

ODREĐIVANJE DINAMIČKE ZAPREMINE I BILANS KARSTNIH IZDANSKIH VODA VELIKOG VRELA (JUŽNA BELJANICA)

Vesna RISTIĆ VAKANJAC¹, Zoran STEVANOVIĆ¹, Dušan POLOMČIĆ¹, Borislava BLAGOJEVIĆ²,
Marina ČOKORILO¹, Dragoljub BAJIĆ¹

¹ Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-Geološki fakultet

² Univerzitet u Nišu, Građevinsko-Arhitektonski fakultet

REZIME

Dosadašnja hidrološka i hidrogeološka istraživanja karsta i karstnih vrela u Republici Srbiji su se uglavnom bazirala na analizi postojećih rezultata osmatranja i merenja vodostaja i količina isteklih voda. Postojeći korišćeni i analizirani nizovi u većini slučajeva su bili relativno kratkog trajanja (često ispod jedne godine) što je imalo značajnog uticaja na realne ocene rezervi izdanskih voda, njihovo bilansiranje a samim tim i za kasnije potrebe korisnika izdanskih voda (vodosnabdevanje, ribogojstvo, flaširanje, balneologija, navodnjavanje...). U poslednjih deset godina bilo je pokušaja da se postojeći nizovi osmatranja i merenja isticanja iz karstnih vrela produže ili popune. Razlog je taj da višegodišnje serije srednje mesečne izdašnosti omogućavaju da se pouzdanije odredi karakter prosečne izdašnosti, a, takođe, i minimalnih izdašnosti željene obezbeđenosti - veoma bitnog faktora za ocenu pouzdanosti vodnog resursa u opštem vodoprivrednom bilansu.

Isticanje iz karstnih vrela predstavlja veoma složen proces u formiranju rečnog oticaja. Velika amplituda kolebanja količina isteklih voda iz karstnih vrela posledica je veoma složene geološke strukture kroz koju voda prolazi na svom putu od trenutka infiltracije/poniranja kišne kapi pa do trenutka njenog pojavljivanja na karstnom vrelu. Posledica ovoga je ta da aktivna (podzemna) površina sliva karstnih vrela bude pogrešno definisana. Takođe, često se u proračune rezervi ili pojedinih parametara bilansne jednačine ulazi sa topografskom površinom sliva a ne realnom, aktivnom (podzemnim), koje se značajno razlikuju kada je karst u pitanju.

Matematički model, pri kome se pored određivanja dnevnih suma evapotranspiracije, generišu i aktivne površine slivova, razvijen je u više međusobno nezavisnih nivoa. Na svakom nivou izvršavaju se određene funkcije, različite po matematičkoj strukturi i periodu diskretizacije vremena, a čiji je zajednički krajnji cilj definisanje dnevnih isticanja u višegodišnjem periodu.

Razrađeni model ima veliki broj parametara koji se, na različitim nivoima (modulima), određuju na osnovu poznatih ulazno-izlaznih promenljivih veličina i fizičkih karakteristika razmatranih hidrološko izučeni slivova. Ceo koncept se bazira na pretpostavci da se parametri modela odrede na hidrološki izučeni slivovima, zatim da se izvrši njihova prostorna homogenizacija i regionalizacija, i da se na homogenim područjima isti preslikaju na hidrološke neizučene slivove.

U dostignutoj fazi razvoja model je koncipiran na tri nivoa (modula), različitih računskih funkcija i namena. Navedeni nivoi su:

- nivo 1. - popunjavanje serija srednje mesečnih proticaja model-om VNC
- nivo 2. - određivanje dužine meroda-vnog perioda za ocenu ele-menata višegodišnjeg vodnog bilansa karstne izdani
- nivo 3. - bilansiranje voda u karstnoj izdani

Glavni praktični rezultati razrađenog simulacionog modela su kvantitativno određivanje:

- realnih slivnih površina karstnih izvora,
- dinamičkih zapremina poroznog prostora u kojima se vrši akumulisanje podzemnih karstnih voda,
- stvarne evapotranspiracije sa slivnih površina koje gravitiraju karstnim izdanima,

U konkretnom slučaju model je istariran i verifikovan na Velikom vrelu, koje pripada karstnom masivu Beljanice, odnosno, Karpato-balkanskom Luku istočne Srbije.

Ključne reči: karst, podzemne vode, površina sliva, bilans voda, realna evapotranspiracija

1. UVOD

Vodni resursi u karstnim terenima postaju sve značajniji izvori snabdevanja stanovništva pitkom vodom. Po kvalitetu ovo su vode visoke kategorije koje ne zahtevaju značajna sredstva za njihovu doradu. Značajnost karstnih izdani se ogleda u sposobnosti karstnog masiva da akumulira određene količine voda i da ih naknadno ispusti kroz karstna vrela (*Stevanović et al, 2012*). U većini slučajeva u karstnim masivima se formiraju značajne dinamičke i statičke rezerve koje u periodima suša u velikoj meri mogu da pomognu premošćavanje problematičnih predstojećih perioda odsustva padavina. Ove rezerve se lako u očekivanim periodima intenzivnih padavina nadoknađuju.

Geološki sastav Srbije je složen i u velikoj meri utiče na kompleksnost izučavanja hidrogeoloških odlika stena, načina prihranjivanja, dreniranja kao i kretanja podzemnih voda. Karbonatne stene nastale su u najvećoj meri tokom trijasa u zapadnoj Srbiji – Dinaridi, kao i tokom jure i krede u istočnoj Srbiji – Karpato-Balkanidi. U njima su formirane karstne izdani izuzetno bogate podzemnim vodama, od kojih najveći deo još uvek nije dovoljno istražen i iskorišćen na pravi način. Nedovoljna istraženost karstnih terena ima često za posledicu loše definisanu površinu sliva. Pri definisanju površine sliva treba imati u vidu da se površine slivova u sušnim godinama mogu značajno razlikovati u odnosu na iste tokom vlažnih godina. Takođe, treba imati u vidu i pojave podzemnih piraterija i bifurkacija podzemnih voda u karstnim terenima (*Bonacci et al, 2006*). Sa druge strane, rešavanje problema površine sliva definisanjem površinske vododelnice, koja u slučaju karstnih terena može se značajno razlikovati od realne aktivne (podzemne) vododelnice, ima direktno za posledicu pogrešano definisanje parametara bilansne jednačine kao i dinamičku zapreminu podzemnih voda.

Iz tog razloga često su potrebna detaljna i skupa hidrogeološka istraživanja (*Milanović, 1979*) da bi se što realnije definisala površina sliva. Za slučajeve kada ova istraživanja nisu sprovedena u dovoljnoj meri, kao i kada nemamo dovoljno dug niz osmatranja količina

isteklih voda iz karstnog masiva, razvijen je model koji kao ulazne parametre koristi hidrometeorološke podatke a kao izlaz daje površinu sliva, realnu evapotranspiraciju i dinamičku zapreminu karstnih podzemnih voda. U ovom radu u prvom delu biće dat prikaz matematičkog modela koji je baziran na jednačini vodnog bilansa.

U drugom delu biće model prikazan na primeru karstnog Velikog vrela koje drenira južne delove karstnog masiva Beljanica (Istočna Srbija).

2. STRUKTURA MODELA ZA DEFINISANJE POVRŠINE SLIVA

Matematički model za definisanje površine sliva karstnih vrela razvijen je u više međusobno nezavisnih nivoa. U ovoj fazi razvoja model je koncipiran na tri nivoa različitih računskih funkcija i namena. Navedeni nivoi su:

- √ nivo 1. - popunjavanje serija srednje mesečnih proticaja modelom VNC
- √ nivo 2. - određivanje dužine merodavnog perioda za ocenu elemenata višegodišnjeg vodnog bilansa karstne izdani
- √ nivo 3. - definisanje površine sliva i bilansiranje voda u karstnoj izdani.

Nivo 1. - Popunjavanje serija srednje mesečnih proticaja modelom višestruke nelinearne korelacije (VNC)

Svrha nivoa 1 je, da se a osnovu raspoloživih mesečnih vrednosti hidrometeoroloških podataka u širem regionu u višegodišnjem periodu, kao i postojećih podataka na karstnom izvoru u određenom, najčešće kraćem vremenskom periodu, uspostave određene uzročno posledične veze.

Za potrebe popunjavanja i produžavanja serija srednje mesečnih isticanja iz karstnog vrela koristi se model VNC (model višestruke nelinearne korelacije). Suština ovog modela se sastoji u uspostavljanju linearnih korelacionih zavisnosti između standardizovanih promenljivih serija srednje mesečnih isticanja i odgovarajućih klimatskih parametara relevantnih za formiranje isticanja iz karstnog vrela. Dobijeni parametri uspostavljenih zavisnosti se prostorno analiziraju, i za regione gde su oni homogeni, koriste se inverzno za definisanje odgovarajuće serije isticanja za višegodišnji period, kada su poznati odgovarajući

podaci na slivu "analogu" i meteorološki podaci za razmatrani sliv.

U konkretnom slučaju, pomoću modela VNC (Prohaska et al, 1977, Prohaska et al, 1977, Prohaska et al, 1979, Prohaska et al, 1995) uspostavlja se zavisnost između standardizovanih promenljivih sledećih hidrometeoroloških veličina.

$$U(Q_{ij}) = a_{01} \cdot U_1(Q_{ij}^a) + a_{02} \cdot U_2(P_{ij}) + a_{03} \cdot U_3(T_{ij}) + a_{04} \cdot U_4(V_{ij}) + a_{05} \cdot U_5(N_{ij}) \quad (1)$$

gde su:

$U_k(X_{ij})$ - standardizovana vrednost odgovarajuće promenljive X_{ij} , Q_{ij} - vrednost srednje mesečnog isticanja iz karstne izdani [m^3/s], Q_{ij}^a - vrednost srednje mesečnog proticaja na reci "analogu" [m^3/s], P_{ij} - srednje mesečne sume padavina na razmatranom karstnom slivu [mm], T_{ij} - srednje mesečna temperatura vazduha na razmatranom karstnom slivu [$^{\circ}C$], V_{ij} - srednje mesečna vlažnost na razmatranom karstnom slivu [%], N_{ij} - srednji mesečni napon vodene pare na razmatranom karstnom slivu [hPa], a_{0j} - nepoznati regresioni koeficijent (parametari), $j=1,2,\dots,12$ redni broj meseca, $i=1,2,\dots,N$ redni broj godine u nizu, $l=1,2,\dots,M$ broj nezavisno promenljivih - regresiona jednačina (1)

Procedura definisanja parametara modela detaljno je opisana u literaturi (Prohaska et al, 1977, Prohaska et al, 1977, Prohaska et al, 1979, Prohaska et al, 1995).

Nivo 2 - Određivanje dužine merodavnog perioda za ocenu elemenata višegodišnjeg bilansa karstne izdani

Pri oceni prosečne višegodišnje vodnosti određenog slivnog područja, pa i karstne izdani u celini, polazi se od pretpostavke da proces formiranja voda u karstnom masivu ima stohastički karakter. To praktično znači da, kao i kod većine hidrometeoroloških i hidrogeoloških pojava, postoji određena stohastička zakonomernost smenjivanja kišnih (vodnih) i sušnih perioda, pa i godina. Hidrometeorološki i hidrogeološki procesi u prirodi su u višegodišnjem periodu po pravilu ciklični, a u osnovi stohastički. Zato je neophodno da se za potrebe procene prosečne višegodišnje vodnosti područja raspolaže sa dovoljno dugim vremenskim serijama proticaja (isticanja) koje obuhvataju više hidroloških ciklusa oticaja (jedan ciklus obuhvata jedan sušni i jedan

kišni period). Primena opisanog modela VNC to i omogućuje.

U hidrološkoj praksi se, za ocenu višegodišnje cikličnosti hidrometeoroloških pojava i procesa, koristi tzv. integralna kriva modulnih odstupanja, koja u suštini predstavlja kumulativnu liniju. (Prohaska, 2003).

$$f(t) = \sum_{i=1}^t \frac{K_i - 1}{C_v} \quad (2)$$

gde je:

K_i - modulni koeficijent za i -tu godinu.

$$K_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}} \quad (3)$$

Q_i - srednji godišnji proticaj i -te godine [m^3/s], \bar{Q} - prosečni višegodišnji proticaj [m^3/s], C_v - koeficijent varijacije serije srednje godišnjih proticaja.

Grafička interpretacija integralne linije odstupanja ukazuje na smenu vlažnih i sušnih godina. Pozitivan priraštaj funkcije $f(t)$ karakteriše vlažni, a negativan priraštaj sušni period. Za definisanje višegodišnje vodnosti područja, odnosno merodavne dužine računskog perioda za ocenu višegodišnje vodnosti, usvaja se dužina vremenskog perioda koji obuhvata dva ili više puna ciklusa. U suprotnom slučaju koristi se najduža raspoloživa serija podataka.

Nivo 3 – Definisane površine sliva i bilansiranje voda u karstnoj izdani - BILANS

Stanje ovodnjenosti karstne izdani zavisi pre svega od hidrometeoroloških ulazno-izlaznih veličina i zapremine šupljina i pora u karstnom masivu, kao i sposobnosti da se akumuliraju određene količine vode u njima, i da naknadno ističu kroz karstna vrela. Sposobnost da neki karstni masiv privremeno zadrži veću ili manju količinu vode zavisi od veličine tzv. dinamičke zapremine - prostora šupljina i pora u karstnom masivu, dinamički aktivnog za vreme pojave poplavnih talasa. Dinamička zapremina u karstnom masivu direktno utiče na stanje bilansa voda u njima i karakteriše stepen i karakter ovodnjenosti karstnog masiva.

Osnovna jednačina za proračun bilansa voda u karstnoj izdani, sa mesečnim periodom diskretizacije vremena, glasi:

$$P_{ij} = h_{ij} + E_{ij} + (V_{ij} - V_{i,j-1}) = h_{ij} + E_{ij} \pm \Delta_{ij} \quad (4)$$

gde su: P_{ij} - mesečne sume padavina na karstnom slivu [mm], h_{ij} - srednje mesečni sloj isticanja iz karstnih vrela [mm], E_{ij} - mesečne sume stvarne (realne) evapotranspiracije sa karstnog sliva [mm], V_{ij} - stanje zapremine vode u razmatranoj karstnoj izdani u j -tom mesecu [mm], Δ_{ij} - promena zaliha voda u karstnom masivu u j -tom mesecu [mm].

Postavljena jednačina vodnog bilansa (jed. 4), s obzirom na raspoloživi fond podataka, ima dve nepoznate veličine E_{ij} i Δ_{ij} . Zbog toga je uveden nov granični uslov za ocenu "realne (stvarne) evapotranspiracije" E_{ij} sa karsta. Dodatni nov granični uslov podrazumeva izjednačavanje zapremine vode (rezervi podzemnih voda) na početku i na kraju merodavnog računskog perioda. Uz pomoć ovog uslova "realna (stvarna) evapotranspiracija" određuje se pomoću navedene jednačine bilansa (jed. 4) i to na osnovu stvarnih vrednosti padavina na slivu i isticanja iz vrela.

Za ocenu prve aproksimacije mesečne sume stvarne evapotranspiracije sa karsta koriste se računске vrednosti dnevnih suma potencijalne evapotranspiracije koje se dobijaju po modifikovanoj metodi Thornthwait-a (Thornthwait, 1948), a na osnovu poznatih vrednosti srednje dnevnih temperatura vazduha i stvarne mesečne sume trajanja sunčevog sjaja, po formuli:

$$PET_{ik} = \frac{0.4 \cdot N_{ij}}{3} \cdot \left(\frac{10 \cdot T_{ik}}{I_i} \right)^a \quad [mm] \quad (5)$$

gde su: PET_{ik} - potencijalna dnevna suma evapotranspiracije [mm], N_{ij} - mesečna suma trajanja sunčevog sjaja [h], T_{ik} - srednje dnevna temperatura vazduha [°C], I_i - godišnji toplotni indeks, a - parametar koji je u funkciji toplotnog indeksa.

Godišnji toplotni indeks se dobija na osnovu vrednosti srednje mesečnih temperatura vazduha korišćenjem sledeće jednačine:

$$I_i = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{T_{ij}}{5} \right)^{1.514} \quad (6)$$

Parametar a se dobija korišćenjem sledeće polinomne funkcije:

$$a = 6.15 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1.79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0.49 \quad (7)$$

Za proračun dnevnih suma stvarne "realne" evapotranspiracije koristi se procedura postepenog približavanja u rešenju bilansne jednačine (jed. 4), pri čemu se pretpostavlja (Ristić, 2007):

- da akumulirana zapremina vode u karstnim masivima u početnom trenutku bude jednaka zapremini na kraju definisanog merodavnog računskog perioda (pomenuti granični uslov), tj. $V_0 \cong V_K$ gde 0 i K označavaju početak i kraj merodavnog računskog perioda
- da raspodela dnevnih suma stvarne (realne) evapotranspiracije bude nelinearna i to tako što se za dane kada postoje padavine dobijene vrednosti dnevnih suma potencijalne evapotranspiracije prihvataju kao vrednosti dnevnih suma realne (stvarne) odnosno:

$$E_{ik} = PET_{ik}$$

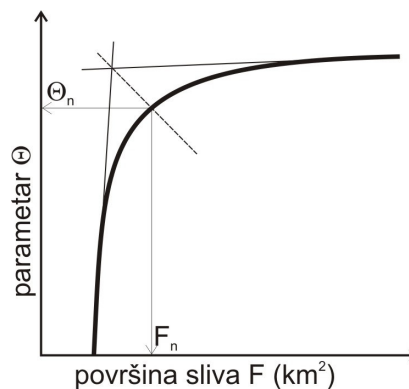
a za ostale dalje dane stvarna (realna) dnevna suma evapotranspiracije opada po sledećem zakonu:

$$E_{j(k+\tau)} = \Theta^{2\tau} \cdot PET_{ik} \quad (8)$$

gde su: E_{ik} - stvarna dnevna suma evapotranspiracije [mm], Θ - bezdimenzioni parametar, $\tau = 1, 2, 3, \dots, m$ - vremenski korak u danima.

- i da se za različite vrednosti Θ ($\Theta = 0, 0.1, 0.2, \dots, 0.9$) definišu površine slivova za koje važi pravilo $V_0 \cong V_K$. Na osnovu svih sračunatih vrednosti kontruiše se dijagram $\Theta = f(F)$ - vidi sliku 1.

Presečna tačka simetrale tangenti funkcije $\Theta = f(F)$ sa samom funkcijom predstavlja realnu vrednost površine sliva.



Slika 1. Dijagram zavisnosti $F = f(\Theta)$

Mesečna suma stvarne evapotranspiracije dobija se na osnovu "usklađenih" vrednosti dnevnih suma stvarne evapotranspiracije, poštujući gore navedene uslove i ograničenja.

Sa ovako definisanom veličinom stvarne (realne) dnevne, odnosno mesečne sume evapotranspiracije vrši se proračun stanja zapremine voda u karstnom akviferu (Prohaska et al, 2002) na kraju j-tog meseca po jednačini:

$$V_{ij} = P_{ij} - h_{ij} - E_{ij} + V_{i,j-1} \quad (9)$$

3. PRIMENA MODELA NA VELIKOM VRELU

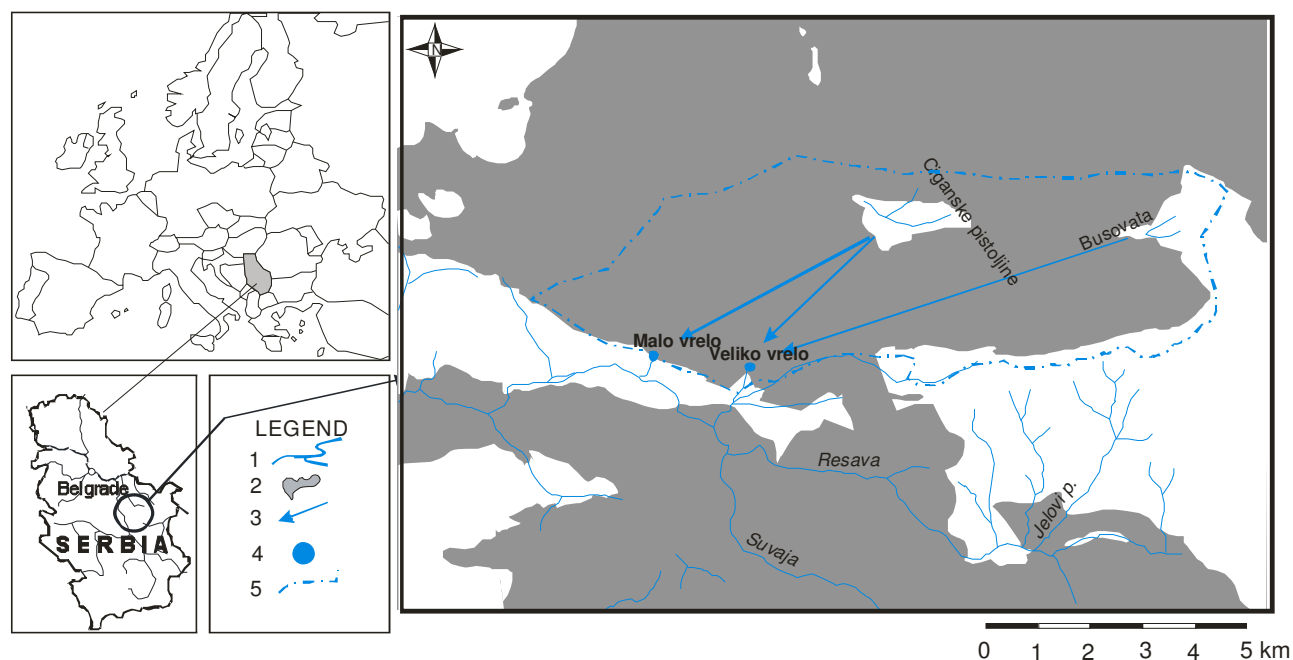
Hidrogeološke karakteristike sliva Velikog vrela

Sliv Velikog zajedno sa Malim vrelom čini većim delom karbonatni kompleks u okviru koga je razvijen karstni tip izdani, a izdvojen je u okviru debelog kompleksa karbonatnih stena mezozojske starosti (slika 2). U vertikalnom profilu mogu se izdvojiti: konglomerati i peskovito-šljunkoviti oolitični krečnjaci, dogerski klastiti i karbonatne stene, slojeviti i bankoviti krečnjaci sa rožnacima oksford-kimeridža, masivni i bankoviti krečnjaci i dolomiti titona, bankoviti i slojeviti krečnjaci valend-otriva i masivni i bankoviti krečnjaci i dolomiti

urgonske facije (Stevanović, 1991, Ristić, 2007, Milanović 2010).

Osnovne vidove prihranjivanja karstne izdani predstavljaju infiltracija voda od atmosferskih taloga, dok se manji deo voda infiltrira iz površinskih tokova. Padavine koje se izluče u centralnim delovima beljaničkog masiva, izgrađenim od vodonepropusnih škriljaca, delom se gube procesom evapotranspiracije, a delom otiču manjim površinskim vodotocima (Rečke i Busovate) koji se, na samom kontaktu sa krečnjacima, gube u ponorima i izduhama. Pored ovih koncentričnih ponora i većih ponorskih zona u okviru Beljaničkog masiva, konstatovan je i čitav niz manjih ponora i ponorskih zona u okviru korita Resave (Dragišić et al, 1990).

Najintenzivnije prihranjivanje karstne izdani vrši se tokom prolećnih meseci u periodima otapanja snežnog pokrivača. Sa druge strane usled izdizanja nivoa i zasićenja, veliki deo voda otiče površinskim tokovima. Karstna izdan Beljaničkog masiva prazni se isticanjem izdanskih voda preko vrela, zatim podzemnim isticanjem u okolne manje propusne tvorevine na obodu masiva i delom u procesu evapotranspiracije. Vrela se javljaju uglavnom na kontaktu karbonatnih i nekarbo-



Slika 2. Geografski položaj istražnog područja sa šematizovanom hidrogeološkom kartom

1. rečni tok, 2. karstno područje, 3. utvrđeni pravci opitnog bojenja, 4. karstno vrelo, 5. pretpostavljena hidrogeološka vododelnica

natnih stena, a njihov položaj je predisponiran položajem rasednih struktura i pukotinskih sistema.

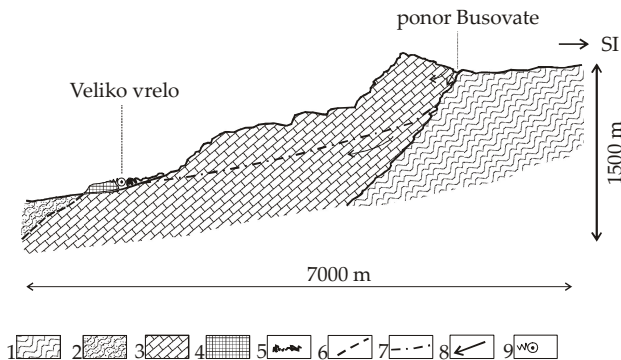
Od svih pojava koja su prisutna na južnom delu Beljanice najinteresantnija i najprerspektivnija su karstna vrela Veliko i Malo vrelo, koja se pojavljuju u podnožju vertikalnih krečnjačkih otseka Beljanice a duž severnog oboda kotlinice Lisine.

Veliko vrelo izbija u vrhu kotline pod vertikalnim osecima Radoševе pećine. Voda ističe u dnu dugačkog sipara između velikih krečnjačkih blokova u vrhu kratke i plitke dolinice, zapunjene krupnim krečnjačkim blokovima. Izvorište se pomera uzvodno i nizvodno zavisno od stanja nivoa izdani. Za vreme maksimalne izdašnosti vrelo daje i preko 10 m³ u sekundi. U minimumu ono se smanji i tada iz sipara i blokova ističe jedva oko 120 l/s (Petrović, 1974). Po Z. Stevanoviću, 1987, pružanje dolinice je I-Z verovatno je uslovljeno pružanjem regionalniog resavskog raseda. Od izvorišta tok teče u pravcu juga, preko bigrovitih naslaga, da bi na oko 200 m nizvodno od vrela srušio niz bigreni odsek visok preko 20 m (slika 3). Lokalni hidrogeološki profil Velikog vrela dat je na slici 4.



Slika 3. Vodopad nizvodno od Velikog vrela sa formiranim malim jezerom (slikao D. Milanović)

Tokom 1978. i 1979. godine vršena su hidrogeološka i hidrološka istraživanja na području Kučaja i Beljanice od strane Geozavoda iz Beograda. Ova istraživanja su obuhvatila, pored ostalog, i osmatranja i merenja vodostaja i proticaja (jednom u pet dana) većih vrela na ovom području, među kojima se našlo i Veliko vrelo (Stevanović, 1992).



Slika 4. Hidrogeološki profil sliva Velikog vrela (po Z. Stevanoviću, 1987)

1. Paleozojski škriljci, 2. permski peščari, 3. masivni jurski krečnjaci, 4. naslage bigra, 5. krečnjačka drobina, 6. čelo navlake, 7. nivo izdani, 8. pravac kretanja izdanskih voda, 9. karstno vrelo

Od strane RHMZ Srbije na ovom vrelo su otpočela osmatranja vodostaja i merenja proticaja od 1. januara 1995. godine. To je jedno od prvih vrela posle vrela Mlave na kome su uspostavljena redovna osmatranja i

merenja. Sa pomenutim merenjima je na žalost prekinuto nakon 2003. godine. U ovom periodu u proseku je isteklo 0.584 m³/s vode. Srednje mesečne vrednosti proticaja Velikog vrela date su u tabeli 1 i kreću se u intervalu od 0.048 m³/s (juli 2001. godine) pa do 2.054 m³/s (april 1999. godine). Apsolutno zabeležen maksimum javio se 11. juna 2002. godine u iznosu od 6.1 m³/s.

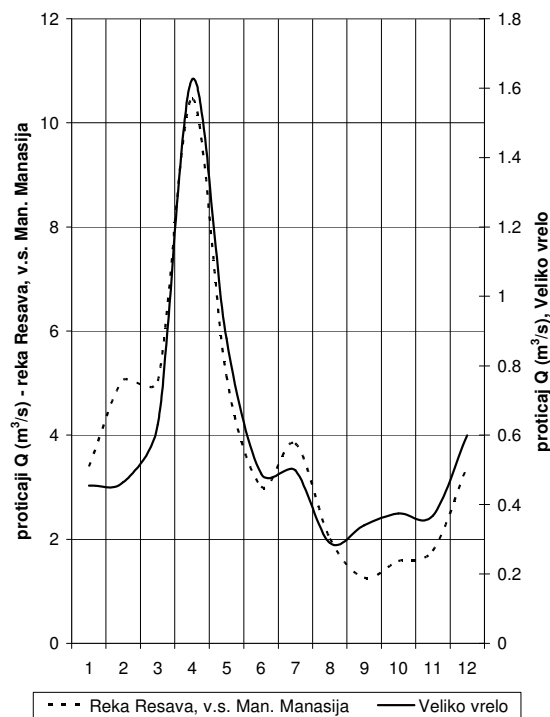
Zbog kratkog niza hidroloških osmatranja na ovom vrelo, za ocenu višegodišnje vodnosti područja korišćeni su istorijski podaci sa najbližeg sliva, sličnih fizičko-geografskih karakteristika. U konkretnom slučaju korišćeni su raspoloživi podaci za reku Resavu u profilu vod. st. Manastir Manasija. Na slici 5 dat je uporedni prikaz unutargodišnje raspodele proticaja za ova dva profila za osmatrački period od 1995. zaključno sa 2000. godinom.

Koeficijent korelacije između srednje mesečnih vrednosti proticaja reke Resave za ove dve vodomerne stanice (v.s. Manastir Manasija i samog Velikog vrela) je preko $r > 0.93$, što ukazuje na to da je unutargodišnja raspodela proticaja skoro identična za oba profila.

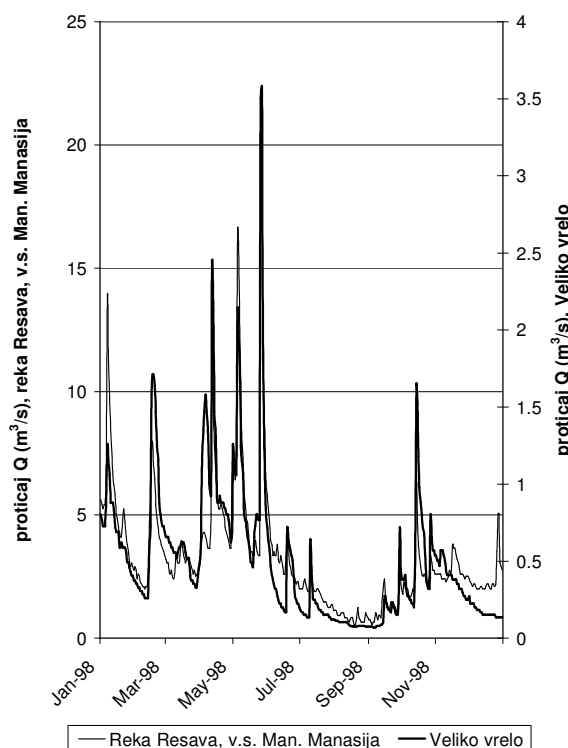
Tabela 1. Srednje mesečne vrednosti proticaja Velikog vrela za osmatrački period od 1995-2003. godine

	JAN	FEB	MAR	APR	MAJ	JUN	JUL	AVG	SEP	OKT	NOV	DEC	SR
1995	0.284	0.740	0.856	1.598	0.744	0.251	0.115	0.086	0.224	0.262	0.639	0.635	0.536
1996	0.335	0.155	0.162	1.681	1.070	0.212	0.089	0.081	0.700	0.346	0.468	1.306	0.550
1997	0.598	0.361	0.479	1.611	1.102	0.640	1.211	0.916	0.439	0.721	0.299	0.732	0.759
1998	0.695	0.728	0.524	1.074	1.165	0.372	0.193	0.090	0.169	0.565	0.400	0.169	0.512
1999	0.489	0.374	0.898	2.054	0.605	1.022	1.127	0.352	0.212	0.154	0.200	0.558	0.670
2000	0.328	0.430	0.865	1.730	0.585	0.440	0.257	0.213	0.296	0.201	0.203	0.198	0.479
2001	0.449	0.571		1.189	0.268	1.089	0.048						
2002	0.231	0.544	0.659	0.442	0.225	1.192	0.201	0.251					
2003			0.230										
Qsr	0.426	0.488	0.584	1.423	0.721	0.652	0.405	0.284	0.340	0.375	0.368	0.600	0.584
s	0.161	0.198	0.287	0.502	0.368	0.396	0.477	0.297	0.200	0.223	0.170	0.416	0.107
Cv	0.379	0.406	0.491	0.353	0.511	0.607	1.177	1.044	0.588	0.594	0.462	0.694	0.184
Qmax	0.695	0.740	0.898	2.054	1.165	1.192	1.211	0.916	0.700	0.721	0.639	1.306	0.759
Qmin	0.231	0.155	0.162	0.442	0.225	0.212	0.048	0.081	0.169	0.154	0.200	0.169	0.479

Za uporednu analizu dnevnih vrednosti proticaja unutar jedne godine na slici 6 prikazan je uporedni dijagram dnevnih vrednosti proticaja za Veliko vrela i reku Resavu (v.s. Manastir Manasija) i to za 1998. godinu. Koeficijenti korelacije koji ukazuju o čvrstini veze između dnevnih vrednosti proticaja Velikog vrela i reke Resave u profilu vodomerne stanice Manastir Manasija, za pojedine godine, kreću se u intervalu od 0.482 (za vlažne godine) do čak 0.888 (za sušne godine).



Slika 5. Uporedni dijagram unutargodišnje raspodele proticaja (osmatrački period 1995-2000)

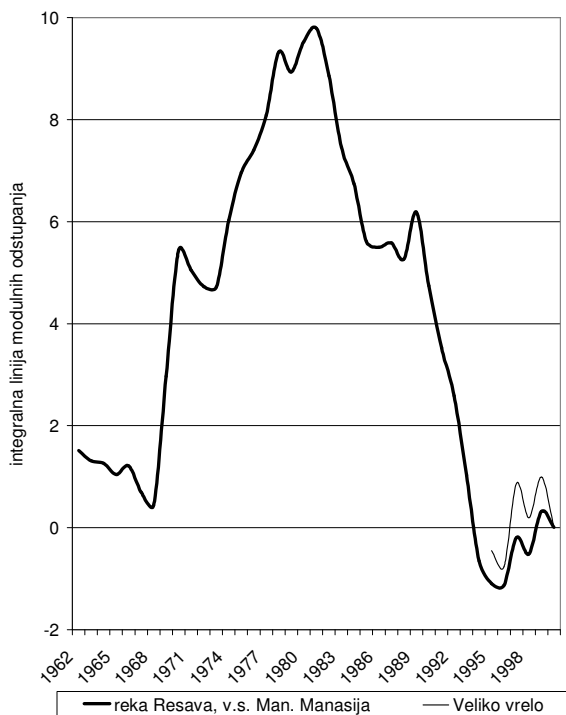


Slika 6. Uporedni hidrogrami Velikog vrela i reke Resave (vod. st. Man. Manasija) za 1998. godinu

Sračunata integralna kriva modulnih odstupanja reke Resave u profilu v.s. Manastir Manasija prikazana je na slici 7. Razmatrani period obuhvata u osnovi samo jedan ciklus i to kraj faze opadanja prethodnog, celu fazu porasta i početnu fazu opadanja drugog ciklusa, tako da se za ocenu višegodišnje vodnosti za merodavni (računski) period obrade, usvaja period od 1962. do 2000. godine (slika 7), odnosno od trenutka

kada su osmatranja uspostavljena na vodomernoj stanici Manastir Manasija na Resavi.

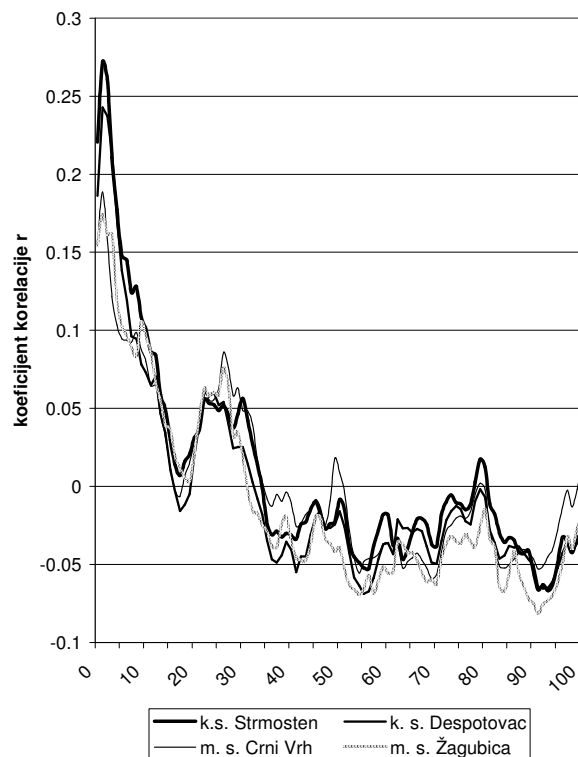
Na slivnom području Velikog vrela ne postoji ni jedna oficijelna kišomerna/meteorološka stanica. U neposrednoj blizini vrela nalaze se dve kišomerne stanice (kiš. st. Despotovac i kiš. st. Strmosten) i jedna meteorološka stanica (Žagubica) postavljene od strane RHMZ Srbije. Meteorološka stanica Crni Vrh je stanica koja je relativno udaljena od istražnog područja ali je jedina meteorološka stanica na Kučaju i Beljanici koja se nalazi na nadmorskim visinama preko 500 mnm (832 m odnosno od 1982. godine 1037 m), dok ostale tri se nalaze na relativno niskim nadmorskim visinama (Strmosten na 380 mnm, Despotovac - 190 mnm i Žagubica na 314 mnm), pa iz tog razloga su urađene detaljne analize svih pomenutih stanica. Kao rezultat analize uticaja suma padavina na isticanje iz Velikog vrela dobijeni su koeficijenti korelacije koji se kreću u intervalu od 0.523 (met. st. Žagubica) pa do 0.851 - k.s. Strmosten (za vrednosti sumirane/ osrednjene na godišnjem nivou). Slična situacija je dobijena analizom mesečnih vrednosti, odnosno koeficijenti korelacije se kreću u intervalu od 0.444 (m.s. Žagubica) pa do 0.563 (k.s. Strmosten).



Slika 7. Integralna kriva modulnih odstupanja za reku Resavu - v.s. Manastir Manasija i Velikog vrela

Za analizu uticaja dnevnih suma padavina na dnevna isticanja iz Velikog vrela korišćena je kroskorelaciona funkcija (Jemcov et al, 1998, Prohaska et al, 2006). Kroskorelogrami su urađeni za period od 100 dana sa korakom $\tau = 1$ dan za sve 4 stanice i to za računski period od 6 godina (1995-2000. godina) - vidi sliku 8.

Sa kroskorelograma se može zaključiti da je reakcija sliva na dnevne sume padavina za sve 4 stanice sa kašnjenjem od 1 dana i najveća vrednost koeficijenta korelacije iznosi 0.27 (padavine sa kiš. st. Strmosten $\tau = 1$ dan). Ovaj pik je prisutan kod svih analiziranih stanica. Nakon 26 dana primetan je još jedan pik. Predstavlja najverovatnije period potreban snežnim padavinama da nakon prolećnog otapanja dospeju do vrela a najizraženiji je kod m.s. Crni Vrh iz razloga što je ovo stanica sa najvećom nadmorskom visinom, odnosno reprezent je dela sliva sa najvišim debljinama snežnog pokrivača.



Slika 8. Kroskorelogram dnevnih uticaja dnevnih suma padavina na izdašnost Velikog vrela

Imajući sve ovo gore analizirano, za produžavanje serija srednje mesečnih proticaja Velikog vrela korišćeni su sledeći podaci:

- zavisno promenljiva: serija srednje mesečnog sloja oticaja Velikog vrela (osmatrački period)
- nezavisno promenljive:
 - serija srednje mesečnog sloja oticaja na reci "analogu" (reka Resava - v. s. Manastir Manasija),
 - mesečne sume padavina: kiš. st. Strmosten
 - srednje mesečnih temperatura vazduha: met. st. Crni Vrh
 - vlažnosti vazduha: met. st. Crni Vrh
 - napona vodene pare: met. st. Crni Vrh

Rezultati proračuna međusobnih koeficijenata standardizovane nelinearizovane korelacije između navedenih hidrometeoroloških veličina prikazani su u tabeli 2.

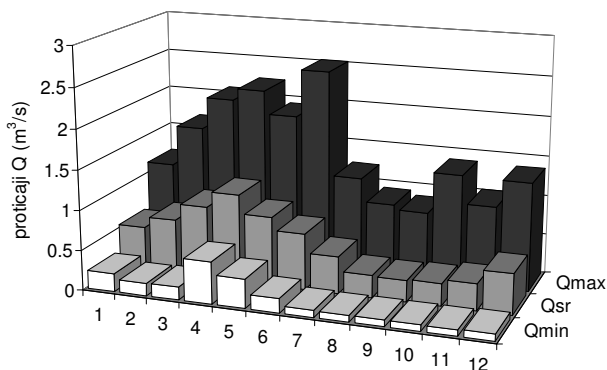
Na osnovu uspostavljenih zavisnosti definisana je serija srednje mesečnih isticanja iz Velikog vrela za ukupan računski period 1962 - 2000. godine. Srednja višegodišnja količina istekle vode iznosi $0.581 \text{ m}^3/\text{s}$. U

periodu od 1962-2000. godine maksimalni zabeleženi godišnji proticaj na samom vrelu je iznosio $0.919 \text{ m}^3/\text{s}$ (1970) dok je minimalni srednje godišnji proticaj zabeležen 1993. godine u iznosu od $0.345 \text{ m}^3/\text{s}$. Najvodniji mesec u toku godine je april dok su avgust, septembar i oktobar najsiromašniji meseci tokom godine. Maksimalni srednje mesečni proticaj zabeležen je u aprilu 1969. godine u iznosu od $2.52 \text{ m}^3/\text{s}$, dok je minimalni srednje mesečni proticaj registrovan novembra 1991. i u iznosu od svega $0.076 \text{ m}^3/\text{s}$. Na slici 9 dat je grafički prikaz srednje mesečnih, minimalnih i maksimalnih mesečnih proticaja Velikog vrela sračunatih za računski period 1962-2000. godina (nepostojeće vrednosti popunjene modelom VNC).

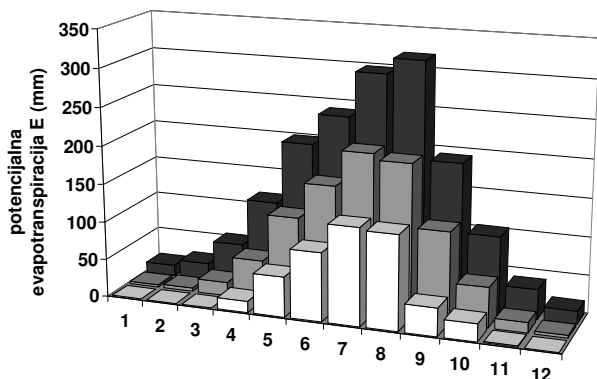
Primenom metode Thornthwaita (navedenih jednačina 5, 6 i 7) sračunate su mesečne sume potencijalne evapotranspiracije koristeći podatke registrovane na met. st. Crni Vrh. Rezultati ovih proračuna prikazani su grafički na slici 10.

Tabela 2. Prikaz rezultata proračuna standardizovanog koeficijenta nelinearne korelacije

N°		N°					
		1	2	3	4	5	6
1	Sloj oticaja - Veliko vrelo	1	0.894	0.451	-0.224	0.156	-0.143
2	Sloj oticaja - reka "analog"		1	0.451	-0.224	0.156	-0.143
3	Padavine			1	0.091	0.165	0.208
4	Temperatura				1	-0.633	0.939
5	Vlažnost vazduha					1	-0.416
6	Napon vodene pare						1



Slika 9. Srednje mesečni maksimalni i minimalni mesečni proticaji Velikog vrela (računski period 1962-2000)



Slika 10. Minimalna, srednje i maksimalna mesečna potencijalna isparavanja za met. st. Crni Vrh

Proračun realnih (stvarnih) dnevnih suma evapotranspiracije

Za odabrani sliv Velikog vrela, korišćenjem jednačine 9, za vrednosti parametra $\Theta = 0, 0.1, 0.2, \dots, 0.8$ i 0.9 , uspostavljena je bilansna jednačina, tariranjem potencijalne slivne površine, tako bude zadovoljen uslov $V_0 \cong V_K$. Korišćenjem dobijenih konstelacija vrednosti Θ i F , koje zadovoljavaju postavljeni uslov formirane su funkcionalne zavisnosti $\Theta = f(F)$. Grafička interpretacija dobijene zavisnosti prikazana je na slici 11 (Stevanović et al, 2010).

Analizom dobijenih zavisnosti $\Theta = f(F)$ može se konstatovati da je zavisnost između parametra Θ i površine sliva nelinearna u celom dijapazonu promene parametra Θ . Kod nižih vrednosti parametra Θ , promene ovog parametra ne utiču značajnije na površinu sliva, odnosno diferencijalna promena površine sliva δF je beznačajna, površina sliva skoro da ostaje nepromenjena.

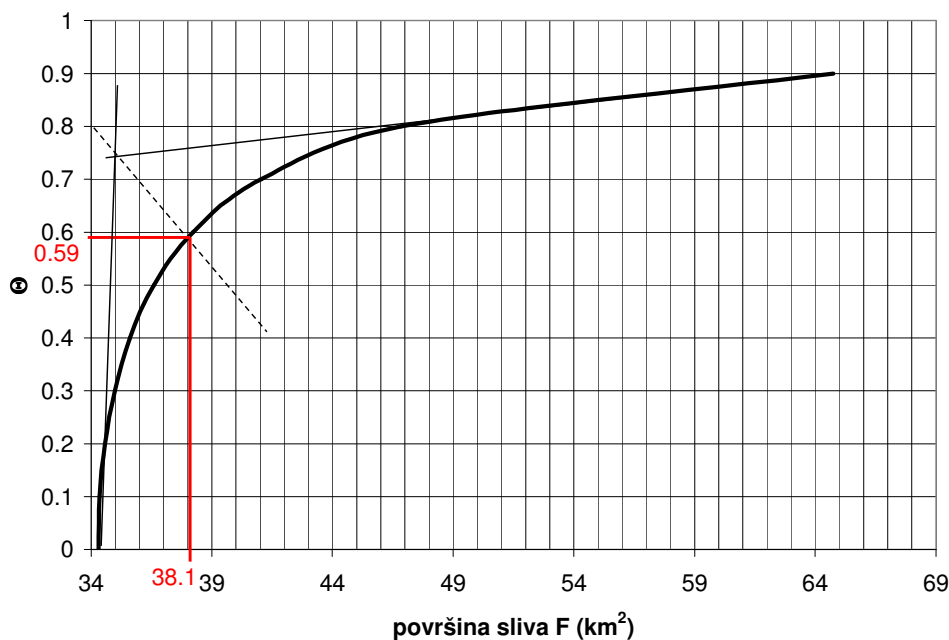
Suprotni je slučaj kod vrednosti Θ bliskih 1 (uglavnom većih od 0.8), odnosno pri malim

promenama ovog parametra dolazi do značajnog povećanja površina sliva. Ovim se dovodi do nestabilnosti sistema, ili ti pretpostavljenog koncepta proračuna vodnog bilansa (jed. 4).

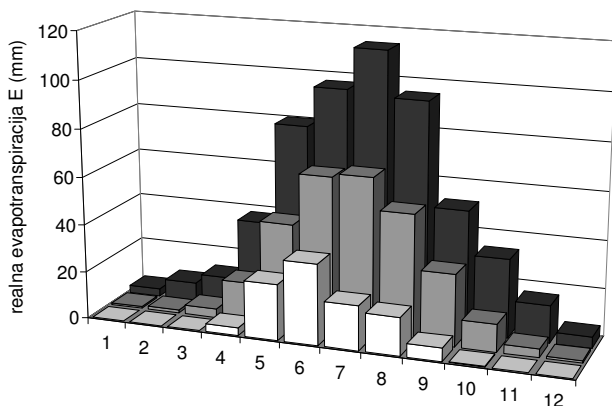
Granična tačka je ujedno i prelomna (temena) tačka nelinearne funkcije $\Theta = f(F)$. Do granične vrednosti sistem je stabilan, a nakon nje ubrzo nastupa nestabilni sistem. Ova reporna (temena) tačka se dobija presekom simetrale tangenti i funkcije $\Theta = f(F)$. Na ovaj način definiše se površina sliva koja za razmatrani sliv Velikog vrela iznosi 38.1 km^2 , kao i realna evapotranspiracija (vidi sliku 12).

Određivanje dinamičke zapremine Velikog vrela

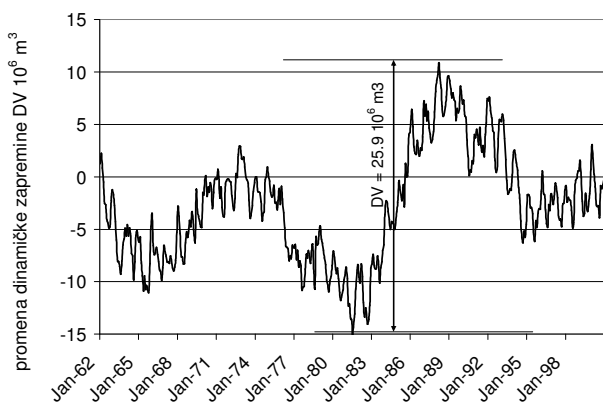
Sa formiranim ulaznim serijama mesečnih suma padavina, stvarne (realne) evapotranspiracije, kao i slojeva oticaja, za sliv Velikog vrela, sračunata su stanja zapremine vode u karstnoj izdani na mesečnom nivou. Rezultati ovih proračuna prikazani su grafički na slici 13.



Slika 11. Zavisnost $\Theta = f(F)$ za sliv Velikog vrela



Slika 12. Minimalna, srednje i maksimalna mesečna realna isparavanja za sliv Velikog vrela



Slika 13. Prikaz promene stanja zapremine vode u karstnoj izdani Velikog vrela za period od 1962-2000. godine

Imajući u vidu sve gore navedeno, na kraju je interesantno dati i ostale komponente vodnog bilansa koje su karakteristične za slivno područje Velikog vrela.

U tabeli 3 dati su sledeći elementi vodnog bilansa: površina sliva F (km^2), prosečna višegodišnja izdašnost - proticaj Q (m^3/s), zapremina otekle vode W (10^6 m^3), prosečni višegodišnji moduo oticaja q ($\text{l/s}/\text{km}^2$), sloj oticanja h (mm), prosečne godišnje padavine P (mm), prosečna godišnja evapotranspiracija E (mm) i prosečni višegodišnji koeficijent oticanja ϕ . Svi parametri se odnose na računski period od 40 godina (1961-2000. godinom)

Tabela 3. Pregled osnovnih karakteristika bilansa na razmatranom području

F (km^2)	38.1
P (mm)	760.3
E (mm)	279.4
h (mm)	480.9
Q_{sr} (m^3/s)	0.581
q ($\text{l/s}/\text{km}^2$)	15.249
W (10^6 m^3)	18.322
ϕ	0.633

4. ZAKLJUČAK

Sa aspekta hidrogeologije i hidrologije karst je veoma bitan element, koji utiče značajno na proces formiranja oticaja u slivu. Sve regionalne zavisnosti, izvedene primenom tradicionalnih hidroloških metoda bez vođenja računa o pojavi karsta u slivu, nemaju praktičnu primenu. Čest je slučaj da se u proračune rezervi ili pojedinih parametara bilansne jednačine ulazi sa topografskom površinom sliva a ne aktivnom - podzemnom koje se značajno razlikuju kada je karst u pitanju. Ovo može da ima značajnog uticaja na tačnost rezultata dobijenih pri hidrološkim analizama malih slivova, naročito ukoliko je značajniji deo sliva izgrađen od karbonatnih stena.

Sa druge strane nedovoljno dugi nizovi osmatranja na samim vrelima takođe imaju uticaja na određivanje parametara bilansne jednačine kao rezervi podzemnih voda karstnog masiva kojeg vrelo drenira. Iz tog razloga je razvijen višemodulni model na Rudarsko-geološkom fakultetu za potrebe bilansiranja karstnih izdanskih voda.

Da bi model bilo moguće primeniti, neophodno je imati dovoljno dug niz isticanja iz karstnih vrela kao i meteorološke podatke. Kako u Srbiji postoji 20-tak vrela koja imaju niz duži od 3 godine dnevnih osmatranja isteklih voda (vrelo Mlave, Svete Petke, Grze, Veliko vrelo, vrelo Vape, Gostiljsko vrelo, vrelo Tolišnice, Modro Oko, ...), model je proveren i istariran na svim vrelima na kojima postoje osmatranja i na kojima su za različite potrebe radena detaljna hidrogeološka istraživanja koja su imala za cilj pored ostalog da definišu i odrede realnu površinu sliva. Površina sliva dobijena modelom na svim vrelima se u maksimumu razlikovala do 20% u odnosu na realnu površinu sliva dobijenu detaljnim hidrogeološkim istraživanjima.

Sam matematički model razvijen je u više međusobno nezavisnih nivoa. Na svakom nivou izvršavaju se određene funkcije, različite po matematičkoj strukturi i periodu diskretizacije vremena, a čiji je zajednički krajnji cilj definisanje dnevnih suma evapotranspiracije u višegodišnjem periodu i definisanje aktivne površine sliva. U osnovi ulazni podaci u model su isti, što omogućuje korišćenje iste baze ulaznih hidrometeoroloških podataka.

U ovoj fazi razvoja, model je koncipiran na tri nivoa (modula), različitih računskih funkcija i namena. Navedeni nivoi su:

- nivo 1. - popunjavanje serija srednje mesečnih proticaja modelom VNC
- nivo 2. - određivanje dužine merodavnog perioda za ocenu elemenata višegodišnjeg vodnog bilansa karstne izdani- INTKR
- nivo 3. - bilansiranje voda u karstnoj izdani - BILANS

Primenom ove procedure rešavaju se dve ključne nepoznanice pri analizi karstnih izdani, a to su: prvo - veličina aktivne slivne površine sa koje se voda sliva i akumulira u karstnoj izdani u višegodišnjem periodu, i drugo, određuje se veličina zapremine podzemne akumulacije koja efektivno utiče na vremensku preraspodelu voda tokom unapred utvrđenog merodavnog računskog perioda (veličina dinamičke zapremine podzemne akumulacije).

LITERATURA

[1] Bonacci, O., Jukić, D., & I. Ljubenkov, 2006: Definition of catchment area in karst: case of the river Krčić and Krka, Croatia.- Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques, 51(4), 682-699

[2] Dragišić V., Miladinović B., Vukičević R., Grbović S., 1990.: Novi rezultati obeležavanja izdanskih tokova u karstu istočne Srbije, Zbornik SGD-a, Beograd

[3] Jemcov I., Ristić V., Prohaska S., Stevanović Z., 1998.: The Use of Autocross-Regression Model for Analyse and Simulation of Karst Springflow, Journal od Mining and Geological sciences, volume 37, pp 55-64, Faculty of Mining and Geology, Belgrade

[4] Milanović P., 1979.: Hidrogeologija karsta i metode istraživanja, izd. HE "Trebišnjica",

Institut za korišćenje i zaštitu voda na kršu, Trebinje.

[5] Milanović S., 2010.: Formiranje fizičkog modela karstne izdani na primeru Beljanice (Istočna Srbija), Doktorska disertacija, Rudarsko geološki fakultet, Univerziteta u Beogradu, str. 421.

[6] Petrović J., 1974.: Krš istočne Srbije, Srpsko-geografsko društvo, posebna izdanja, 1-91, Beograd.

[7] Prohaska S., 2003.: Hidrologija - 1 deo, Rudarsko-geološki fakultet, Institut za vodorprivredu "J. Černi" i Republički hidrometeorološki zavod Srbije, str, 556

[8] Prohaska S., Petković T., Simonović S., 1977.: Primena višestruke nelinearne standardizovane korelacije pri proračunu korelacionih veza, Saopštenja Instituta za vodoprivredu "Jaroslav Černi", br. 58, str. 25-34, Beograd

[9] Prohaska S., Petković T., Simonović S., 1977.: Nelinearni matematički modeli za produženje i popunjavanje prekida kod hidroloških vremenskih serija, Saopštenja Institua za vodoprivredu "Jaroslav Černi", br. 587, str. 25-34, Beograd

[10] Prohaska S., Petković T., Simonović S., 1979.: Matematički model za prostorno prenošenje i interpolaciju hidrometeoroloških podataka, Saopštenje Instituta "Jaroslav Černi", br. 64, Beograd

[11] Prohaska S., Ristić V., Srna P., Marčetić I., 1995.: The use of Mathematical VMC Model in Defining Karst Spring Flows Over the Years, XV Congress of the Carpatho-Balkan Geological Association, 4/3, str. 915-919, Atina.

[12] Prohaska S., Ristić V., Dragišić V., 2002.: Assessment of Groundwater Storage in Karstic Aquifer, XXI st Conference of Danubian Countries on the Hydrological Forescasting and Hydrological Bases of Water Management, pp 138, Bucharest, Romania, 2002.

[13] Prohaska S., Ristić V., Majkić B., 2006.: A cross-correlation analysis of the effects of atmospheric precipitation and water level in the karst field of East Herzegovina on the Bregava river flow regime, International conference "Water resources and enviromental problems in karst, pp 531 - 538, Belgrade

[14] Ristić V., 2007.: Razvoj simulacionog modela za proračun dnevnih isticanja iz karstnih vrela,

- Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, str. 319. Beograd.
- [15] Stevanović Z., 1987.: "Hidrogeološke karakteristike ležišta karstnih izdanskih voda istočne Srbije sa aspekta mogućnosti vodosnabdevanja", Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, str. 1-384
- [16] Stevanović Z., 1991.: "Hidrogeologija karsta Karpato-balkanida istočne Srbije i mogućnosti vodosnabdevanja", Monografija, Rudarsko-geološki fakultet, Univeziteta u Beogradu, str. 1-245.
- [17] Stevanović Z., 1992.: Režim izdašnosti karstnih vrela na području karpato-balkanida istočne Srbije, Geološki anali Balkanskog poluostrva, knj. 56, str. 411-436, Beograd
- [18] Stevanović, Z., Milanović, S., Ristić Vakanjac, V., 2010.: Supportive Methods for Assessing Effective Porosity and Regulating Karst Aquifes, Acta Carstologica, Slovenia, ISSN 0583-6050, Volume 39, number 2, pp 301-312
- [19] Stevanović Z., Ristić Vakanjac V., Milanović S., Vasić Lj., Petrović B., 2012.: Značaj monitoringa podzemnih voda u karstu Srbije, ASAK
- [20] Thornthwaite C. W., 1948.: An Approach to a Rational Classification of Climates, Geograph. Rev. 35, 55-94.

DYNAMIC VOLUME OF KARST AQUIFER AND WATER BALANCE OF VELIKO VRELO KARST SPRING (SOUTH BELJANICA)

by

Vesna RISTIĆ VAKANJAC¹, Zoran STEVANOVIĆ¹, Dušan POLOMČIĆ¹, Borislava BLAGOJEVIĆ²,
Marina ČOKORILO¹, Dragoljub BAJIĆ¹

¹ University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology

² University of Niš, Faculty of Civil Engineering and Architecture

Summary

Past hydrologic and hydrogeological investigations of the karst and karst springs in Serbia were generally based on analyses of existing monitoring data and measurements of water levels and discharges. In most cases, the available data series which were used and analyzed were relatively short (often reflecting a period of less than one year) and, as such, were not necessarily realistic for basing assessments of aquifer reserves, the aquifer water balance and, consequently, the subsequent needs of aquifer water users (water supply, fish farming, bottling, balneology, irrigation...). Attempts have been made over the past ten years to either extend or supplement the existing monitoring and measurement data series for karst spring discharges. The reason for this is that multi-annual series of average monthly discharge data allow for a more reliable determination of the nature of the average

discharge, as well as of the minimum discharge for desired water supply security – a very important factor in the assessment of the reliability of a water resource in the overall water balance, particularly for drinking water supply purposes.

Karst spring discharge is a highly complex process in the formation of river flow. The large fluctuation amplitude of karst spring discharges is a consequence of the highly complex geological structure through which the water passes between the time of infiltration/sinking of a raindrop and the time of its emergence at the karst spring. As a result, the active (underground) size of the karst spring catchment area is often improperly defined. Additionally, the calculation of available reserves or the various parameters of the water balance equation frequently reflect the

topographic size of the catchment area, and not the actual, active (underground) size; the two differ to a large extent where karst is concerned.

The mathematical model, which in addition to determining total daily evapotranspiration, generates active catchment area sizes, was developed with several mutually-independent levels. Each level performs specific functions; their mathematical structure and time step are different, but their common ultimate objective is the definition of multi-annual daily discharges.

The developed model supports a large number of parameters which are determined at various levels (modules) on the basis of known input/output variables and physical characteristics of the considered, hydrologically studied catchment areas. The entire concept is based on the assumption that model parameters should first be determined for hydrologically studied catchment areas, that they should then be spatially homogenized and zoned, and, finally, that in homogeneous areas they should be superimposed on hydrologically unstudied catchment areas.

At the current stage of development, the model includes three levels (modules), whose computation functions and purposes differ. These levels are:

- √ Level 1: Supplementation of average monthly discharge series – the VNC module
- √ Level 2: Determination of the length of the reference period for assessment of the elements of the multi-annual water balance of the karstic aquifer – the INTKR module
- √ Level 3: Assessment of the karst aquifer water balance – the BALANCE module

The major practical outcomes of the developed simulation model are quantitative determinations of:

- √ karst aquifer catchment areas,
- √ dynamic volumes of the porous space in which karst groundwater is stored, and
- √ actual evapotranspiration from catchment areas which gravitate to karst springs.

In this case study, the Veliko vrelo karst spring, which belongs to the karstic formation of Beljanica (the Carpatho-Balkanide Arch of Eastern Serbia) was used to calibrate and validate the model.

Key words: karst, ground waters, catchments area, water balance, real evapotranspiration

Redigovano 17.07.2013.