

**Univerzitet u Beogradu
Rudarsko - geološki fakultet**

Saša P. Milanović

**FORMIRANJE FIZIČKOG MODELA KARSTNE IZDANI
NA PRIMERU BELJANICE (ISTOČNA SRBIJA)**

Doktorska disertacija

Beograd, 2010

**RUDARSKO GEOLOŠKI FAKULTET
UNIVERZITET U BEOGRADU
ĐUŠINA 7**

Saša P. Milanović

**FORMIRANJE FIZIČKOG MODELA KARSTNE IZDANI NA PRIMERU BELJANICE
(ISTOČNA SRBIJA)**

Doktorska disertacija

Beograd, 2010

Mentor: Prof. Dr Zoran Stevanović, dipl. inž. geol.

Komentor: Doc. Dr Branislav Trivić, dipl. inž. geol.

Član komisije: Prof. Dr Mićko Radulović, dipl. inž. geol.

CREATION OF PHYSICAL MODEL OF KARSTIC AQUIFER ON EXAMPLE OF BELJANICA MT. (EASTERN SERBIA)

Abstract

It is very difficult to define hydraulic parameters in an anisotropic media. Even when many different methods are employed the result in case of karst aquifer cannot be exact and sure. It is neither possible to verify obtained values nor to determine which part of the aquifer's pathway is hydrogeologically active (effective) and which is out of function (e.g. filled with clay or paleokarstic calcite).

In this PhD the focus is more on relatively rarely applied or non-standard methods. First is results of speleology investigations in the upper accessible parts of karst and diving into saturated parts has a very long tradition, a tradition as long, in fact, as the history of karst hydrogeology.

Main target of this work is 3-D reconstruction and modeling of karst physical interior as a new approach in karst hydrogeology. Powerful GIS tools such as Arc GIS, enable fast quantitative analysis and reconstruction of karstic pathways. Taking into consideration the following elements:

- *features at the karst surface,*
- *speleological objects,*
- *tectonic pattern,*
- *results of tracing tests,*
- *position of drainage network, and*
- *interpretation of paleo morphology and hydrography (morphogenesis),*

Furthermore, an approximate calculation of size and volume (storage) of open active voids could also be easily computed. This analysis can include both saturated and unsaturated parts. A variety of software packages for karst conduit modeling (such as Compass etc.) make possible to outline measured data in three dimensions and display data trends and conduit morphology from various angles and inclinations, as well as to calculate the volume and finally obtain effective ("dissolution") porosity data.

Some specific methods are applied to the karstic aquifer of Beljanica aquifer in Eastern Serbia. Spring around Beljanica are the largest in the region and its potential for regional water supply is wary important, including possibly for the suburban area of the state capital of Belgrade (Stevanovic et al. 1986), has been assessed.

The effective porosity and volume of stored water can be roughly calculated from the outflow of the springs, but also by considering the mapped cavernous space in the upper accessible part of the aquifer at Beljanica karst plateau. The most problematic is the zone between these two sections, but with the support of GIS tools and knowledge of karstification development and intensity, this part could be reconstructed, the pathways connected and, finally correlated by analysis of storativity obtained from different methods.

FORMIRANJE FIZIČKOG MODELA KARSTNE IZDANI NA PRIMERU BELJANICE (ISTOČNA SRBIJA)

Abstrakt

Generalno veoma je teško definisati hidrauličke i fizičke parameter jedne nehomogene sredine kao što je karst. Čak i kada je izvedeno niz istraživanja, rezultati u slučaju karstnih terena ne mogu biti posve sigurni i tačni. 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 doktorskoj disertaciji glavni fokus je na do sada relativno retkim primenama nestandardnih istraživanja i metoda. Prvo se misli na rezultate speleoloških istraživanja u gornjim dostupnim delovima karstne izdani kao i speleoroniulačkih istraživanja u saturisanom i stalno aktivnom delu karstne izdani. Iako su ova istraživanja često dosta zanemarivana od strane hidrogeologa oni imaju veoma dugu tradiciju i u samoj hidrogeologiji karsta.

Glavni cilj ovog rada je trodimenzionalna rekonstrukcija i modeliranje fizičkih karakteristika karsta kao novi pristup hidrogeologiji karsta. Kvalitetni i moćni programi kao što je npr. ArcGIS (primenjen u izradi ovog rada) omogućili su da kvantitativna analiza i rekonstrukcija karstnih provodnika može da se izvede a uzimajući u obzir sledeće faktore:

- *površinske karstne forme*
- *podzemne karstne objekte*
- *tektoniku*
- *rezultate opita bojenja*
- *pozicije karstnih kanala i drenažne mreže*
- *interpretacija hidrografije i paleomorfologije itd.*

Dalje, približno izračunavanje veličina karstnih provodnika koji predstavljaju glavne pravce kretanja podzemnih voda kroz formiranje ovakvog modela može da postane znatno jednostavnije. Analize izvedene u ovom radu su uključile podatke i saturisanog i nesaturisanog dela karstne izdani. Kroz različite programske pakete (Compass itd.) upravo modeliranje karstnih provodnika može da pruži izlazne 3D podatke kroz različite uglove sagledavanja, kao i konačno definisanje hidrogeoloških parametara karstne izdani.

Neke specifične metode su bile primenjene u izučavanju karstne izdani Beljanice. Vrela na kojima su primenjene i koji su imali najveći značaj u istraživanjima se nalaze na obodu Beljaničkog masiva i predstavljaju dobar potencijal za regionalno vodosnabdevanje Beograda i mesta na trasi regionalnog cevovoda.

Na kraju može se zaključiti da se analizom različitih parametara a kroz fizički model mogu dobiti podaci o hidrauličkim parametrima i zapreminama dinamičkih i statičkih rezervi, kao i da se može dobiti i približna trodimenzionalna slika rasporeda karstnih kanala u unutrašnjosti karstne izdani Beljaničkog masiva. Najveći problem koji je generalno rešen u ovom radu je popunjavanje podataka između poznatih ulaznih podataka u sistem i izlaznih podataka. Kroz programske pakete kao što je GIS sa znanjem o razviću karsta i njegovim karakteristikama moguće je uraditi rekonstrukciju podzemnog položaja i kasnije ih uporediti kroz različite metode.

UVOD	1
-------------	---

I deo OPŠTE KARAKTERISTIKE KARSTNE IZDANI

1.0 OSNOVNE KARAKTERISTIKE KARSTNIH TERENA	3
1.1. MINERALOŠKE KARAKTERISTIKE KARBONATNIH STENA	3
1.2. PETROGRAFSKE I MEHANIČKE KARAKTERISTIKE KARBONATNIH STENA	6
1.3. POROZNOST	7
1.4. FAKTORI KARSTIFIKACIJE	8
1.4.1. Hemijska erozija (rastvorljivost, korozija)	
1.4.2. Mehanička erozija	
1.4.3. Kolapsiranje - prolamanje	
2.0 GEOLOŠKI I HIDROGEOLOŠKI USLOVI FORMIRANJA PODZEMNIH MORFOLOŠKIH OBLIKA U KARSTU	14
2.1. SPELEOGENEZA KARSTNE PODZEMNE MORFOLOGIJE (INICIJALNA FAZA)	14
2.2. RAZVIĆE PODZEMNE MORFOLOGIJE	17
2.3. HIDROGEOLOŠKI FAKTORI KARSTNOG PROCESA	19
2.3.1. Prihranjivanje	
2.3.2. Cirkulacija	
2.3.3. Dreniranje	
3.0 RAZVIĆE PODZEMNIH MORFOLOŠKIH OBLIKA U KARSTU SA FUNKCIJOM PROVODNIKA	25
3.1. KLASIFIKACIJA PODZEMNIH MORFOLOŠKIH OBLIKA	26
3.2. DIMENZIJE PODZEMNIH MORFOLOŠKIH OBLIKA	30
3.3. MIKRO I MAKRO PODZEMNI MORFOLOŠKI OBLICI	33

II deo METODOLOGIJA FORMIRANJA KONCEPTUALNOG MODELA - OD PROBLEMA DO KONCEPTA REŠENJA

4.0. DEFINISANJE PROBLEMA I METODOLOGIJA FORMIRANJA FIZIČKOG MODELA KARSTNE IZDANI	38
4.1. OSNOVNE POSTAVKE PROBLEMA	39
4.2. RAZRADA MODELA KROZ FAZE	44
4.3. DEFINISANJE NIVOVA ULAZNIH PODATAKA	45
4.4. FORMIRANJE RELACIONE BAZE PODATAKA	46
4.5. FORMIRANJE BEKI - F - MODELA	48
5.0. FORMIRANJE KONCEPTUALNOG MODELA	51

III deo FORMIRANJE PODLOGA I BAZE PODATAKA BELJANIČKOG KARSTNOG MASIVA

6.0. OPŠTI PODACI O ISTRAŽIVANOM PODRUČJU	57
6.1. GEOGRAFSKI POLOŽAJ ISTRAŽIVANOG TERENA	57
6.2. PRIVREDNO-EKONOMSKE ODLIKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA	59
7.0. VEGETACIONI POKRIVAČ I PEDOLOŠKE KARAKTERISTIKE	62
7.1. VEGETACIONI POKRIVAČ	62

7.2. PEDOLOŠKE KARAKTERISTIKE _____	65
7.2.1. Definicija i označavanje pedoloških horizonata i pothorizonata	
8.0. HIDROGRAFSKE I HIDROLOŠKE KARAKTERISTIKE _____	69
8.1. HIDROGRAFSKE KARAKTERISTIKE _____	70
8.2. HIDROLOŠKE KARAKTERISTIKE TERENA _____	74
9.0. KLIMATSKE KARAKTERISTIKE _____	78
9.1. PADAVINE _____	78
9.2. TEMPERATURE _____	81
9.3. VLAŽNOST VAZDUHA _____	83
9.4. VISINA SNEŽNOG POKRIVAČA _____	84
9.5. INSOLACIJA _____	86
10.0. GEOMORFOLOŠKE KARAKTERISTIKE TERENA - površinski oblici _____	87
10.1. DOSADAŠNJA GEOMORFOLOŠKA PROUČAVANJA _____	87
10.2. GEOMORFOLOŠKE KARAKTERISTIKE NEKARBONATNIH DELOVA TERENA _____	88
10.3. GEOMORFOLOŠKE KARAKTERISTIKE KARBONATNIH DELOVA TERENA - POVRŠINSKI KARSTNI OBLICI _____	90
10.4. IZVEDENE ANALIZE MORFOLOGIJE TERENA KAO ULAZNI PARAMETRI MODELA _____	94
10.4.1. Digitalni elevacioni model DEM	
10.4.2. Analiza vrtača	
11.0. GEOMORFOLOŠKE KARAKTERISTIKE TERENA - podzemni oblici _____	103
11.1. ZNAČAJ PODATAKA O PODZEMNIM KARSTNIM OBLICIMA _____	103
11.2. KATASTAR SPELEOLOŠKIH OBJEKATA _____	104
11.3. SPELEOLOŠKI OBJEKTI BELJANIČKOG MASIVA _____	106
12.0. GEOLOŠKA GRADA TERENA _____	226
12.1. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA I STEPEN ISTRAŽENOSTI _____	226
12.2. LITOSTRATIGRAFSKE JEDINICE _____	226
12.3. TEKTONIKA _____	250
13.0. HIDROGEOLOŠKE KARAKTERISTIKE BELJANIČKOG MASIVA _____	256
13.1. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA _____	256
13.2. OSNOVNE HIDROGEOLOŠKE KARAKTERISTIKE NEKARBONATNIH STENA _____	258
13.2.1. Zbijeni tip izdani	
13.2.2. Pukotinski tip izdani	
13.2.3. Uslovno "bezvodni" delovi terena	
13.3. HIDROGEOLOŠKE KARAKTERISTIKE KARSTNOG TIPa IZDANI _____	271
13.3.1. Rasprostranjenje izdani u planu i profilu	
13.3.2. Uslovi prihranjivanja karstne izdani	
13.3.3. Hidrogeološke zone Beljaničkog masiva	
13.3.4. Nivo podzemne vode karstne izdani Beljanice	
13.3.5. Cirkulacija i pravci kretanja podzemnih voda karstne izdani	
13.3.6. Dreniranje karstne izdani Beljanice	
13.3.6.1. Isticanje preko karstnih izvora i vrela	
13.3.6.2. Podzemno isticanje	

14.0. KVALITET KARSTNIH IZDANSKIH VODA	300
14.1. FIZIČKA SVOJSTVA	300
14.2. KARAKTERISTIKE HEMIJSKOG SASTAVA	301
15.0. REŽIM KARSTNIH IZDANSKIH VODA	306

IV deo: KREIRANJE I ANALIZA BEKI - F - MODELA

16.0. PRIPREMA MODELA I BAZE PODATAKA ZA GEO ANALIZE	319
16.1. FORMIRANJE PODLOGA	319
16.1.1. Topografska osnova	
16.1.2. Geološka karta	
16.1.3. Hidrogeološka karta	
16.1.4. Karta rasprostranjenja epikarsta	
16.1.5. Pedološka karta	
16.1.6. Karta analize vrtača	
16.1.7. Karta nivoa podzemnih voda	
16.1.8. Karta rasprostranjenja šume, sitnog rastinja i ogoljenog karsta	
16.1.9. Karta speleoloških objekata sa pružanjem kanala - intenzitet speleoloških objekata	
16.1.10. Tektonska karta	
16.1.11. Karta baze karstifikacije	
16.1.12. Karta nagiba terena	
16.1.13. Hipsometrijska karta položaja ponora, pećina, izvora i karstnih vrela	
16.2. STRUKTURA BEKI-F-MODELA	354
16.3. LOGIČKI MODELA	356
16.4. POVEZIVANJE MODELA	367
16.5. TESTIRANJE MODELA	371
16.6. DEFINISANJE TREĆE DIMENZIJE KARSTNIH PROVODNIKA	378
17.0. ANALIZA BEKI-F-MODELA	383
18.0. PREZENTACIJA REZULTATA I NJIHOVA IMPLEMENTACIJA U KONKRETNU HIDROGEOLOŠKU PROBLEMATIKU ZAŠTITE I ISKORIŠĆAVANJA PODZEMNIH VODA U KARSTU	402
18.1. GENEZA BELJANIČKOG KARSTNOG MASIVA	402
18.2. POTENCIJALNE LOKACIJE I KAPACITETI ISKORIŠĆAVANJA PODZEMNIH VODA BELJANIČKOG MASIVA ZA REGIONALNO VODOSNABDEVANJE	407
18.3. PREDLOG MERA ZAŠTITE PODZEMNIH VODA BELJANIČKOG MASIVA	411
18.3.1. Karta ugroženosti kao osnova za zaštitu podzemnih voda od zagađenja - metoda EPIK	
18.3.2. Određivanje zona zaštite podzemnih voda Beljaničkog masiva	
18.3.3. Monitoring kvaliteta podzemnih voda	

ZAKLJUČAK	419
LITERATURA	

UVOD

Karstni tereni prekrivaju gotovo 12% svetskog kopna. Debljina karsta 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.

Cilj istraživanja karstne izdani a posebno njene morfologije i 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.

Izgradnja raznih tipova vodozahvata, tunela, brana, opiti crpenja iz dubokih karstnih kanala, kao i ostali hidrogeološki i geotehnički zahvati u karstu oduvek su smatrani riskantnim i krajnje neizvesnim poduhvatima. Upravo zbog nedovoljne istraženosti i poznavanja podzemne morfologije dolazi do grešaka, često neuspešnih zahvata, pa čak i do katastrofa za šta postoje brojni primeri kod nas i u svetu.

Nakon obavljenih konsultacija sa prof. Dr. Zoranom Stevanovićem, opredelio sam se da predmet izučavanja u doktorskoj disertaciji bude metodološki pristup i izrada fizičkog modela karstne izdani na osnovu podataka direktnih istraživanja kao ulaznih parametara i njihova korelacija sa ostalim podacima geoloških, hidrogeoloških, geomorfoloških i podacima daljinske detekcije.

Analiziranje geometrije glavnih karstnih provodnika u saturisanoj zoni kao i njihova veza sa podzemnim morfološkim objektima iznad nivoa podzemnih voda, treba da omogući jedinstven uvid u speleogenezu, kao veoma bitnoj osnovi u detaljnom poznavanju i predviđanju 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, za proučavanje migracije zagađivača, potencijalnih mesta vodozahvata, pravaca procurivanja u bokovima i ispod tela brana itd.

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

Predmet istraživanja ovog rada je formiranje fizičkog modela i njegova 3D analiza sa realno predstavljenim kako spoljnim tako i unutrašnjim parametrima koji treba da dokaže da se sa jasnom kvantifikacijom i analizom novim softverskim alatima u sprezi sa novim dostignućima na polju direktnih

istraživanja može ući u znatno sigurnije predviđanje rasprostranjenja nedostupnih delova karstnog podzemlja i speleogeneze.

Drugi segment u izradi modela je izrada algoritma modela koji bi jasno definisao korake odnosno faze u istraživanju, izrade slojeva modela i proces analiziranja podataka i slojeva modela.

Za izradu modela odabran je program ArcGIS 9.3 i njemu pridruženi, prateći i prilagođeni programi za ovu svrhu (Winkarst, Compass itd.).

Izbor karstnog područja, pored raspoloživosti podataka, uslovljen je i određenom reprezentativnošću kao što su tip i načinu prihranjivanja i dreniranja, hidrogeološkim karakteristikama, posebno razvićem podzemnih morfoloških oblika u izdanskoj i nadizdanskoj zoni kao i njenom složenosti. Pored navedenog, izbor karstnog masiva uslovljen je njegovom potencijalnošću u pogledu razvića fizičkog modela i kasnije implementacije u mogućnost iskorišćavanja karstnih izdanskih voda za vodosnabdevanje na regionalnom nivou.

Jedno od najznačajnijih i najperspektivnijih ležišta podzemnih voda je svakako Beljanički masiv pa sam iz tog razloga u dogovoru sa mentorom dr Zoranom Stevanovićem opredelio da naziv doktorske teze bude:

FORMIRANJE FIZIČKOG MODELA KARSTNE IZDANI NA PRIMERU BELJANICE (ISTOČNA SRBIJA)

Rad se sastoji od 420 strana kucanog teksta u okviru kog postoji 352 slika i dijagrama i 68 tabele. Sastavni deo doktorske teze su i 2 priloga.

Posebnu zahvalnost na pomoći pri izradi rada dugujem mentoru dr Zoranu Stevanoviću i komentoru dr Branislavu Triviću koji su uvek nalazili slobodno vreme da zajedno rešimo i prevaziđemo probleme na koje sam nailazio pri izradi ovog rada.