu simultanih merenja izvršenih u 2009 i 2010 god.

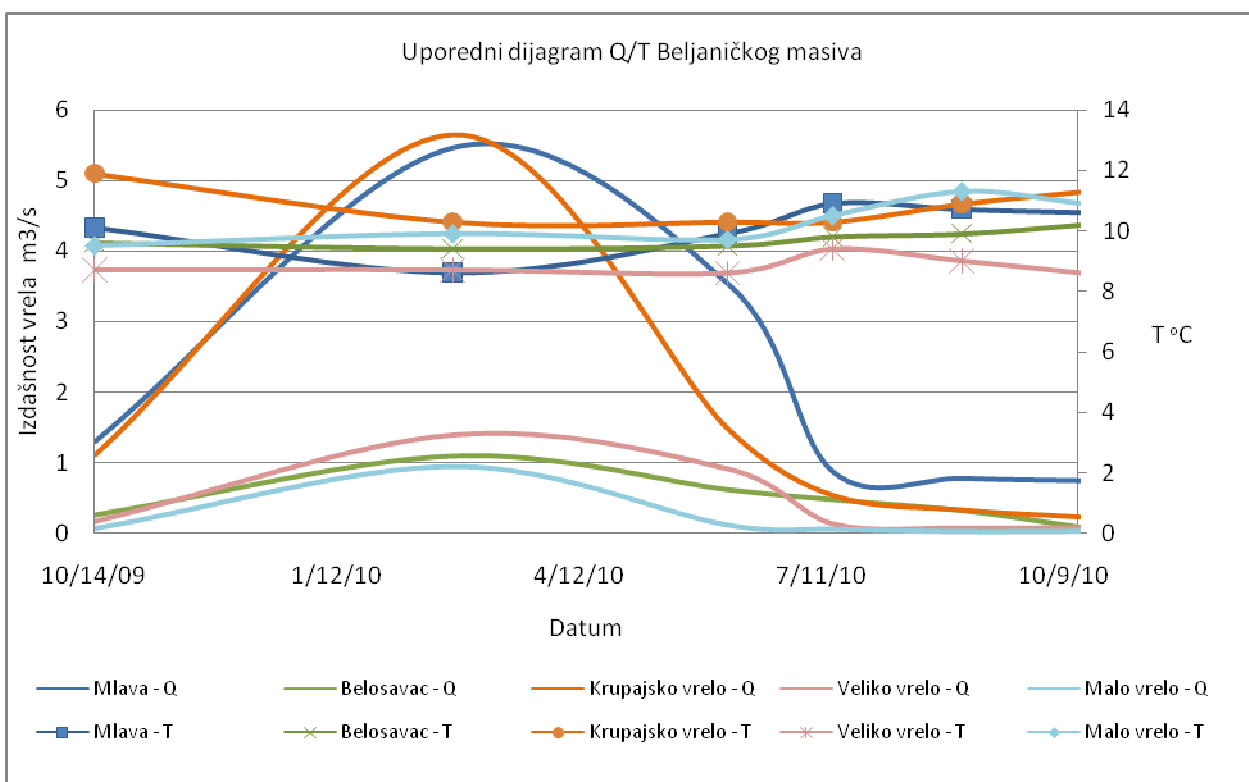
Vrelo	Mlava				Belosavac				Krupajsko vrelo				Veliko vrelo				Malo vrelo				
	Datum	Q	pH	T	O	Q	pH	T	O	Q	pH	T	O	Q	pH	T	O	Q	pH	T	O
	10/14/09	1.29	7.42	10.1	9.82	0.259	7.5	9.6	10.1	1.1	7.3	11.9	9.3	0.169	8.2	8.7	11.54	0.06	8.35	9.5	11.57
	2/24/10	5.46	7.8	8.6	9.81	1.087	7.38	9.4	9.78	5.64	7.56	10.3	9.8	1.398	8.12	8.7	10.15	0.949	8.2	9.9	10.2
	6/6/10	3.53	7.55	9.9	6.25	0.614	7.45	9.5	6.05	1.47	7.5	10.3	6.1	0.916	8.17	8.6	7.03	0.109	8.26	9.7	6.57
	7/15/10	0.86	7.56	10.9	5.1	0.475	7.45	9.8	5.46	0.527	7.46	10.3	5.51	0.137	8.25	9.4	5.93	0.052	8.37	10.5	6.1
	9/1/10	0.77	7.55	10.7	4.3	0.32	7.5	9.9	4.42	0.32	7.5	10.9	3.05	0.08	8.4	9	9.93	0.0157	8.5	11.3	3.29
	10/15/10	0.73	7.5	10.6	3.55	0.085	7.57	10.2	3.43	0.22	7.35	11.3	3.29	0.083	7.57	8.6	3.49	0.02	8.3	10.9	3.46

Takođe se jasno može uočiti i zavisnost temperature i izdašnosti gde gotovo po pravilu sa porastom izdašnosti dolazi do opadanja temperature, odnosno zbog kraćeg zadržavanja vode u podzemlju njena temperatura opada i ostaje više pod uticajem atmosferskih uslova nego ujednačene temperature karstnog podzemlja.

Generalno, može se zaključiti da simultana merenja izdašnosti i određenih fizičko-hemijskih karakteristika vrela ukazuju na vezu prihranjivanja i dreniranja podzemnih voda Beljaničkog masiva, odnosno da njihovom korelacijom zajedno sa opitima bojenja i 3D modelom rasprostranjenja karstnih kanala, mogu da se utvrde ili tačnije odrede hidrogeološke vododelnice, tj. preraspodela voda unutar ove karstne izdani.



Slika 9. Uporedni dijagram promene pH vrednosti u odnosu na izdašnost Beljaničkih vrela



Slika 10. Uporedni dijagram promene temperature podzemnih voda u odnosu na izdašnost Beljaničkih vrela

DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

U okviru karstnih terena Karpato-balkanida, Beljanica spada u „najkompletnije“ karstne terene. Ovo se pre svega odnosi na izuzetno razviće podzemnih i površinskih morfoloških oblika. Registrovano je 69 speleoloških objekata, od čega 20 povremeno ili stalno hidrogeološki aktivnih sa dimenzijama kanala većim od 20 m u prečniku i sa dubinama većim od 150 m. Na Beljaničkom masivu je ukupno registrovano 1682 vrtače. Speleoronilački su istražena i karstna vrela Mlave, Krupaje i Malog vrela od kojih kanali Krupajskog vrela zaležu dublje od 130 m, dok su kanali Mlave istraženi do dubine od preko 70 m. Može se reći da Beljanički masiv ima sve odlike dobro razvijenog karstnog terena, posebno izraženog po privilegovanim pravcima tektonskih dislokacija, odnosno paleo tokova .

Model funkcionisanja karstne izdani dobijen kroz komparativnu analizu 3D modela karstnih kanala i podataka simultanih merenja osnovnih kvantitativnih i kvalitativnih karakteristika podzemnih voda, jasno ukazuje na određene hidrogeološke zakonitosti. Kako je Beljanički masiv veoma komplikovan hidrogeološki sistem, ima za posledicu da pri različitim nivoima podzemnih voda odnosno saturisanosti karstnih kanala, dolazi i do različite preraspodele voda u okviru unutrašnjih podslivova, a takođe i do promene u kvalitativnim karakteristikama voda (što se posebno odražava na pH vrednost, temperaturu, kiseonik, koncentraciju hidrokarbonata i elektroprovodljivost). Kroz ovako postavljenu modelsku analizu, zajedno sa istorijskim podacima, mogu se uspešno analizirati pitanja pravaca cirkulacije podzemnih voda.

Na bazi modelskih i simultanih terenskih istraživanja, konstatovano je da se cirkulacija podzemnih voda Beljaničkog masiva, zavisno od hidrološke situacije, odnosno pijezometarskog nivoa i praćenja kvalitativnih karakteristika, preusmerava u različitim pravcima odnosno da postoji preraspodela voda unutar samog masiva, sa slivnim površinama koje variraju.

Cirkulacija podzemnih voda u okviru Beljaničkog masiva se za male vode odvija gotovo samo u kanalima dubljih delova masiva, dok površinske vode, koje poniru na terenima izgrađenim od paleozojskih škriljaca centralnog Beljaničkog masiva, imaju veliki uticaj na izdašnost Velikog, Malog vrela i vrela Belosavac. Na ovakav zaključak upućuju i podaci

fizičko-hemijskih analiza voda ovih vrela. Povećan pH sadržaj u površinskim tokovima na Beljanici odražava se posebnom kvalitetom voda vrela u periodima malih voda, odnosno, ukazuje na zone prihranjivanja. Suprotno od ovih podataka, povećanje pH vrednosti na Krupajskom i vrelu Mlave prati trend povećanja izdašnosti, što ukazuje da se pri velikim ili većim vodama ovi izvori prihranjuju iz drugih hidrogeoloških struktura.

Drugi podatak dobijen kroz analizu mreže karstnih provodnika i rezultata simultanih osmatranja izdašnosti i fizičko hemijskih karakteristika voda, je da u periodu ekstremnih minimuma najznačajniju funkciju cirkulacije podzemnih voda imaju kanali vezani za ponorske zone površinskih tokova, koji se formiraju na nekarstnim terenima centralnog Beljaničkog masiva.

Nakon korelacije elemenata 3D modela i podataka simultanih osmatranja, dobijena je realna prostorno orijentisana mreža potencijalnog pružanja karstnih kanala, koja je poslužila kao ulazni parametar za dalje modeliranje podzemnog karstnog razvića, odnosno položaja i rasprostranjenja podzemnih provodnika.

Kroz ovakav kompleksan model i njegovu analizu, moguće je definisati hidrogeološke slivove izdani. Najrealnije površine slivova su upravo one koje reprezentuju raspodelu voda po scenariju za srednje vode, odnosno da vrelu Mlave pripada 124 km², Grupi vrela Belosavac, Živkova rupa i Suvi do pripada 27 km², Krupajskom vrelu pripada 85 km², Malom vrelu 7 km², a Velikom vrelu 24 km², (slika 11).

Na kraju, treba još jednom naglasiti da kompleksnim terenskim istraživanjima, rezultatima kontinualnog monitoringa i njihovom korelacijom sa modelskim elementima, može da se na jednom pouzdanom nivou govori o funkcionisanju jednog karstnog sistema.

Rad je rezultat istraživanja, koja su izvedena za potrebe izrade doktorske disertacije S. Milanovića pod nazivom “Formiranje fizičkog modela karstne izdani na primeru Beljanice (istočna Srbija)”, Strateškog projekta Republike Srbije MZZŠPP i Direkcije za vode “Monitoring podzemnih voda Srbije” i međunarodnog projekta SEE “Climate Change and Impacts on Water Supply – CCWaterS”.



Slika 11. 3D prikaz delinacija slivova Beljaničkog masiva; 1 - sliv vrela Mlave, 2 - sliv Krupajskog vrela, 3 - sliv Belosavca, Živkove rupe i Suvog dola, 4 - sliv Velikog vrela, 5 - sliv Malog vrela

LITERATURA

- [1] Cvijić J.: 1989.: Geografija krasi, sabrana dela, knj. 7, Srpska akademija nauka i umetnosti, Beograd
- [2] ESRI. 2003. ArcGIS® 8: The Complete Geographic Information System.
- [3] <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/arcgis8.pdf>. Last Accessed September 2005.
- [4] Ford D., Williams P. 1989.: Karst Geomorphology and Hydrology. Unwin Hyman, London, UK.
- [5] Glennon, J.A. & Groves, C.G., 1997, Application of Morphometric Relationships within the Mammoth Cave Karst Aquifer. Paper presented at the 1997 Annual Meeting of the Kentucky Academy of Science, Morehead, Kentucky, October 1997.
- [6] Grupa autora IJČ, 2009: Parcijalni elaborate o istraživanjima na matematičkom modelu, Projekat sanacije proviranja voda ispod brane hidroelektrane Višegrad, Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Beograd.
- [7] Kincaid T. R. 2006.: *A method for producing 3-d geometric and parameter models of saturated cave systems with a discussion of applications.*
- [8] Milanović S. 2005.: Istraživanje podzemne morfologije karsta za potrebe primenjene hidrogeologije, Magistarski rad, RGF, Beograd,
- [9] Milanović S. 2006.: Hydrogeological characteristic of some deep siphonal spring in the Carpatho-Balkan mountain arch (Eastern Serbia), Archives of Climate Change in Karst, KWI, Baile Herculane, Romania,
- [10] Milanovic, S., Stevanovic, Z. & I. Jemcov, 2010: Water losses risk assessment: an example from Carpathian karst.- Environmental Earth Sciences. 60, 4, 817-830.
- [11] Milanovic, S., 2010.: Formiranje fizičkog modela karstne izdani na primeru Beljanice (istočna Srbija), Dokt. disert, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd.
- [12] Petrović, J. 1986.: Odstupanje hidrološkog od topografskog razvođa u G. Resavi., Zbornik radova odbora za kras i speleologiju, SANU, Beograd.

- [13] *Ristić, V., 2007.*: Razvoj simulacionog modela za proračun dnevnih isticanja iz karstnih vrela, Dokt. disert., Dept. za hidrogeologiju, RGF, Univerzitet u Beogradu.
- [14] *Stevanović Z., 1981.*: "Hidrogeološke karakteristike karsta Kučajsko-beljaničkog masiva sa aspekta mogućnosti korišćenja izdanskih voda za vodosnabdevanje", magistarska teza, Rudarsko-geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu.
- [15] *Stevanović Z., 1986.*: Hidrogeološke karakteristike karstne izdani kučajsko-beljaničkog masiva, Zbornik radova Odbora za kras i speleologiju, II SABU, knj. DLXVIII, Beograd
- [16] *Turner, A. K., E. M. Ervin, and J. S. Downey. 1991.* Evaluation of Geographic Information Systems for Three-Dimensional Ground-Water Modeling, Yucca Mountain, Nevada. in Second Annual International High Level Radioactive Waste Management Conference. American Society of Civil Engineers and American Nuclear Society.

DEVELOPMENT OF KARST SYSTEM MODEL AS A RESULT OF BELJANICA AQUIFER MONITORING

by

Saša MILANOVIĆ, Zoran STEVANOVIĆ, Ljiljana VASIĆ
Department of Hydrogeology, Faculty of Mining and Geology
University of Belgrade, Djusina 7, Belgrade

Summary

Generally, it is difficult to define the hydraulic and physical properties and parameters of karstic rocks and aquifer systems. Although complex and different research methods are applied, in the case of karst terrain, the results cannot be completely ensured and accounted as fully accurate. Most commonly it is not possible to verify the obtained values or to determine which part of the karst channels are active or which are not (e.g. filled with clay or calcite).

The study area is the Beljanica Mountain in Eastern Serbia as a part of Carpathian Balcanic arch (northern Alpine branch). It covers an area of about 300 km², mostly consists of Jurassic and Cretaceous limestones. Several large karstic springs are located in the Beljanica's piedmont along the contact of karstic and non-karstic rocks.

The scope of this paper is to correlate the measurements of those spring discharges with some physico-chemical

characteristics of the spring waters that drain Beljanica massif and to merge them with created the 3D ArcGIS model of karst interior. The results of karst aquifer monitoring (both, quantitative and qualitative) obtained in one monitoring cycle are linked with the results of field and speleological survey (including diving) of the upper non-saturated zone of the karst aquifer (such as sinkholes, pits and the caves) as well as the permanently saturated deeper part of the karst aquifer.

Such an approach enables the reconstruction and modeling of complex karst aquifer, its spatial, quantitative and qualitative speleogenetic analysis, as well as functioning of karst conduits. In addition to, this model enables to create a base for sustainable water management and appropriate utilization of large groundwater reserves.

Key words: karst, monitoring, model, Beljanica, physico-chemical characteristics, discharge

Redigovano 20.11.2010.