

RAZVOJ DISTRIBUIRANOG MODELA ZA HIDROLOŠKE SIMULACIJE OTICAJA NA SLIVOVIMA U KARSTU

Nenad JAČIMOVIĆ¹⁾, Tina DAŠIĆ¹⁾, Miloš STANIĆ¹⁾,
Branislav ĐORĐEVIĆ, Petar MILANOVIĆ, Nedeljko SUDAR²⁾, Slaviša SAVIĆ³⁾

¹⁾ Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, ²⁾ Zavod za vodoprivredu, Bijeljina, ³⁾ JU Vode Srpske

*Natura in minimis maxima - Priroda je i u najmanjem najveća.
Natura non facit saltum- Priroda ne pravi skokove
ili: U prirodi se sve razvija svojim tokom
(Latinske izreke)*

REZIME

Hidrološki matematički modeli za modeliranje režima oticaja na slivovima postaju znatno složeniji u uslovima slivova u karstnim terenima, kod kojih je dominantna komponenta poniranja i tečenja kroz podzemnu karstnu hidrografsku mrežu. U članku se razmatra primena fizički zasnovanog, distribuiranog hidrološkog modela za simulaciju oticaja na slivovima u karstu. Model 3Dnet-HET je razvijen za simulaciju oticaja na slivu reke Trebišnjice, u uslovima veoma karstifikovanog terena, sa karstnim poljima, a proveravan je i tariran simulacijama na slivu Dabarskog polja i reke Bregave. Razvijeni model je u potpunosti zasnovan na fizičkim zakonitostima kojima se opisuje transformacija padavina u površinski i podzemni oticaj. Proračun transformacije padavina u oticaj je funkcionalno podeljen na dva osnovna dela, gde izlaz iz prvog dela predstavlja ulaz u drugi. U prvom delu simulira se vertikalno kretanje vode i formiranje podzemnog i površinskog oticaja, na osnovu padavina i meteoroloških uslova kao ulaznih parametara. Drugi deo razvijenog hidrološkog modela predstavlja (uslovno horizontalno) kretanje vode u karstnoj sredini. Model se pokazao vrlo uspešnim i primenljivim za analize geneze protoka u uslovima karsta, jer su analize tariranja sa periodima izvršenih osmatranja pokazali vrlo dobro slaganje zabeleženih i modeliranih hidroloških serija. Model je pogodan i za rešavanje zadataka planiranja, a posebno je dragocen u uslovima eksploatacije sistema, pod uslovom da se obezbedi dobra i operativna podrška mernim i informacionim sistemom (brza dostava podataka o padavinama, itd.).

Ključne reči: hidrološki matematički modeli, karst, padavine, oticaji, Dabarsko polje

1. UVOD

Razvoj hidroloških matematičkih modela (MM) režima tečenja podzemnih i površinskih voda na slivovima u karstu posebno je podstaknut realizacijom sve složenijih vodoprivrednih sistema (VS). Do porasta složenosti VS dolazi njihovim proširivanjem na sve šire delove slivova, spajanjem ranije parcijalnih sistema u jedinstvene upravljačke celine, realizacijom VS u sve težim geotehničkim uslovima (u uslovima karsta), uz sve strožije uslove za skladno uklapanje sistema u okruženje, sa sve brojnijim kriterijumima za vrednovanje i sa sve strožijim ograničenjima. Takav porast složenosti VS nužno mora da prati i razvoj sve složenijih MM vodnih režima, koji su preduslov i za dobro donošenje planerskih odluka i pri izboru dispozicija sistema, i pri optimalnom operativnom upravljanju.

Generalno, izrada MM vodnih režima ima sledeća polazišta: ▪ MM su homomorfog tipa, što podrazumeva da se modeli usmeravaju samo na one fenomene, veze, procese i transformacije koji su od interesa za upravljanje VS. ▪ MM treba da bude adaptivan, da bude otvoren za nesmetan dalji razvoj, u skladu sa razvojem VS, ali i sa postepenim poboljšavanjem izučenosti sliva, ▪ Modeliranje i dopunjavanje i proveravanje baza podataka su paralelan proces. ▪ Moraju se poštovati svi postulati modeliranja: osmotrivosti, stabilnosti modela, ekstrapolativnosti, slaganja objekta / procesa u realnosti i u modelu, operativnosti (Đorđević, 1990).

U skladu sa principima modeliranja moguće je razvoj dve klase MM: (a) MM tipa 'crne kutije', koji podrazumeva nalaženje analitičke veze samo na relaciji: 'ulaz→izlaz', pri čemu, u toj fazi planiranja, nije bitno sagledavanje

međuprocasa koji se odigravaju u samom sistemu tokom transformacije padavina u proticaj; (b) MM tipa 'providne kutije', u kojima se pored ulazno - izlaznog preslikavanja obuhvataju i važniji procesi transformacija koje se odigravaju unutar sistema tokom geneze proticaja.

Proširivanje postojećeg VS na slivu Trebišnjice nastavkom realizacije ranije planiranog celovitog sistema i na područje tzv. Gornjih horizontata istočne Hercegovine, u skladu sa Strategijom integralnog upravljanja vodama Republike Srpske 2015-2025. (Đorđević i drugi, 2013) podstakao je razvoj obe klase MM. To karstno područje je u hidrološkom, hidrogeološkom i geotehničkom pogledu jedno od najsloženijih na čitavom području Balkana. Neće se ovde detaljnije prikazivati, jer je to učinjeno u radu (Milanović i saradnici, 2012), a još detaljnije u monografiji (Milanović, 2006). Odlikuju ga veoma složeni oblici karsta, sa karstnim poljima, vrtačama, ponorima, estavelama, sa razvijenim podzemnim tokovima, sa pojavama i podzemne bifurkacije (tečenje u raznim smerovima) zavisno od stanja vodnosti.

Analize geneze protoka primenom MM, i razmatranje uticaja planiranog VS na hidrološke procese na razmatranom području, obavljane su u više navrata. Poseban razlog za ta istraživanja bila je neophodnost da se apriori, još tokom projektovanja, sagledaju mogući uticaji sistema na Gornjim horizontima na šire okruženje, koje uključuje deo sliva Neretve. Zbog toga su u više navrata, na raznim nivoima detaljizacije, rađeni MM (Stanić, Dašić, 2005), (Milanović, 2012). Svi modeli su pokazali da se planirani VS na Gornjim horizontima može ne samo skladno da uklopi u ekološko i socijalno okruženje, već i da će akumulacije koje uređuju vodne režime poboljšati ekološke uslove na širem području, uključujući i tok Trebišnjice na deonici kroz Trebinje (Đorđević i Dašić, 2011), (Knežević, 2012). Modeli i obavljani istražni radovi su pokazali da se odgovarajućim upravljanjem akumulacijama i radovima na uređenju korita Bregave mogu čak i povećati protoci Bregave na potezu kroz grad Stolac.

Projektovanje HE Dabar, kao ključnog objekta sistema na Gornjim horizontima, podstaklo je ponovna matematička modeliranja protoka u široj zoni uticaja tog objekta. I u ovom slučaju su radi pouzdanosti zaključivanja promenjena dva MM:

- (a) ARMA MM iz klase modela 'crne kutije', i
- (b) 3 Dnet-HET model.

Model tipa ARMA metodološki je detaljnije razmatran u članku (Milanović et al., 2012), pa je u ovom članku predmet samo metodološko razmatranje 3 Dnet-HET uz analizu upotrebljivosti MM iz te klase fizički zasnovanih, semi-distribuiranih hidroloških modela.

2. MATEMATIČKI 3Dnet-HET MODEL

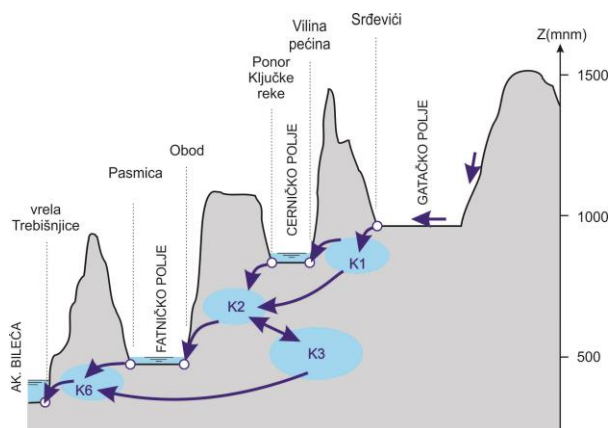
2.1. Razlozi i polazišta za razvoj 3Dnet-HET modela

Prema prostornoj diskretizaciji, hidrološki modeli mogu da budu: • prostorno homogeni modeli, • prostorno raspoređeni modeli (distribuirani modeli) i • prelazni, prostorno delimično raspoređeni modeli (semi-distribuirani modeli). U slučaju prostorno homogenih modela, sliv se tretira kao homogena celina sa parametrima koji predstavljaju efektivne vrednosti. U slučaju prostorno raspoređenog modela, sliv se deli na veliki broj podslivova sa različitim karakteristikama, a jednačine modela se rešavaju za svaki poligon zasebno. Od broja i veličine poligona zavisi i koliko će model biti prostorno raspoređen i koliko u obzir uzima prostornu varijaciju parametara.

Ključni razlozi za usvajanje, razvoj i korišćenje 3Dnet-HET modela u slučaju simuliranja režima proticaja na izrazito karstnom području istočne Hercegovine (videti shemu na slici 1) su sledeći:

- Model je u potpunosti zasnovan na fizičkim zakonitostima kojima se opisuje transformacija padavina u površinski i podzemni oticaj, pa se mogu na globalnijem nivou pratiti procesi tečenja po ključnim komponentama vodnog bilansa.
- To je distribuirani MM koji omogućava modeliranje dekompozicijom slivnog područja na manje podslivove - 'prostorne obuhvate' proizvoljnog oblika. Dekompozicija MM je neophodna u uslovima karstifikovanih terena, jer režim(e) tečenja odlikuje brzo poniranje palih voda i oticanje u raznim pravcima kroz sisteme vrlo složene podzemne karstne hidrografske mreže. Oticač sa takvih podslivova završava se u kontrolnim profilima hidrografske mreže – hidroprofilima (HP) ili karstnim izdanima (KI). MM tog tipa su pogodni za slučaj kada se zbog karstifikovanih formacija bitnije razlikuju orografske od hidrogeoloških granica slivova, što je slučaj sa Gornjim horizontima sliva Trebišnjice. Model definiše pravce i smerove tečenja kroz karstne kanale što ima niz prednosti u fazi planiranja sistema i sagledavanja mera za poboljšanje njegovog ekološkog delovanja, u skladu sa sadašnjim pristupom da hidrotehnički sistemi treba da stvaraju uslove za obogaćivanje biodiverziteta. Na slici 1 dat je shematski profil dela sliva Trebišnjice sa prikazom

hidrauličkih veza i čvorova kao osnovnih elemenata dekomponovanog sistema (K predstavlja oznaku karstne izdani, dok strelice označavaju hidrauličke veze).



Slika 1. Shematski profil dela sliva Trebišnjice sa prikazom hidrauličkih veza i čvorova kao osnovnih elemenata dekomponovanog sistema (K predstavlja oznaku karstne izdani, dok strelice označavaju hidrauličke veze)

- Podela na podsisteme omogućava da se svaki od njih opisuje konkretnim karakterističnim veličinama (koeficijenti vertikalne filtracije, poroznost, karakteristične vlažnosti, itd.). To omogućava da se izdvajaju geomorfološke i hidrogeološke celine. Ti elementi se generalno mogu podeliti na čvorove sistema, kao što su karstna polja, podzemne karstne izdani, veštačke akumulacije, i skup hidrogeoloških veza koje u hidrauličkom smislu povezuju prethodno navedene elemente i koje reprezentuju površinske i podzemne tokove kojima su povezani navedeni čvorovi. Te veze predstavljaju linijske elementa sistema. Nad ovim elementima se najpre vrši proračun vertikalnog vodnog bilansa. Pomoću linijskih elemenata sistema (hidrauličkih nadzemnih i podzemnih veza) se vrši proračun horizontalnog vodnog bilansa.

- Proračun transformacije padavina u oticaj je funkcionalno podeljen na dva osnovna dela, gde izlaz iz prvog predstavlja ulaz u drugi. U prvom delu se simulira vertikalno kretanje vode i formiranje podzemnog i površinskog oticaja. Ulaz u ovaj deo su padavine i meteorološki parametri, dok izlaz predstavlja veličina infiltracije ka karstnim izdanima i površinski oticaj na karakterističnim hidroprofilima, kao što su karstna polja. Vertikalni vodni bilans se distribuirano računa na čitavoj površini sliva, pri čemu će detaljniji matematički opis ovog procesa biti prikazan u nastavku.

- Model ovog tipa je adaptivan, tako da se može fazno dograđivati, zavisno od toga kako se proširuje stepen izučenosti sliva, kako se poboljšavaju baze podataka i njihova tačnost i operativnost u smislu dostave podataka upravljačko-informacionom delu sistema. Tokom razvoja MM njegove transformacije su sve transparentnije, sa sagledavanjem sve dataljnijih međufaza u procesu definisanja protoka, što ima niz prednosti tokom upravljanja.

- Model omogućava razmatranje celog nadsistema, koga čini vrlo složeni hidrogeološki sliv u karstifikovanom masivu, u koji se tokom više faza razvoja inkorporira hidrotehnički sistem sve složenije konfiguracije, sa sve više veza pojedinih elemenata.

- Operativnost modela je veoma dobra, tako da se može uspešno koristiti kao jedan od estimacionih modela u upravljačkim modelima.

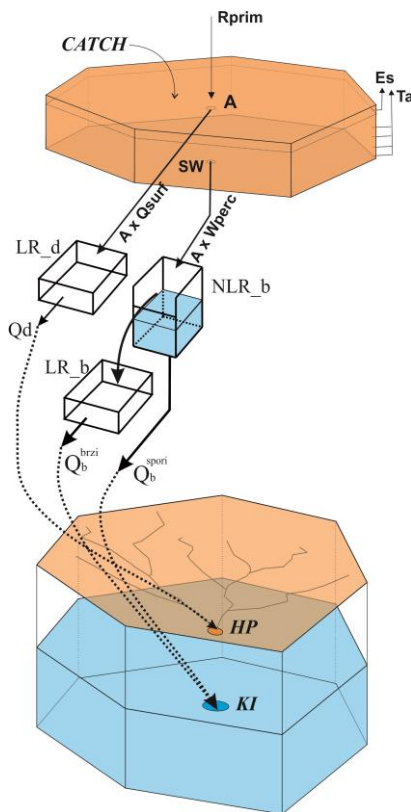
2.2. Proračun vertikalnog vodnog bilansa

Pri matematičkom modeliranju režima oticanja u uslovima vrlo izražene karstifikacije sliva – proračun vertikalnog vodnog bilansa posebno dobija na značajnosti. Na nivou svakog podsliva se računa vertikalni bilans i određuju komponente površinskog (označenog sa Q_{surf}) i dubinskog oticaja (W_{perc}). Svaka komponenta oticaja se izliva u poseban linearni rezervoar (LR_d i LR_b) i transformiše se u oticaj na odgovarajućem pripadajućem hidroprofilu. Ova transformacija kroz linearne rezervoare se obavlja nezavisno za obe komponente, tako da je moguće imati različite čvorove (HP ili K) u kojima završava površinski i/ili dubinski oticaj. Na slici 2 je shematski prikazan jedan podsliv sa osnovnim komponentama vertikalnog vodnog bilansa na podslivu.

Za proračun vertikalnog bilansa ulazni podaci su padavine i potencijalna evapotranspiracija, zadati u formi fluksa na površini terena, kao i karakteristične temperature vazduha (T_{max} , T_{min} i T_{sr}). Ukoliko su u model uneti podaci sa više meteoroloških stanica, primenjuje se prostorna interpolacija kao i visinska korekcija padavina i temperature, tako da svaki podsliv ima jedinstvene 'svoje' ulazne meteorološke podatke.

Podslivovi, koji mogu biti proizvoljnih oblika, biraju se prema orografskim i hidrogeološkim karakteristikama, tako da se mogu tretirati kao entiteti sa kvaziuniformnim fizičkim odlikama. U okviru podsliva računaju se sve komponente vertikalnog vodnog bilansa, pa se isti može dekomponovati na tri zasebna

rezervoara: • rezervoar vegetacije u kome se odvija intercepcija, • rezervoar snežnog pokrivača u kome se odvijaju procesi sublimacije i topljenja snega, • rezervoar zemljišta koji je podeljen na nekoliko slojeva u kojima se odvijaju procesi evaporacije, transpiracije, oticaja i perkolacije.



Slika 2. Shematski prikaz podsliva površine A i osnovnih komponenti vertikalnog vodnog bilansa

Proračun vertikalnog vodnog bilansa počinje određivanjem potencijalne evapotranspiracije (E_o) i definisanjem vrste padavina - da li su zadate (R') u formi snega ili kiše. Ukoliko nije unet podatak o potencijalnoj evapotranspiraciji, on se u okviru modela računa prema jednačini Hargreaves-a na osnovu temperature vazduha.

Za proračun topljenja snega računa se temperatura snega T_{sno} , koja se računa kao ponderisana vrednost između temperature snega u prethodnom vremenskom koraku i srednje dnevne temperature T_{sr} :

$$T_{sno}(i) = (1 - \lambda_{sno})T_{sno}(i-1) + T_{sr}\lambda_{sno} \quad (1)$$

gde je λ_{sno} koeficijent ponderacije koji uzima vrednost 0 do 1. Količina otopljenog snega računa se prema sledećoj jednačini:

$$SNO_{mlt} = b_{mlt} \cdot sno_{cov} \cdot \left(\frac{T_{sno} + T_{max}}{2} - T_{mlt} \right)$$

gde su b_{mlt} - koeficijent topljenja snega ($\text{mm vode } C^{-1} \text{ dan}^{-1}$); T_{mlt} - temperatura pri kojoj dolazi do otapanja snega. Koeficijent topljenja snega uzima u obzir sezonsku varijaciju i u model se unosi kao vremenska serija. Nakon proračuna otapanja potrebno je sračunati i sublimaciju i isparavanje sa snežnog pokrivača (E_{sub}). Nakon toga, preostaje da se sračuna konačno stanje rezervoara ($SNO_{(i)}$).

Na osnovu proračuna rezervoara vegetacije i rezervoara snežnog pokrivača, ukupne padavine su redukovane (R) i određena je dodatna količina vode koja potiče od topljenja snežnog pokrivača (SNO_{mlt}). Tada se površinski oticaj može odrediti primenom SCS metode. Imajući u vidu da potencijano upijanje zavisi samo od usvojene vrednosti CN broja, SCS metoda nije pogodna za kontinualne simulacije, jer ne uzima u obzir promenu vlažnosti zemljišta. Odnosno, potencijalno upijanje će biti isto bez obzira da li je padala kiša i zemljište je potpuno vlažno ili je kišnoj epizodi prethodio sušni period i zemljište je prosušeno. Zbog toga su uvedene određene modifikacije, koje omogućavaju da se u obzir uzme i stvarna prethodna vlažnost zemljišta.

Pošto se vrednost CN broja odnosi se na pad terena od 5% potrebno je obaviti korekciju na osnovu stvarnog nagiba terena koji ima podsliv. Kada se izvrši ova korekcija dobija se nova korigovana vrednost CN broja koja odgovara prosečnoj važnosti zemljišta. Na osnovu ove vrednosti se računaju brojevi CN_1 i CN_3 koji se odnose na uslove suvog zemljišta (CN_1) pri minimalnoj vlažnosti i uslove vlažnosti poljskog kapaciteta (CN_3). Nakon toga se mogu odrediti maksimalno i minimalno potencijalno upijanje na sledeći način:

$$S_{max} = 25.4 \cdot \left(\frac{1000}{CN_1} - 10 \right); S_{min} = 25.4 \cdot \left(\frac{1000}{CN_3} - 10 \right) \quad (3)$$

Stvarno potencijalno upijanje (mm) nalazi se u granicama između S_{min} i S_{max} , i računa se na osnovu stanja svih slojeva (layera) na početku računskog intervala:

$$S = \sum_{j=1}^{n_l+1} p_j (STO_j - SW_j(i-1)) \quad (4)$$

gde je n_l broj podpovršinskih slojeva, a p_j procentualno učešće sloja.

Nakon proračuna oticaja računa se novo stanje rezervoara površinskog sloja zemljišta (SW'). Zatim sledi proračun perkolacije, odnosno procurivanja W_{perc} iz površinskog sloja u naredni podpovršinski sloj zemljišta. U zavisnosti od odnosa stanja rezervoara i njegovog kapaciteta perkolacija se može podeliti na dva dela: perkolaciju iz zasićenog zemljišta (W_{perc_sat}) i perkolaciju iz nezasićenog zemljišta (W_{perc_unsat}). Ukupna perkolacija je zbir ove dve komponente i može se sračunati prema sledećoj jednačini:

$$W_{perc} = K_{sat}\Delta T_{sat} + (STO - WP) \left(S_r - \left(S_r^{(1-n)} + \frac{K_{sat}}{STO - WP} (n-1) \Delta T_{unsat} \right)^{\frac{1}{1-n}} \right) \quad (5)$$

gde je K_{sat} koeficijent filtracije za zasićeno zemljište.

Procurivanje, odnosno, perkolacija (W_{perc}) se transformiše kroz sistem rezervoara koji se sastoji od jednog nelinearnog rezervoara sa prelivom (NLR_b) i običnog linearnog rezervoara (LR_b). Ukupna perkolacija sa svih podslivova koji se izlivaju u odgovarajući profil hidrografske mreže se izliva u nelinearni rezervoar sa prelivom koji simulira spori - bazni oticaj, a u linerani rezervoar se preliva višak vode iz ovog rezervoara i on, nakon transformacije u njemu, predstavlja brzi podpovršinski oticaj. Zbir ova dva oticaja predstavlja ukupan podpovršinski oticaj (slika 2).

2.3. Proračun horizontalnog vodnog bilansa

Proračun horizontalnog vodnog bilansa se zasniva na sistemu čvorova i hidrauličkih veza kojima su čvorovi povezani. Čvorovi sistema predstavljaju karstna polja, akumulacije i karstne izdani, dok hidrauličke veze povezuju, na primer, karstno polje i karstnu izdan koja se prihranjuje iz polja putem ponora, ponorskih zona i/ili estavela. Kod opisa hidrauličkih veza, one mogu da opisuju hidraulički kratke ili dugačke objekte, odnosno prelaze iz jednog u drugi oblik. To je postignuto korišćenjem opšteg izraza:

$$Q = C_1 \sqrt{2g(\Pi - Z_1)} + C_2 \sqrt{2g(\Pi - Z'_1)} \quad (6)$$

gde je: Π - nivo u polju / izdani, Z_1 - nivo gde se meri protok (ili nivo u drugoj izdani, zavisno od toga da li se radi o vezi između dve izdani ili između izdani i vrela) i Z'_1 - karakteristični nivo pri kome dolazi do promene uslova tečenja.

Treba naglasiti da koeficijenti u prethodnoj jednačini imaju fizičko značenje, kao i da imaju dimenziju površine. Na primer, u uslovima tečenja pod pritiskom,

koeficijenti C_1 i C_2 , u hidrauličkom smislu mogu izraziti kao:

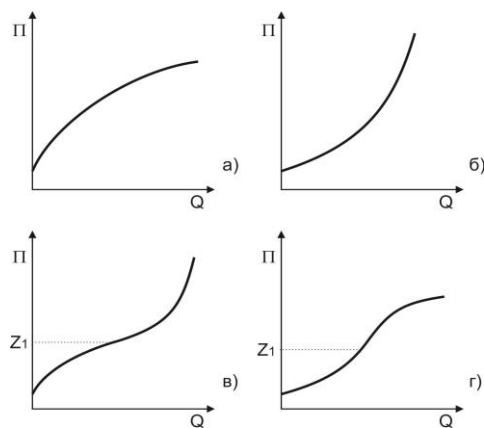
$$C_1 = C_{q1} A_1 \quad (7)$$

$$C_2 = C_{q2} A_2 \quad (8)$$

gde je A hidraulički reprezentativna površina poprečnog preseka provodnika, C_q tzv. koeficijent protoka, koji zavisi od hidrauličkih otpora duž provodnika između lokacija na kojima su definisane veličine Π i Z_1 .

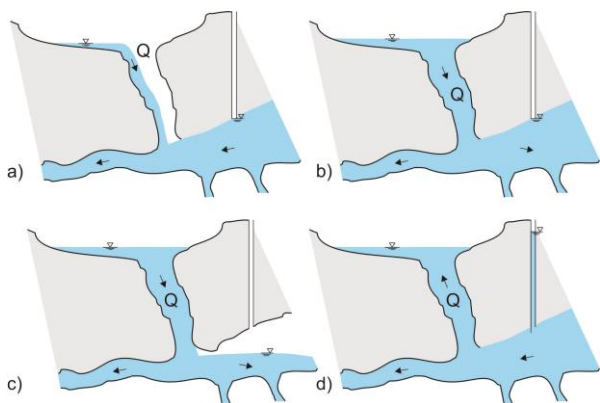
Pijezometarska kota Π koja figuriše u jednačini (6) može da predstavlja stanje nivoa podzemne vode na proizvoljnom mestu podzemne izdani. Pri izradi modela se teži da to budu lokaciju pijezometra na kojima se vrši osmatranje nivoa. To mogu da budu i neke druge lokacije, ali je potrebno korigovati i koeficijente C_1 i C_2 , jer od lokacije pijezometarskog nivoa zavise hidraulički gubici duž provodnika, a time i koeficijenti protoka.

Razjašnjenje primene navedene jednačine za proračun protoka u hidrauličkoj vezi je prikazano na Slici 3, za slučaj tečenja između dva rezervoara, u zavisnosti od nivoa u uzvodnom i nizvodnom rezervoaru. Naravno, mogući su i složeniji uslovi tečenja. Na primer, kada se posle dostizanja određenog nivoa u karstnoj izdani aktiviraju dodatni provodnici, pa se ukupni efekat ogleda kao višestruki prelaz iz preliivanja u isticanje, i obrnuto. U okviru istraživanja mogućnosti primene ovog matematičkog modela, utvrđeno je da se na ovaj način može vrlo uspešno opisati hidrauličko ponašanje izvorišne zone reke Bregave.



Slika 3. Pretpostavljeni oblici veza između razlike nivoa i protoka kod modeliranja podzemnih veza: a) preliivanje, b) tečenje pod pritiskom, v) složeni uslovi tečenja – prelaz iz režima preliivanja u tečenje pod pritiskom, i g) tečenje pod pritiskom sa uključenjem dodatnih provodnika iznad karakteristične kote Z'_1 .

Jednačinom (6) pretpostavljen je mogući uticaj nivoa u nizvodnoj izdani na kapacitet ponora ukoliko se radi o tečenju pod pritiskom, tako da u tim uslovima, u jednačinama figuriše i nivo vode u izdani u koju se ponor prazni. Na ovaj način je moguće simulirati i rad estavela. Naime, kada nivo u nizvodnoj izdani premaši nivo u polju, dolazi do promene smeru toka. Naravno, u tom slučaju se radi isključivo o strujanju pod pritiskom, pri čemu je pretpostavljeno da su hidraulički otpori duž toka isti u oba smera. Drugim rečima, važe isti koeficijenti tečenja pod pritiskom, bez obzira na smer toka.



Slika 4. Shematski prikaz obuhvaćenih uslova tečenja u slučaju ponora: a) prelivanje-tečenje sa slobodnim nivoom, b) tečenje pod pritiskom pod uticajem nizvodnog nivoa u izdani, c) tečenje pod pritiskom-isticanje bez uticaja nizvodnog nivoa u izdani, d) estavela-tečenje u suprotnom smeru.

3. ISTRAŽIVANJE REŽIMA OTICAJA U SLIVNOM PODRUČJU VRELA REKE BREGAVE

Kao što se zapaža, struktura matematičkog modela je upravo i odabrana tako da se modelom mogu da simuliraju i istražuju režimi tečenja u uslovima veoma izraženih karstifikovanih slivova. Matematički model je posebno proveravan za analizu režima oticaja prema vrelima reke Bregave. Razlozi za proveravanje su trojaki: (a) taj sliv je veoma složen karstni sistem, pa se po uspešnosti metode u takvim najsloženijim uslovima može ocenjivati univerzalnost matematičkog modela, (b) reka Bregava je u ekološkom i socijalnom pogledu vrlo značajan vodotok, pa je neophodno sasvim pouzdano sagledati režim tečenja u njenom slivu i mere koje treba preduzeti da bi se ekološke vrednosti vodotoka ne samo očuvale, već i poboljšale odgovarajućim upravljanjem nakon realizacije sistema

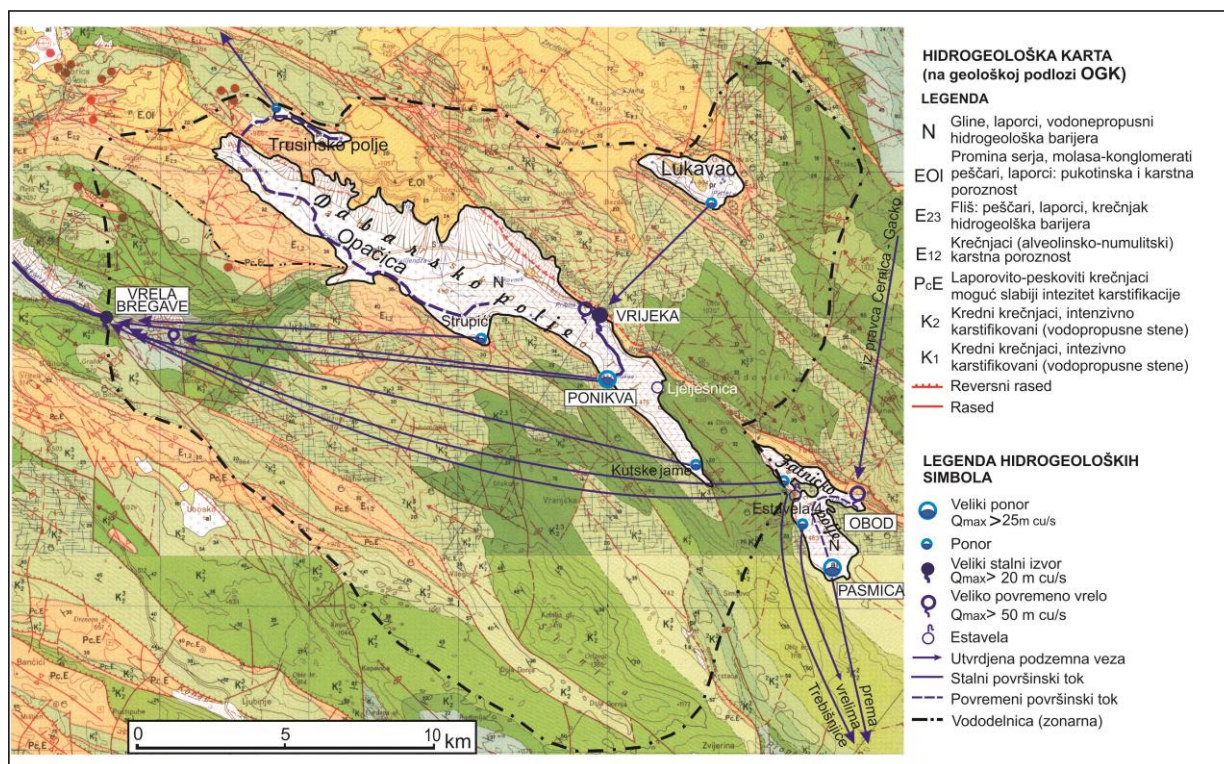
Dabar u Dabarskom polju, (c) na slivu Bregave već je proveravan ARMA matematički model, koji je pokazao odlično slaganje, pa je ovo bila prilika da se proveri da li se uspešno može primeniti i model iz ove klase distribuiranih, fizički zasnovanih modela, u kojima se mogu pratiti sve relevantne faze režima tečenja i vodnog bilansa.

Bregava pripada slivu Neretve. Na istoku se sliv Bregave graniči sa slivom Trebišnjice, a prema severu sa slivovima Bune i Bunice. Sliv vrela Bregave čine delovi planinskih masiva Hrguda i Sitnice i Dabarskog polja koji uključuje podslivove Trusinskog i Lukavačkog polja. Dabarsko polje (slika 5) je formirano duž regionalnog reversnog raseda sa nagibom 60° do 70° u pravcu severoistoka. Dubina terciarnih sedimenata se kreće između 200 i 400 m. Severni obod polja grade krečnjaci i sedimenti Promine, a južni obod veoma karstifikovani krečnjaci kredne starosti. Velika dubina vodonepropusnih sedimenata u Dabarskom polju deli posredni sliv vrela Bregave od neposrednog sliva, odnosno sliv Dabarskog polja od sliva nizvodno od Dabarskog i delom Fatničkog polja. Površina sliva Bregave se procenjuje na 418 km². Od toga posrednom slivu, odnosno slivu Dabarskog polja pripada oko 200 km², a neposrednom delu sliva oko 218 km². Granice neposrednog sliva su podložne korekcijama, jer zavise od trenutnih hidroloških prilika odnosno nivoa poplavne vode u Fatničkom polju.

Izvorišna zona reke Bregave se proteže između stalnog vrela Bitunje na koti 130 m i povremenih vrela Mali Suhavić i Veliki Suhavić na koti oko 195 m. Na slici 5 prikazana je uprošćena geološka karta područja Bregave od izvora do Stolca. Proticaji se kontrolišu na vodomernoj stanici Do. Osnovne karakteristike proticaja reke Bregave na vodomernoj stanici Do su: $Q_{\min} \approx 0,40$ m³/s; $Q_{\max} = 59$ m³/s; $Q_{sr} = 17,5$ m³/s. U sušnoj 2003 godini izmerena je minimalna izdašnost $Q_{\min}=380$ L/s. To se događalo u vreme kada je u ponor Ponikvu u Dabarskom polju uticalo samo 43 L/s (13. 08. 2003).

Ponor Ponikva (slika 6) na južnom obodu Dabarskog polja predstavlja najznačajniju zonu koncentrisane infiltracije neposrednog sliva Bregave. Sa vrelima Bregava utvrđene su i veze sa Kutskim jamama i ponorom Strupići u Dabarskom polju i estavelama ispred Velike pećine u Fatničkom polju.

Sliv koji je ovim modelom obuhvaćen može se podeliti na dva dela: sliv Dabarskog polja i neposredni sliv vrela Bregave. Udeo u izdašnosti vrela Bregave ima i manji



Slika 5. Sliv izvorišne zone reke Bregave sa značajnijim ponorima, vrelima, estavelama i utvrđenim podzemnim vezama. Geološka podloga: osnovna geološka karta (listovi Nevesinje i Trebinje).

deo voda Fatničkog polja. Karstni sistemi koji odvođe vodu iz ovog polja u pravcu Bregave uključuju se postepeno sa porastom nivoa poplave i dostižu svoj maksimum kada je nivo poplave veći od 8 m (kota 671 m n.m.), a da je istovremeno nivo podzemne vode u bifurkacionoj zoni znatno niži od nivoa polja, odnosno da estavele rade kao ponori.

Definisanje granica sliva Dabarskog polja i ukupnog sliva vrela Bregave zasniva se na skromnoj bazi podataka, pre svega na podacima koje pruža geološka karta. Pošto se radi o intenzivno karstifikovanom području infiltracija na većem delu ovih slivova je trenutna, a oticanje podzemno. Za definisanje vododelnica topografske karakteristike imaju mali značaj, a trasiranje podzemnih tokova u neophodnom obimu je teško izvodljivo i preskupo.

Sa sigurnošću je utvrđeno da granice sliva uključuju i dve bifurkacione zone: Trusinsko i Fatničko polje. Dok bifurkaciona zona Trusinskog polja ima značaj (ne veliki) u bilansu Dabarskog polja dotle bifurkaciona zona Fatničkog polja ima značaj za bilans vrela Bregave

ali ne i za Dabarsko polje (mada mogućnost neznatnog uticaja ne treba isključiti).

Za definisanje vododelnica, pored rezultata trasiranja podzemnih tokova i geofizičkih istraživanja korišćena je hidrogeološka interpretacija litoloških članova i položaj ključnih raseda, pre svega regionalnog reversnog raseda duž severoistočnog oboda Fatničkog i Dabarskog polja.



Slika 6. Ponor Ponikva u Dabarskom polju

4. Kalibracija i primena matematičkog modela

Kalibracija hidrološkog modela 3Dnet-HET izvršena je za period od devet godina, 1.1.1972.÷31.12.1980. U tom periodu tunel između Dabarskog i Fatničkog polja, kao ni tunel između Fatničkog polja i akumulacije Bileća nisu postojali, pa je verifikacija rezultata urađena sa pretpostavkom zatvorenih tunela, odnosno prirodnog stanja u tom delu sliva.

Sagledavajući globalni vodni bilans na analiziranom delu sliva zaključuje se da je ukupan oticaj sa sliva oko 88% od ukupnih količina vode koje padnu na sliv, odnosno da se na procese evapotranspiracije gubi samo oko 12% voda. Da bi se verifikovali rezultati modela dva niza podataka su analizirana i upoređena sa osmotrenim vrednostima:

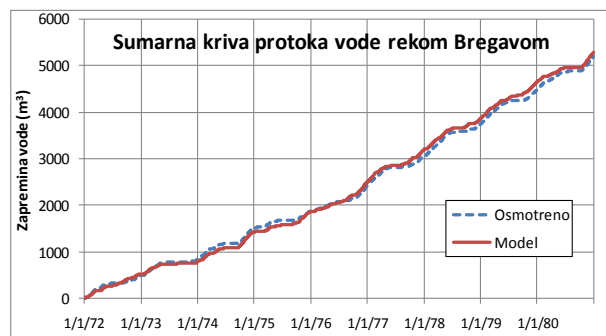
- protoci na reci Bregavi,
- nivoi vode u Dabarskom polju.

Za ocenu kvaliteta modela, odnosno slaganja simuliranih vrednosti dobijenih hidrološkim modelom i osmotrenih vrednosti, korišćeni su koeficijent linearne korelacije i Nash-Sutcliffe koeficijent za ocenu slaganja simuliranih i merenih protoka.

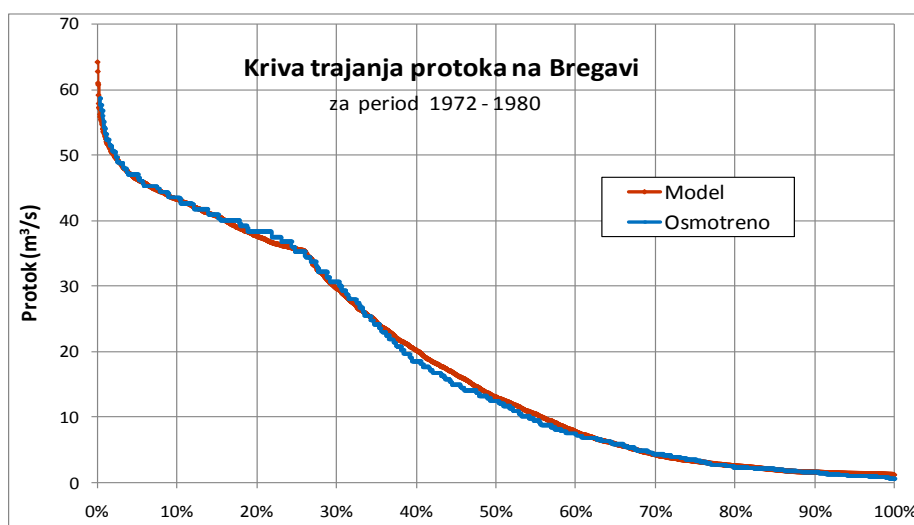
Dobijene vrednosti koeficijenta korelacije za simulirani period od devet godina iznose 0,87 za protoke u reci Bregavi i 0,81 za nivoje u Dabarskom polju. Istovremeno, vrednost Nash-Sutcliffe-ov koeficijenta iznosi 0,74 što ukazuje na vrlo dobro slaganje rezultata modela i osmotrenih vrednosti. Pokazatelj performansi modela je i ocena greške ukupne zapremine vode koja

protiče na mernom profilu. Upoređivanjem srednjih vrednosti merenih i simuliranih protoka za analizirani period dobijena je razlika koja iznosi manje od 1,7% ($\bar{Q}_0=18,36 \text{ m}^3/\text{s}$, $\bar{Q}_m=18,64 \text{ m}^3/\text{s}$). Analiza sumarnih krivih protoka u reci Bregavi za razmatrani period prikazana je na slici 7.

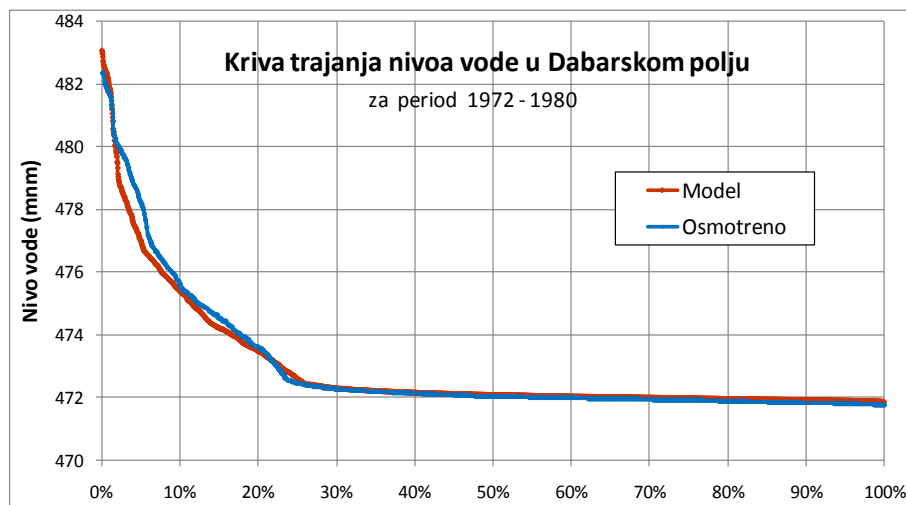
Kao posebno značajan pokazatelj valjanosti modela, poređene su i krive trajanja protoka, dobijene na modelu i merenjima na reci Bregavi (slika 8), koje su formirane za isti period od 1972. do 1980. godina. Uočava se veoma dobro slaganje modeliranih i osmotrenih vrednosti, što ukazuje na to da su modelom, na adekvatan način obuhvaćeni svi fizički procesi i veze polja i karstnih izdani. Kriva trajanja nivoa vode u Dabarskom, takođe, pokazuje veoma dobro slaganje sa krivom trajanja osmotrenih vrednosti.



Slika 7. Sumarna kriva protoka vode reke Bregave u periodu 1972.-1980.



Slika 8. Krive trajanja protoka na reci Bregavi za osmotreni i modelirani niz



Slika 9. Krive trajanja nivoa vode u Dabarskom polju za osmotreni i modelirani niz 1972.-1980. godina

5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Hidrološki simulacioni model 3Dnet-HET detaljno je proveravan i testiran u najsloženijim uslovima karstnih formacija na kojima se nalazi hidrogeološki sliv reke Bregave. Ujedno su rezultati simulacije geneze oticaja upoređivani i sa rezultatima matematičkog modeliranja istog sliva primenom ARMA modela. Ta istraživanja su detaljno prikazana u ranijem radu (*Milanović i saradnici, 2012*) i ovde nisu ponavljana, ali je upoređivanje izvršeno kako bi se i na taj način ustanovila valjanost oba modela i mogućnosti praktične primene u složenim karstnim uslovima. Na osnovu svih analiza mogu se izvući sledeći zaključci, bitni i sa stanovišta teorije hidrološkog matematičkog modeliranja, ali i sa stanovišta donošenja sada sasvim pouzdanih zaključaka o uticajima sistema HE Dabar u Dabarskom polju na vodne režime i ekološke uslove na reci Bregavi.

1. Primena distribuiranog hidrološkog modela 3Dnet-HET zasnovanog na simulaciji fizičkih zakonitosti transformacije padavina u oticaj je moguća i u uslovima najsloženijih karstnih slivova. Preduslov za to je postojanje kvalitetnih nizova osmatranja: padavina, oticaja, a posebno nivoa u karstnim izdanima. Dokazano je da ovakvi modeli omogućavaju pouzdane prognoze oticaja u izmenjenim (projektovanim) uslovima na slivu, te da se kao takvi mogu koristiti za analizu režima oticaja u prirodnim uslovima, ali i u uslovima realizacije

sistema kojima se odgovarajućim upravljenjem (ispuštanjima vode iz akumulacija) menjaju vodni režimi.

2. Matematički model (MM) 3Dnet-HET ima sledeće važne odlike, sa gledišta primene za planiranje sistema i upravljanje tokom eksploatacije: • MM omogućava da se pri prostornoj dekompoziciji uspešno izdvajaju geomorfološke i hidrogeološke celine koje su poželjne za razmatranje sa stanovišta dalje postupne realizacije novih elemenata hidrotehničkog sistema, • kao MM tipa 'providne kutije' model omogućava da se mogu sagledavati i pratiti procesi režima tečenja po ključnim komponentama vodnog bilansa, • MM definiše smerove tečenja kroz podzemnu hidrografsku mrežu, što ima niz prednosti u fazi planiranja sistema i sagledavanja mera za poboljšanje njegovog ekološkog delovanja, • MM je veoma adaptivan, tako da se može fazno dograđivati i proširivati, zavisno od poboljšavanja izučenosti sliva, ali i pri širenju vodoprivrednog sistema na nove delove sliva, • tokom razvoja modela njegove transformacije su sve transparentnije, što omogućava sagledavanje sve detaljnijih međufaza u procesu formiranja karakteristika tečenja, što ima niz prednosti tokom upravljanja hidrotehničkim sistemom, • MM je veoma operativan, brz u simulacijama analiziranih varijanti, tako da se može uspešno koristiti kao jedan od estimacionih modela u bloku ESTIMATOR u kibernetičkim modelima za optimalno upravljanje višenamenskim sistemima.

3. Po dobijenim rezultatima razmatrani 3Dnet-HET je kompatibilan sa rezultatima koji su dobijani za isti sliv primenom ARMA modela. Ta kompatibilnost finalnih rezultata dobijenih primenom dva modela, koji su zasnovani na različitim pristupima (3Dnet-HET je model tima 'providne kutije', a ARMA je jedan od veoma poznatih modele tipa 'crne kutije', jer je zasnovan na primeni markovskih procesa i višedimanzionalnoj korelaciji), nedvojbeno potvrđuje ranije zaključke da se sistem HE Dabar i ostali objekti u okviru Višenamenskog projekta Gornji horizonti, mogu vrlo skladno uklopiti u ekološko, socijalno i urbano okruženje. Zbog važnosti tog stava sažeto će se interpretirati i ti zaključci dobijeni matematičkim simulacijama.

4. Modelom 3Dnet-HET potvrđeni su odnosi doticaja sa međusliva reke Bregave i sliva Dabarskog polja u iznosu 57% i 43%, odnosno vrednosti ukupno doteklih voda sa međusliva i sliva Dabarskog polja, koji su izuzetno značajni sa aspekta ocene uticaja izgrađenih hidrotehničkih objekata u Dabarskom i Fatničkom polju na vodne bilanse reka Bregave i Trebišnjice. Od prosečnog godišnjeg protoka na reci Bregavi koji iznosi 17,7 m³/s doprinos sa međusliva (nizvodno od Dabarskog polja) u proseku iznosi nešto više od 10 m³/s.

5. Varijanta koja je prihvaćena kao konačno tehničko rešenje integralnog višenamenskog hidroenergetskog sistema „Trebišnjica“, po kojoj se skreće samo deo voda Dabarskog polja većih od 1 m³/s, potpuno je ispravna solucija u ekološkom, urbanom, ambijentalnom i socijalnom pogledu, jer se male vode održavaju u režimima koji su, po svim metodama koje se koriste u svetu prihvaćene kao ekološki protoci (Environmental flow), bez ugrožavanja biodiverziteta u zoni uticaja hidrotehničkih sistema. Znači, ako se prevode samo vode veće od 1 m³/s, na VS Do ostaju potpuno neporemećene sve male vode dužeg trajanja od oko 75%. Zbog značaja tog zaključka to se može formulisati i na sledeći način: prosečno trajanje malih voda u profilu VS „Do“ na reci Bregavi u prosečnom trajanju od 25% (91 dan u godini) ostaje potpuno neporemećen.

6. Pošto se pri planiranju hidrotehničkih sistema uvek posebno analizira uticaj na vodne režime u vegetacionom delu godine u modelu ARMA je sprovedena takva analiza. U slučaju reke Bregave stanje očuvanosti režima protoka nakon realizacije sistema još je povoljnije u vegetacionom periodu. U toplom delu godine u slučaju da se u Dabarskom polju prevode samo vode veće od 1 m³/s, male vode na VS Do se ne menjaju

za sve protoke dužeg trajanja od 55%. To je čak i znatno bolje uklapanje u okruženje u odnosu na sve u svetu poznate korišćene kriterijume za obezbeđivanje ekoloških protoka nizvodno od akumulacija i vodozahvata.

7. Prema usvojenim načelnim smernicama funkcionisanja višenamenskog sistema „Trebišnjica“, vodni režimi Bregave na potezu kroz Stolac namenskim upravljanjem i naturalnom regulacijom korita značajno će se poboljšati čak i u odnosu na sadašnje neporemećeno stanje. Na slici 10 je prikazan tok Bregave u malovodnom periodu. Zapaža se vrlo mali protok, koji je urbano, ekološki i ambijentalno neprikladan. Do takvog stanja dolazi zbog poniranja vode duž karstifikovanog korita. U sklopu realizacije integralnog višenamenskog hidroenergetskog sistema planirane su mere geotehničkih intervencija (zaptivnih radova) i naturalne regulacije korita, čiji je cilj smanjenje gubitaka zbog poniranja vode u karstifikovanom koritu Bregave a da se prirodni izgled korita sačuva. Tim merama se male vode na potezu grada Stoca mogu značajno povećati u odnosu na prirodne protoke. Na taj način bi se u malovodnim periodima ostvarilo značajno poboljšanje režima protoka Bregave u zoni urbanog područja Stoca.



Slika 10: Reka Bregava u malovodnom periodu. Zapaža se vrlo mali protok, urbano, ekološki i ambijentalno neprikladan

LITERATURA

- [1] Bratić, R. i drugi (2006): Okvirni plan razvoja vodoprivrede Republike Srpske, Vodoprivreda, 219-221, str.119-130

- [2] Đorđević, B. (1990): Vodoprivredni sistemi, Naučna knjiga, Beograd
- [3] Djordjević, B. (1993): Cybernetis in Water Resources Systems, WRP, USA, pp. 620
- [4] Đorđević, B. i Dašić T (2011): Određivanje potrebnih protoka nizvodno od brana i rečnih vodozahvata, Vodoprivreda, 252-254, str.151-164
- [5] Đorđević, B., T.Dašić i N.Stupar (2012): Povećanje efikasnosti upravljanja akumulacijama u periodima odbrane od poplava – na primeru Hidroenergetskog sistema na Trebišnjici, Vodoprivreda, N^o 255-257, s.43-58
- [6] Đorđević, B., N. Sudar, U.Hrkalović i B.Knežević (2013): Strategija upravljanja vodama Republike Srpske, Vodoprivreda, 261-263 (2013/1-3), s.3-20
- [7] Knežević, B i B. Đorđević. (2012): Metoda 'MABIS' kao podrška pri određivanju ekološki prihvatljivih protoka, Vodoprivreda, 255-257 (1-3/2012), Beograd, 2012. s. 25-42
- [8] Kovacs, A., Perrochet, P., Kiraly, L., Jeannin, P.Y. (2005), A quantitative method for the characterization of karst aquifers based on spring hydrograph analysis, Journal of Hydrology, Vol. 303, pp 152-164
- [9] Makropoulos, C., D. Koutsoyiannis, M. Stanić, S. Djordjević, D. Prodanović, T. Dašić, S. Prohaska, Č. Maksimović and H. Wheeler (2008), A multi-model approach to the simulation of large scale karst flows, Journal of Hydrology, Vol. 348, pp 412-424
- [10] Milanović, P. (2006): Karst istočne Hercegovine i dubrovačkog priobalja, Izdavač ASOS, Beograd
- [11] Milanović, P. (2010): Study on Hydrogeology of Nature Park Hutovo Blato. WWF European Policy Programme
- [12] Milanović, P. i saradnici (2012): Uticaj delimičnog prevođenja voda iz slivova Bune u Bregave u sliv Trebišnjice, Vodoprivreda, N^o 255-257, s.3-24
- [13] Milanović, S. i Lj.Vasić (2011): Hidrološka osnova zaštite podzemnih voda u karstu na primeru Beljanice, Vodoprivreda, 252-254, str. 165-174
- [14] Stanić, M. i Dašić, T. (2005): Modeliranje vodnih režima u karstu, Vodoprivreda, 213-215, (1-3/2005), str. 83-93
- [15] Touloumdjian, C. (2005): The Springs of Montenegro and Dinaric Karst. Proceedings of the International Conference "Water Resources and Environmental Problems in Karst – Cvijić 2005". National Committee IAH of Serbia and Montenegro, Belgrade
- [16] Studija: Aktualizacija uticaja prevođenja voda Gornjih horizonata na režim površinskih i podzemnih voda (2009), Konzorcijum: Energoprojekt - Hidroinženjering, Beograd i Zavod za vodoprivredu, Bijeljina
- [17] Strategija integralog upravljanja vodama Republike Srpske (2015-2024.), Zavod za vodoprivredu, Bijeljina
- [18] Zavod za vodoprivredu Bijeljina (2015): Proračun bilansa voda Dabarskog polja korišćenjem podataka o nivoima površinskih i podzemnih voda, MH Elektroprivreda Republike Srpske – ZP Hidroelektrane na Trebišnjici, Trebinje

DISTRIBUTED HYDROLOGIC MODEL FOR RUNOFF SIMULATION IN KARST BASIN

by

Nenad JAĆIMOVIĆ¹⁾, Tina DAŠIĆ¹⁾, Miloš STANIĆ¹⁾,
Branislav ĐORĐEVIĆ, Petar MILANOVIĆ, Nedeljko SUDAR²⁾, Slaviša SAVIĆ³⁾
¹⁾University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering,
²⁾Institute for Water Management, Bijeljina, ³⁾Public Institution “Vode Srpske”

Summary

The hydrological mathematical models for modeling the genesis of runoff in the basin become considerably more complex in terms of the highly karstified basins, in which the dominant component of sinking and flow through underground karst hydrography. The paper presents application of physically based, distributed hydrologic model for simulation of runoff at karst terrains. The 3Dnet-HET model is developed for simulation of river Trebisnjica catchment, however, in this study it is applied for simulation of time series at the Dabarsko polje catchment, as well as river Bregava catchment. Developed model is completely based on physical relations, which describe transformation of rainfall into surface and groundwater runoff. Functionally, it is divided into two modules. The first one computes the vertical water balance with

precipitation and meteorological parameters as the model input, while the second part simulates the “horizontal” water balance as the water circulation through the karst environment. The model has proven very successful and applicable to the analysis of the genesis of the flow in terms of karst, because analaize with periods on the monitoring showed very good agreement recorded and modeled hydrological series. The model is suitable for solving the tasks of planning, and is particularly valuable in terms of the exploitation of the system, provided that they ensure good and very operational support measurement and information system (delivery of data on rainfall, etc.).

Keywords: hydrological mathematical models, karst, precipitation, runoff, Dabar field (Eastern Herzegovina)

Redigovano 17.11.2015.