

Poređenje različitih pristupa za sagledavanje uticaja klimatskih promena na vodne resurse u slivu reke Crnice

Vesna Tripković¹
Aleksandra Ilić²
Stevan Prohaska³
Borislava Blagojević⁴

APSTRAKT: U ovom radu je prikazana uporedna analiza projektovanog uticaja klimatskih promena na vodne resurse sliva reke Crnice (289 km²) primenom dva tipa modela. SHETRAN kao fizičko baziran distributivni model ovde je korišćen za simulaciju protoka. Potrebne podloge za formiranje modela su: elevacija, klimatski podaci (padavine i potencijalna evapotranspiracija), tipovi zemljišta i vegetacioni pokrivač. Model VNC je razvijen u Institutu za vodoprivredu „Jaroslav Černi” iz Beograda. Zasniva se na određivanju zavisnosti između standardizovanih promenljivih koristeći različite kombinacije uzročno-posledičnih veza između hidroloških i meteoroloških vremenskih serija. Osnovu za određivanje ovog tipa zavisnosti predstavlja teorija višestruke nelinearne korelacije. Ovi modeli su korišćeni sa scenarijima projektovanih klimatskih promena u proceni za koliko će se protok verovatno promeniti u budućnosti. Scenario A1B je odabran kao umeren i A2 kao jačeg intenziteta. Analiza je sprovedena za dva buduća perioda 2013-2050 i 2051-2100 u poređenju sa referentnim periodom 1961-2012.

Ključne reči: standardna nelinearna korelacija, protok, klimatski model, vodni resursi, klimatske promene

Different approaches to assess the impacts of climate change on water resources in the Crnica river catchment

ABSTRACT: This paper presents a comparative analysis of the projected climate change impacts on water resource in the Crnica river catchment (289 km²) using two types of models. SHETRAN as a fully distributed, physically based model is used here to simulate water flow. The spatial data required by SHETRAN includes a Digital Elevation Model (DEM), land use map and soil map. The meteorological variables include rainfall and potential evapotranspiration data. Model VNC was developed at the Institute for Water Resources "Jaroslav Černi" in Belgrade. It is based on the determination between standardized variables using different combinations of cause-effect relationship between hydrological and meteorological time series. The basis for the determination of this type of dependence is the theory of the multiple nonlinear correlation. These models were used with projected climate change scenarios to assess how discharge is likely to change in the future. The emission scenarios medium A1B and high A2 were selected. The analysis was conducted for two future periods 2013-2050 and 2051-2100 compared with the reference period 1961-2012.

Keywords: standard nonlinear correlation, discharge, climate model, water resources, climate change

¹ Dr Vesna Tripković, dipl. inž. geol., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Jaroslava Černog 80, 11226 Beograd, vesna.tripkovic@jcerni.co.rs

² Ass. Aleksandra Ilić, dipl. inž. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, aleksandra.ilic@gaf.ni.ac.rs

³ Prof. dr Stevan Prohaska, dipl. inž. građ., Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Jaroslava Černog 80, 11226 Beograd, stevan.prohaska@jcerni.co.rs

⁴ Doc. dr Borislava Blagojević, dipl. inž. građ., Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerziteta u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, b.blagojevic@eunet.rs

1 Uvod

Prvi nacionalni izveštaj o klimatskim promenama, ukazao je da će prema scenarijima buduće klime, 21. vek biti okarakterisan značajnim smanjenjem godišnjih suma padavina. Takođe, u izveštaju se napominje da promena klime može dovesti do intenzivnih pojava ekstremnih događaja, kao što su poplave i suše u pogledu obima, učestalosti i intenziteta. Preliminarne procene uticaja klimatskih promena na vodne resurse Republike Srbije pokazuju da se u predstojećem periodu (do 2100. godine) može u dogoročnom trendu očekivati smanjenje protoka voda na nacionalnom nivou.

Prognozirane promene u količinama padavina i temperaturi vazduha imaće negativan uticaj na sadašnji sistem upravljanja vodnim resursima. Za rečne tokove postoje dostupne informacije o vodostajima koje se koriste za određivanje ukupne raspoloživosti vode, dok su podaci o vodnim resursima veoma ograničeni.

Cilj istraživanja ovog rada je uvid u potencijalne uticaje i mogućnost stvaranja smernica za efikasnije korišćenje vodnih resursa (površinskih i podzemnih voda) u okolnostima koje donose klimatske promene. Takođe, cilj je da se stvori strategija održivog razvoja u vezi sa aktuelnim poplavama i bujicama, kao rezultat klimatskih promena u Srbiji.

Primenom programskog paketa SHETRAN i njegovim povezivanjem sa GIS-om formiran je fizičko baziran distributivni model, pomoću koga je prikazan protok reke Crnice. Ovaj model je korišćen za poređenje potencijalne količine protoka sa rezultatima dobijenih sa VNC modelom.

Procena buduće klime prikazana je po rezultatima klimatskog modeliranja po najčešće korišćenim scenarijima Međunarodnog panela za klimatske promene, IPCC [1]). Scenariji klimatskih promena na osnovu dve emisije scenarija (A1B i A2) klimatskog modela su korišćeni za generisanje hidroloških scenarija za sliv reke Crnice za dva vremenska perioda (2013-2051 i 2051-2100).

2 Prikaz modela

2.1 SHETRAN model

SHETRAN model je razvijen u laboratoriji WRSRL (Water Resources Systems Research Laboratory) Univerziteta u Njukaslju u Velikoj Britaniji i vodi poreklo od Système Hydrologique Européen (SHE) [2, 3]. To je fizičko baziran, prostorno distributivan model koji je primenljiv za simulaciju kretanja vode, sedimenata i transporta nanosa u slivnom području [4, 5]. SHETRAN se može primeniti na širok spektar rečnih basena razmera od velikih (2500 km^2) sa višestrukim podslivovima do pojedinačnih ili parcijanih susednih rečnih basena, pojedinačnim izdvojenim jedinicama kao brda i područja slivova (0.94 km^2) [6].

Kretanje vode i infiltracija kroz nezasićenu sredinu se modeliraju primenom jednačine Richard čime su regulisani zemljišno-hidraulički parametri (matrični potencijal i hidraulička propustljivost zemljišta koji se izračunavaju korišćenjem jednačine Brooks i Corey [7]). Ova zona predstavlja sastavni deo podpovršinskog toka gde su podpovršinski tok i transport direktno povezani sa površinskim tokom i transportom.

Aplikaciju programskog paketa SHETRAN da simulira protok za slivna područja različite razmere u Velikoj Britaniji i uticaj klimatskih promena na vodne resurse unutar

slivnog područja je prikazan u radu Tripković [8]. Ovaj model je izabran za razvoj modela reke Crnice zbog svoje dostupnosti i iskustva. Detaljniji opis jednačina i prirode programskog paketa SHETRAN sa svim svojim prednostima i slabostima, potrebnim podacima i njenim širokim spektrom aplikacija, dostupna je na drugim mestima u literaturi [9, 10] i ovde se neće ponavljati.

2.2 VNC model

Osnovu modela VNC čine linearne korelacione zavisnosti između standardizovanih promenljivih hidroloških i meteoroloških vremenskih serija koje su u uzročno-posledičnim vezama [11].

Model se bazira na teoriji nelinearne standardizovane korelacije i prostorne korelacione analize. Prva ideja je bila napraviti alat pomoću kojeg će biti moguća prostorna interpolacija podataka na mestima gde ne postoje merenja ali je, kasnije, prilagođen za potrebe popunjavanja prekida i produžavanja serija hidroloških i meteoroloških podataka na mernim stanicama.

Kao zavisno promenljiva, obično se uzima protok na hidrološki neizučenom profilu (prostorna interpolacija) ili na profilu mernog mesta gde postoje prekidi u merenjima. Kao nezavisno promenljive veličine uzimaju se poznate vrednosti vremenskih serija: protoka na hidrološkim stanicama u širem regionu i/ili različite klimatske veličine, kao što su padavine, srednje temperature vazduha, vlažnost vazduha, napon vodene pare i dr.

Saglasno polaznoj postavci uspostavlja se linearna zavisnost između standardizovanih promenljivih, zavisno i nezavisno promenljivih (1):

$$U_{j0} = \alpha_{01} \cdot U_{j1} + \alpha_{02} \cdot U_{j2} + \dots + \alpha_{0i} \cdot U_{ji} + \dots + \alpha_{0L} \cdot U_{jL} \quad (1)$$

Koeficijenti α_{0i} se određuju po relaciji (2):

$$\alpha_{0i} = \frac{D_{0i}}{D_{00}} \quad (2)$$

gde je D_{00} determinanta standardizovanih koeficijenata korelacije r_{ji} (3), dok je D_{0i} minor koji se dobija zamenom j -te kolone koeficijentima r_{0i} .

$$D_{00} = \begin{vmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1L} \\ r_{21} & 1 & r_{23} & \dots & r_{2L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{L1} & r_{L2} & r_{L3} & \dots & 1 \end{vmatrix} \quad (3)$$

Koeficijenti korelacije r_{0i} (4) između podataka za stanicu $i = 0$ i ostalih stanica $i = 1, 2, 3, \dots, L$ se određuju na osnovu nizova podataka za sinhroni period merenja dužine M .

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$r_{0i} = \frac{\frac{1}{M-1} \cdot \sum_{j=1}^M U_{j0} \cdot U_{ji}}{\sigma^2(M)} \quad (4)$$

gde je:

$$\sigma^2(M) = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{j=1}^M U_{ji}^2 \cong 1.0 \quad (5)$$

Koeficijenti korelacije između i -te i k -te stanice za koje postoji niz sinhronih merenja dužine N , određuju se prema jednačini (6):

$$r_{ik} = \frac{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N U_{ji} \cdot U_{jk}}{\sigma^2(N)} \quad (6)$$

Gde je:

$$\sigma^2(N) = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{j=1}^N U_{ji}^2 \cong 1.0 \quad (7)$$

Da bi se odredio konačan broj članova jednačine linearne regresije neophodno je odrediti težinske koeficijente δ_{oi} (8) svih stanica (parametara) i uporediti ih za zadatim kriterijumom.

$$\delta_{oi} = \frac{|r_{oi} \cdot \alpha_{oi}|}{R_o^2} \quad (8)$$

gde je R_o empirijski koeficijent višestruke korelacije (9):

$$R_o^2 = \sum_{i=1}^L |r_{oi} \cdot \alpha_{oi}| \quad (9)$$

Prvi kriterijum koji mora biti ispunjen je (10):

$$\sum_{i=1}^L \delta_{oi} = 1 \quad (10)$$

Drugi kriterijum (11) određuje da li iz jednačine nelinearne regresije između standardizovanih promenljivih treba eliminisati ili zadržati član:

$$\delta_{oi} \begin{cases} > 2 \cdot \frac{\sigma_{R_0}^2}{R_0^2}, & \sigma_{R_0}^2 = \frac{1-R_0^2}{\sqrt{N-1}}, & \text{zadržati} \\ \leq 2 \cdot \frac{\sigma_{R_0}^2}{R_0^2}, & \sigma_{R_0}^2 = \frac{1-R_0^2}{\sqrt{N-1}}, & \text{eliminirati} \end{cases} \quad (11)$$

Uspostavlja se analitička zavisnost između merenih vrednosti osnovne veličine i njenih standardizovanih promenljivih, X_{j0} i U_{j0} na osnovu podataka za period dužine M .

Uspostavljena analitička zavisnost se primenjuje za određivanje nedostajućih (projektovanih) vrednosti X_{ji} ($j = M + 1, M + 2, \dots, N$) na osnovu poznatih vrednosti standardizovanih promenljivih U_{j0} dobijenih iz linearne veze. Ova zavisnost je primenjena ne bi li se odredili projektovani protoci u uslovima promenjene klime [12].

Prvo je potrebno, koristeći jednačinu (1) formirati zavisnost (12) a potom koristeći uspostavljenu zavisnost analogno proceduri produžavanja nizova formirati vremensku seriju u uslovima promenjene klime poštujući kriterijume (10) i (11).

$$U(Q_o) = \alpha_{o1} \cdot U_1(P) + \alpha_{o2} \cdot U_2(T) + \alpha_{o3} \cdot U_3(E) \quad (12)$$

gde je:

Q_0 - srednjemesečni protok na hidrološkoj stanici čije se slivno područje razmatra,

P - srednjemesečna suma padavina na slivu,

T - srednjemesečne temperature vazduha na slivu,

E - srednjemesečna potencijalna evapotranspiracija na slivu.

3 Karakteristike istražnog područja

Za prikaz uticaja klimatskih promena na vodne resurse razmatran je sliv reke Crnice (289 km²) (slika 1). Reka Crnica je duga nepunih trideset kilometara i uliva se u Veliku Moravu kod Paraćina. Izvire u prostranoj udolini kod rudarskog naselja Sisevac i istočno od Sisevca nastavlja se u Daršljivicu koja se uvlači u Kučaj još za 3,2 km, te je ukupna dužina Crnice sa Daršljivicom 31,8 km. Sliv pomenute reke prostire se između Gornjovelikomoravske kotline na zapadu i Kučaja i Samanjca na istoku. Teče od SI ka JZ inverzno prema Velikoj Moravi i smeštena je uz SZ granicu sliva. Najveća pritoka Crnice je Grza.

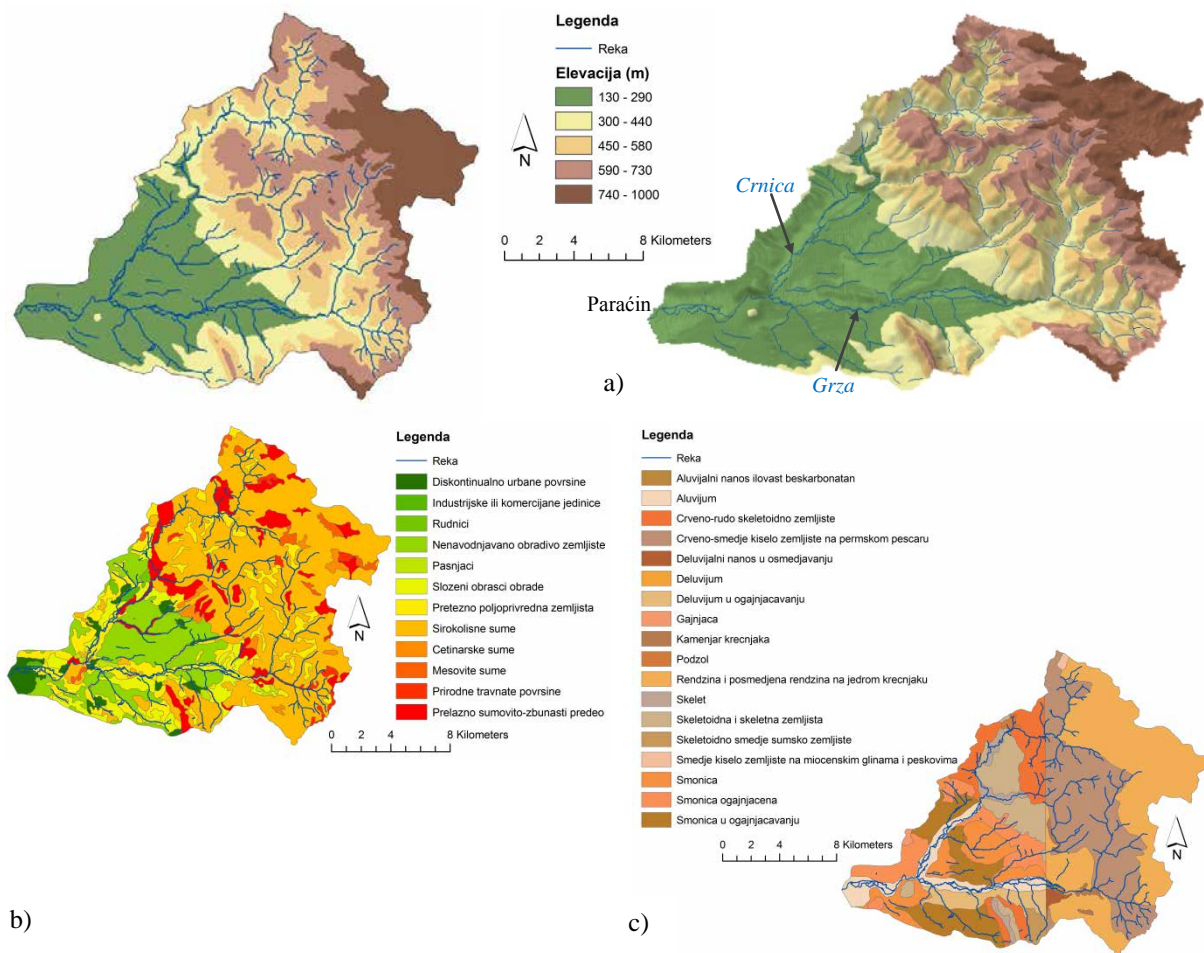
U slivu ima stena različitog postanka i starosti. Najzastupljenije su sedimentne stene, ali postoji i prisustvo metamorfni i magmatskih stena. Najzastupljeniji su krečnjaci koji zauzimaju površinu od oko 34 % sliva i pripadaju zagaćenom tipu karsta. Odlikuje ga veliki broj vrtača koji podseća na boginjavi karst. Reka Crnica izvire u snažnom mlazu ispod ogromne stene, na južnom delu Kučajskih planina. Na izvoru je reka potpuno bela od krečnjačkih stena, pa se zato nekad zvala Belica.

Na osnovu digitalizovane karte vegetacije (slika 1b) može se uočiti da su na slivu prisutne šume, nenavodnjavano obradivo zemljište, pretežno poljoprivredna zemljišta sa prirodnom vegetacijom i urbane površine. Dominatno je prisustvo šuma koje zauzimaju oko

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

50% površine sliva. Druge po zastupljenosti su pretežno poljoprivredna zemljišta sa većim površinama sa oko 13%.

Za definisanje zemljišnih karakteristika sliva korišćena je digitalizovana pedološka karta (slika 1c). Na slivnom području Crnice je dominantno smeđe šumsko zemljište na krečnjaku, rigolitično zemljište, smonica na različitim podlogama i aluvijalno zemljište.



Slika 1. Glavni prostorni podaci o karti slivnog područja reke Crnice: a) elevacija (digitalni model terena); b) aktuelna karta vegetacije i c) pedološka karta
 Figure 1. Main spatial data on the map of the Crnica catchment: a) elevation (digital elevation model); b) actual land use map and c) soil use map

Reka Crnica nikad ne presušuje, čak i u vreme najvećih suša. Za vreme velikih prolećnih kiša ima karakter prave bujičarske reke karakteristične za brdsku oblast Srbije. U donjem toku podužni padovi su relativno mali i rastu u pravcu izvorišnog dela sliva. Idući uzvodno, rastu i nagibi padina rečne doline. Strmi nagibi gornjeg dela sliva su pošumljeni, dok se na blažim nagibima u donjem delu sliva nalaze livade i oranice.

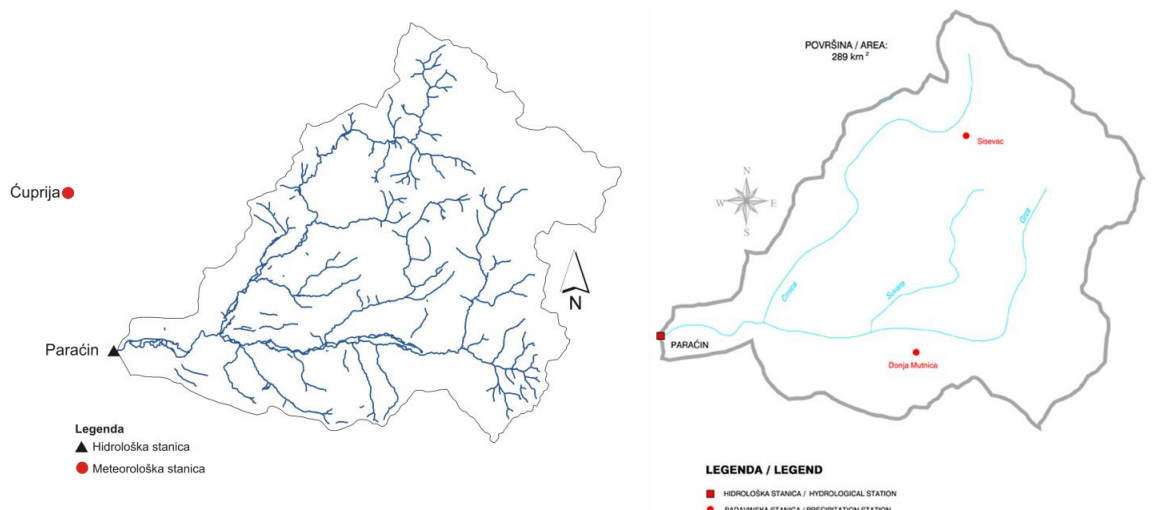
4 Podaci i metode

Ulazni podaci za SHETRAN model su: časovne sume padavina, dnevna potencijalna evapotranspiracija, elevacija terena, rečna mreža, tipovi zemljišta i vegetacione karakteristike slivnog područja. Za potrebe VNC modela ulazni podaci su: mesečne sume padavina, mesečna potencijalna evapotranspiracija i srednjemesečne temperature. Za potrebe kalibracije modela korišćen je osmotren protok sa hidrološke stanice Paraćin na reci Crnici. U tabeli 1 prikazani su statistički parametri vremenskih serija za padavine (P), evapotranspiraciju (E), temperaturu (T) i protok (Q).

Tabela 1. Statistički parametri vremenske serije za referentni period 1961-2012
 Table 1. Statistical parameters of time series for the reference period 1961-2012

Parametar	1961 – 2012			
	P (mm)	E (mm)	T (°C)	Q (m ³ /s)
Sre	656,45	876,93	10,99	3,38
σ	118,18	59,36	0,68	1,07
Cv	0,18	0,07	0,06	0,32
Cs	0,18	0,36	0,30	0,85
Min	432,60	772,77	9,78	1,56
Max	910,00	1034,14	12,38	6,89

Raspoložive dnevne/mesečne sume padavina sa meteorološke stanice Čuprija, mesečna potencijalna evapotranspiracija i osmotren protok sa hidrološke stanice Paraćin (slika 2) dobijeni su od Republičkog Hidrometeorološkog Zavoda Srbije (RHMZS). Na samom slivu nije bila raspoloživa nijedna meteorološka/padavinska stanica sa podacima.



Slika 2. Sliv Crnice sa hidrološkom i meteorološkom stanicom
 Figure 2. Crnica catchment with the hydrological and meteorological station

Elevacija terena za slivno područje Crnice kao digitalni model terena (rawdem) ćelije grida 45m x 45m dobijeni su od Instituta za vodoprivredu „Jaroslav Černi”. Digitalizovana karta vegetacije u sivu Crnice definisana je na osnovu analize baze podataka Corine Land Cover 2006. Za definisanje i digitalizaciju pedoloških karakteristika sliva korišćena je kao osnova Pedološka karta Republike Srbije razmere 1:50.000 (Institut za proučavanje zemljišta Beograd - Topčider, 1958. i 1970.).

Za SHETRAN model potrebni su časovni podaci padavina koji bi predstavljali dobru prostornu reprezentaciju unutar samog sliva. Na osnovu toga, za simulacioni period dnevne sume padavina koje su jedine bile dostupne sa meteorološke stanice Čuprija su (eng. disaggregated) razvrstani u časovni vremenski korak koristeći vezu između trajanja kiše i dnevne sume padavina. Mesečna potencijalna evapotranspiracija je izračunata na osnovu metode Penmana, a zatim (eng. disaggregated) razvrstana u dnevne vrednosti.

Primenom GIS alatki u okviru programskog paketa ArcView 9.3, izvršena je priprema i obrada ulaznih podataka o fizičkim karakteristikama sliva prikazanim na slici 1 (topografske, pedološke i vegetacione). Elementarna ćelija grida u modelu predstavlja površina veličine 405m x 405m. Slivno područje reke Crnice u modelu je prikazano matricom elemenata sastavljenom od 64 kolona i 53 redova.

Kalibrisani modeli su procesuirani sa vremenskim serijama dnevnih/mesečnih padavina, temperature vazduha, evapotranspiracije i vlažnosti kao rezultat klimatskog modela. Za ocenu klimatskih promena na vodne resurse koriste se rezultati simulacija klimatskih modela. Ovde su korišćeni rezultati povezanog regionalnog klimatskog modela za atmosferu i okean EBU-POM (Eta Belgrade University-Prinstone Ocean Model) [13, 14]. Svi klimatski modeli pa tako i EBU-POM zbog kompleksnosti klimatskog sistema nose određeni stepen aproksimacije različitih geofizičkih procesa zbog kojih modelski rezultati sadrže i određeni nivo greške/odstupanja u odnosu na osmotrene uslove.

Posmatrana su tri perioda pod različitim scenarijima koncentracija gasova staklene bašte i to: referentni period od 1961. do 2012. godine, period bliske budućnosti (od 2013. do 2050.godine) i budući period (od 2051. do 2100. godine) za A1B i A2 klimatske scenarije. Po predviđenim koncentracijama gasova staklene bašte, A1B scenario se može nazvati umerenim, a A2 scenarijom jačeg intenziteta [15]. Nakon toga izvršena je analiza režima voda slivnog područja Crnice, koja podrazumeva primenu statističkih metoda sa ciljem analize suficita i deficita voda iz projektovanih protoka, proizašlih iz analize režima voda.

5 Kalibracija modela

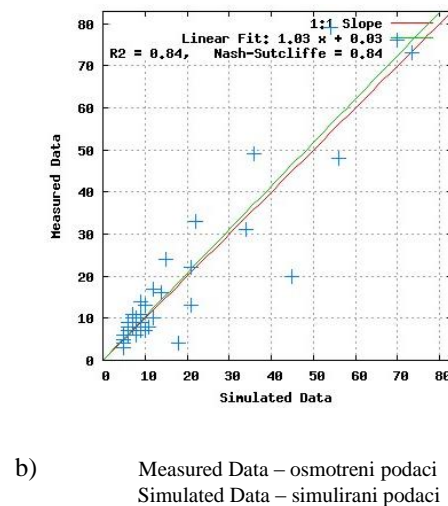
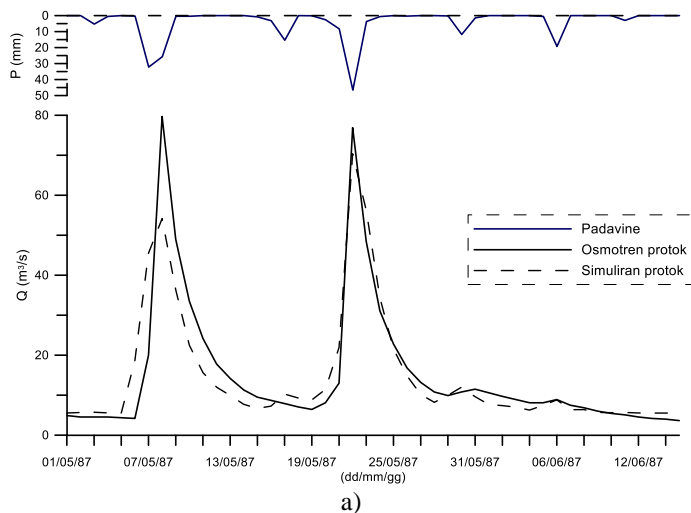
5.1 Kalibracija SHETRAN modela

SHETRAN model je najosetljiviji na ulazne parametre padavine i potencijalnu evapotranspiraciju [8]. Međutim, ovi vremenski ulazi se ne prilagođavaju tokom kalibracije. U slivnom području reke Crnice model je kalibrisan korišćenjem 5 parametara čija se vrednost određuje tako da odgovara realnim uslovima i da doprinese što boljem slaganju simuliranog i osmotrenog protoka sliva. Tabela 2 prikazuje ključne parametre modela koji se koriste u procesu kalibracije SHETRAN modela na koji se simulacije najosetljivije.

Tabela 2. Kalibrisani parametri
Table 2. Calibrated parameters

Parametar	Opis
K_x, K_y, K_z	hidraulička provodljivost (m/day)
θ_{sat}	poroznost
θ_{res}	rezidualna vlažnost zemljišta
n	van Genuchten n parametar
α	van Genuchten α parametar (cm^{-1})

Praksa u hidrološkom modeliranju je da raspoložive podatke vremenskih serija podelimo na dva seta [16]. Jedan set podataka se koristi za kalibraciju, a drugi za verifikaciju. Model zahteva određeni period vremena zagrevanja (eng. warm up) dok se ne dostigne reprezentativna vrednost. Model je kalibrisan za period 01.05. – 16.06.1987. koristeći osmotren protok sa hidrološke stanice Paraćin (slika 3). Kalibracija je obavljena ručno (eng. manual) podešavajući vrednosti parametara u cilju da se postigne bolja saglasnost između simuliranih i osmotrenih vrednosti.



Slika 3. Osmotren i simuliran srednje dnevni protok tokom majskog poplavnog talasa za slivno područje Crnice: a) kalibracioni period i b) regresiona analiza protoka (crvena linija: linija jednake vrednosti; zelena linija najbolje usklađena linija)

Figure 3. Observed and simulated daily mean discharge during flood in May in the Crnica catchment: a) calibration period and b) regression analysis of discharge (red line: line of equal value; green line: best-fit line)

Za ocenu efikasnosti modela korišćene su dve standardne statističke performanse: koeficijent determinacije (R^2) i koeficijent Nash-Sutcliffe (NSE) [17].

Koeficijent determinacije R^2 (eng. coefficient of determination) je proporcija varijacija između dve varijable protumačena linearnom regresijskom vezom (13).

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

$$R^2 = \frac{[\sum_{t=1}^T (Q_m^t - \overline{Q_m})(Q_0^t - \overline{Q_0})]^2}{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - \overline{Q_m})^2 \sum_{t=1}^T (Q_0^t - \overline{Q_0})^2} \quad (13)$$

gde je:

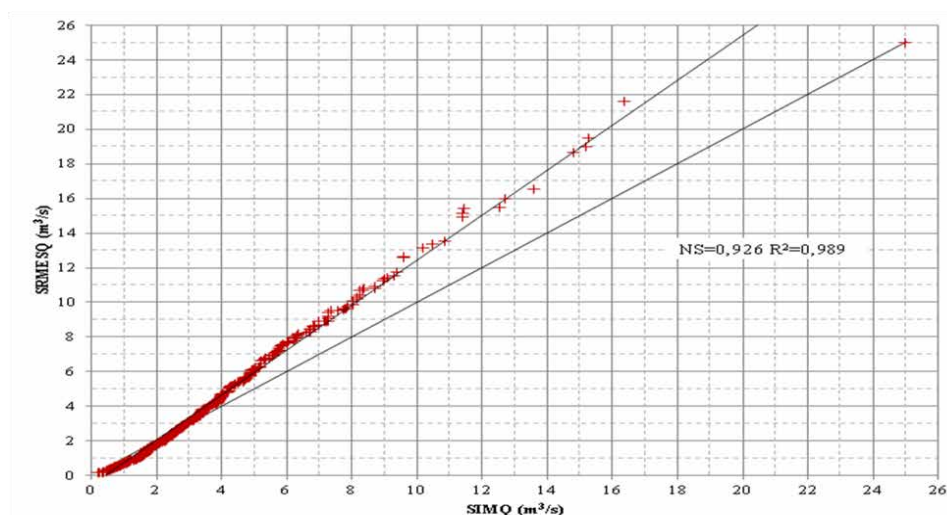
- Q_0 - osmotren protok,
- Q_m - simuliran protok,
- Q_0^t - osmotren protok za vreme t .

Koeficijent efikasnosti modela, Nash-Sutcliffe se često koristi da proceni efikasnost predviđanja hidroloških modela [17]. Daje se formulom (14):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \overline{Q_0})^2} \quad (14)$$

Vizuelna inspekcija simuliranog i osmotranog hidrograma protoka i korelativne zavisnosti ukazuje na zadovoljavajuće slaganje. Slika 3a pokazuje da je simuliran majski pik talasa malo ispod osmotrenog. Vrednost koeficijenta determinacije (R^2) za simulirani u odnosu na osmotren protok je 0,84 (slika 3b). Prema Henriksen i drugima [18] vrednost R^2 spada u opseg veoma dobrog modela. Nash-Sutcliffe koeficijent je 0,84 što ukazuje na dobre rezultate modela prema van Liev i Garbrecht [19] kriterijumima.

Verifikacija modela je obuhvatla različite periode poplavnih talasa za koji su postojali časovni podaci osmotrenog protoka. Pri kalibraciji i verifikaciji hidrološkog modela osnovni cilj je bio da maksimalne modelirane vrednosti pika talasa odgovaraju njihovim maksimalnim osmotrenim časovnim vrednostima, kao i da se prati oblik hidrograma u skladu sa prirodom hidroloških procesa na slivu.



Slika 4. Kalibracija modela VNC
Figure 4. VNC model calibration

5.2 Kalibracija VNC modela

Model je kalibrisan na osnovu izmerenih podataka u periodu 1961-2012. Za kalibraciju modela su korišćeni srednjemesečni protoci na hidrološkoj stanici Paraćin, mesečna suma padavina, srednjemesečne temperature i mesečna evapotranspiracija na meteorološkoj stanici Čuprija. Ocena kalibracije modela se može videti na slici 4. Kao što je prikazano statistička dobrotu prilagođavanja po Nash-Sutcliffe (NSE=0,926) pokazuje da model daje realnu sliku prirodnog srednjemesečnog protoka na slivu Crnice.

Oba modela su pokazala zadovoljavajuće performanse tokom kalibracije. Za ove modele, simulirani protok nije od interesa već komparativna analiza projektovanog protoka za različite klimatske scenarije.

6 Uticaj klimatskih promena na vodni režim reke Crnice

6.1 Rezultati i diskusija

Na osnovu zadovoljavajućih vrednosti ocene rezultata SHETRAN i VNC modela i u kalibracionom i u verifikacionom periodu, model sliva reke Crnice se mogao koristiti za analizu uticaja klimatskih promena na vodni režim. U tabelama 3 i 4 su prikazani statistički parametri za padavine (P), evapotranspiraciju (E) i temperaturu (T) dobijenih iz EBU-POM regionalnog klimatskog modela, koji su korišćeni kao ulazni parametri za pomenute modele.

Dobijeni podaci pokazuju da prema scenariju A1B promene srednje godišnjih padavina idu od +1,32% za period 2013-2050 do -10,91% za period 2051-2100, dok u slučaju A2 ova promena je od +7,83% do -6,54% (tabela 5). Može se očekivati prosečni porast evapotranspiracije u periodu bliske budućnosti da bude u proseku oko 8,62% sa dostizanjem vrednosti od 9,52% do kraja 21. veka u odnosu na referentni period. Tokom perioda 2013-2050 i 2051-2100 scenario A1B daje porast temperature za prvi period do 1,12°C a za drugi period do 3,13°C (tabela 5). Prema scenariju A2 porast tokom prvog perioda je neznatno niži i iznosi oko 0,81 °C, dok se u drugom periodu prema ovom scenariju može, takođe, očekivati porast do 3,31°C.

Tabela 3. Statistički parametri projektovanih serija za scenario A1B i A2, 2013-2050
 Table 3. Statistical parameters of the projected series for scenario A1B and A2, 2013- 2050

Parametar	2013-2050: A1B			2013-2050: A2		
	P (mm)	E (mm)	T (°C)	P (mm)	E (mm)	T (°C)
Sre	665,13	952,51	12,11	707,85	960,41	11,80
σ	149,90	93,17	0,73	184,50	91,00	0,71
Cv	0,23	0,10	0,06	0,26	0,10	0,06
Cs	0,289	-0,04	-0,15	0,87	0,36	0,18
Min	358,07	748,43	10,60	432,44	774,82	10,52
Max	1046,71	1157,55	13,43	1159,44	1190,66	13,53

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

Tabela 4. Statistički parametri projektovanih serija za scenario A1B i A2, 2051-2100
Table 4. Statistical parameters of the projected series for scenario A1B and A2, 2051-2100

Parametar	2051-2100: A1B			2051-2100: A2		
	P (mm)	E (mm)	T (°C)	P (mm)	E (mm)	T (°C)
Sre	584,85	878,88	14,12	613,53	878,73	14,30
σ	130,02	102,73	0,93	172,21	112,55	1,15
Cv	0,222	0,12	0,07	0,28	0,13	0,08
Cs	0,31	-0,41	-0,06	0,26	-0,103	-0,06
Min	368,04	595,97	12,14	311,74	632,65	12,04
Max	890,35	1056,87	16,10	1027,31	1140,66	16,44

Tabela 5. Projektovane promene padavina (P), evapotranspiracije (E) i temperature (T) dobijene klimatskim modelom
Table 5. Projected changes of precipitation (P), evapotranspiration (E) and temperature (T) by climate model

Period Scenario	1961-2012	2013-2050				2051-2100			
		A1B		A2		A1B		A2	
P (mm)	656,45	Projek.	%	Projek.	%	Projek.	%	Projek.	%
EBU-POM	-	665,13	+1,32	707,85	+7,83	584,85	-10,91	613,53	-6,54
E (mm)	876,93	Projek.	%	Projek.	%	Projek.	%	Projek.	%
EBU-POM	-	952,51	+8,62	960,41	+9,52	878,88	+0,22	878,73	+0,21
T (°C)	10,99	Projek.	$\Delta^{\circ}\text{C}$	Projek.	$\Delta^{\circ}\text{C}$	Projek.	$\Delta^{\circ}\text{C}$	Projek.	$\Delta^{\circ}\text{C}$
EBU-POM	-	12,11	+1,12	11,80	+0,81	14,12	+3,13	14,30	+3,31

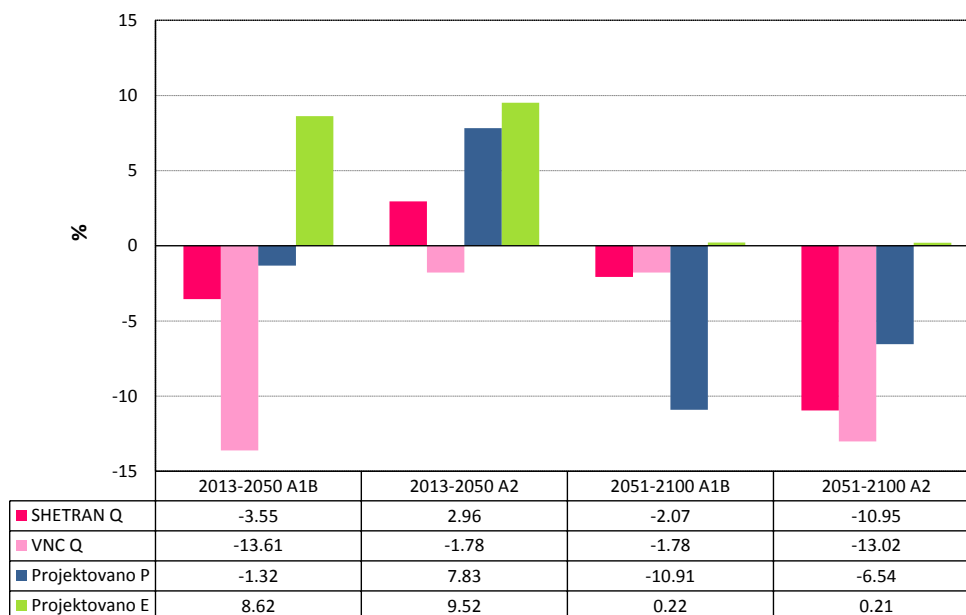
Upoređivanjem rezultata scenarija sa rezultatima drugih klimatskih modela za Srbiju (EU ENSEMBLES) može se videti da i drugi klimatski modeli pokazuju sličnu tendenciju odnosno suficit početkom i značajni deficit u godišnjim količinama padavina u drugoj polovini veka.

U tabeli 6 i slici 5 dat je primer procentualne promene srednje godišnjeg protoka za periode 2013-2050 i 2051-2100 po oba klimatska scenarija u odnosu na period 1961-2012, za slivno područje reke Crnice. Na osnovu oba klimatska scenarija, do kraja 21. veka može se očekivati smanjenje prosečne godišnje vrednosti protoka za 10 do 13% u odnosu na period od 1961. do 2012. godine.

Tabela 6. Projektovane promene protoka (Q) dobijene SHETRAN i VNC modelom
Table 6. Projected changes of discharge (Q) by SHETRAN and VNC model

Period Scenario	1961-2012	2013-2050				2051-2100			
		A1B		A2		A1B		A2	
Q (m ³ /s)	3,38	Projek.	%	Projek.	%	Projek.	%	Projek.	%
SHETRAN	-	3,26	-3,55	3,48	+2,96	3,31	-2,07	3,01	-10,95
VNC	-	2,92	-13,61	3,32	-1,78	3,32	-1,78	2,94	-13,02

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.



Slika 5. Očekivane promene protoka, padavina i evapotranspiracije za sliv Crnice u odnosu na vrednosti iz referentnog perioda (Q-protok, P-padavine, E-evapotranspiracija)

Figure 5. Expected changes in discharge, precipitation and evapotranspiration for the Crnica catchment compared to the values of the referent period (Q-discharge, P-precipitation, E-evapotranspiration)

Sa slike 5 se uočava da protok za A2 scenario do 2050. godine po SHETRAN modelu prati trend projektovanih padavina. Najveći deficit voda iz projektovanih protoka je očekivan za A2 scenario od 2051. do 2100. godine od 10,95% po SHETRAN i 13,02% po VNC modelu. Upoređivanjem ova dva modela, najveće odstupanje za Q imamo za period 2013-2050: A1B, a najbolje slaganje za period 2051-2100: A1B. Nepouzdanost modela može nastati iz nekoliko izvora: strukture modela, parametara, početnih uslova, osmotrenih podataka i procene modela.

Jedan od mogućih objašnjenja za relativno male promene protoka između scenarija i između scenarija i referentne vrednosti za protok je namena korišćenja zemljišnog pokrivača koji se neće radikalno menjati. Takođe, treba napomenuti da protok zavisi i od mnogih drugih faktora uključujući topografiju, klimu, hidrogeološka svojstva stenskih masa, pogotovo karsta koji je razvijen na ovom slivu, kao i hidrološko-hidrauličku povezanost površinskih i podzemnih voda.

Aplikacijom ova dva modela možemo zaključiti da u vezi primene ovih modela u istraživanju klimatskih scenarija za slivno područje reke Crnice, SHETRAN je poželjan jer je pokazano realnije performanse za sve scenarije. Ovaj model je izabran jer je već korišćen u drugim studijama uticaja klimatskih promena [6, 8, 20, 21]. Prednost VNC modela u odnosu na SHETRAN je da VNC ima kraće vreme proračuna što ga čini pogodnim za simulaciju dužeg vremenskog niza klimatskih scenarija.

Dostupnost vodnih resursa za period 2051-2100 za slivno područje reke Crnice je ugrožena prema projekcijama koje ukazuju na smanjenje protoka. Manji protok znači manje razblaživanje mogućih zagađivača u reci i u kombinaciji sa višom temperaturom, može

dovesti verovatno do smanjenja kvaliteta vode. To će uticati na životnu sredinu reke i korisnika vode. Porast temperature i smanjenje padavina u budućem periodu verovatno će usloviti nestašicu vode, a time dovesti do povećanja potražnje vode za navodnjavanje u poljoprivredi.

7 Zaključak

Uticaj klimatskih promena na vodni režim slivnog područja je od velikog značaja za strateško planiranje upravljanja vodnim resursima. Ovo istraživanje ukazuje da oba scenarija (A1B i A2) pokazuju porast godišnjih količina padavina tokom perioda 2013-2050. Međutim, za period posle 2050. godine oba scenarija imaju negativan trend u godišnjim količinama padavina koji se pojačavaju idući ka 2100. godini. Na osnovu analiza scenarija klimatskog modela promene klime za sliv reke Crnice može se očekivati po oba scenarija povećan trend temperature. Projektovane promene u temperaturnom polju i režimu padavina neminovno će uticati i na promenu vodnog režima na pomenutom slivu. Smanjenje količine padavina u odnosu na period 1961. do 2012. godine, uzrokuje značajno smanjenje prosečne godišnje vrednosti protoka do kraja 21. veka u odnosu na protok u referentnom periodu.

Zahvalnost

Istraživanje predstavljeno u ovom radu je sprovedeno za potrebe naučnog projekta TR 37005: „Ocena uticaja klimatskih promena na vodne resurse Srbije“ i III43007: „Istraživanje klimatskih promena i njihovog uticaja na životnu sredinu: Praćenje uticaja, adaptacija i ublažavanje“, koji je finansiralo Ministarstvo nauke, prosvete i tehnološkog razvoja Republike Srbije za period 2011-2015.

Literatura

1. IPCC, (2007), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment, Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Parry M.L, Canziani O.F., Palutikof J.P., van der Linden P.J. and. Hanson C.E, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp.
2. Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E., Rasmussen J., (1986a), *An introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeèn, SHE. 1: Hystory and physolophy of a physically-based, distributed modelling system*, Journal of hydrology, 87: 45-49.
3. Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A., O'Connell P.E., Rasmussen J., (1986b), *An introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeèn, SHE. 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system*, Journal of hydrology, 87: 61-67.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015.

Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia 2015.

4. Ewen J., Parkin G., O'Connell P.E., (2000), *SHETRAN: distributed river basin flow and transport modeling system*, Journal of Hydrologic Engineering, 5(3): 250-258.
5. Ewen J., Bathurst J.C., Parkin G., O'Connell P.E., Birkinshaw S.J., Adams R., Hiley R., Kilsby C.G., Burton A., (2002), *SHETRAN: Physically-based distributed river basin modelling system. In: Mathematical Models of Small Basin Hydrology and Applications*, Singh V.P. and Frevert D.K. (eds.), Water Resources Publications LLC: 43-68.
6. Bathurst J.C., Ewen J., Parkin G., O'Connell P.E., Cooper J.D., (2004), *Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts: 3. Blind validation for internal and outlet responses*, Journal of Hydrology, 287(1-4): 74-94.
7. Brooks R.H., Corey A.T., (1964), *Hydraulic properties of porous media*, Hydrology Papers 3, Colorado State University, Fort Collins.
8. Tripković V., (2013), *Quantifying and upscaling surface and subsurface runoff and nutrient flows under climate variability*, PhD thesis, School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, Newcastle upon Tyne, UK.
9. Ewen J., Parkin G., O'Connell P.E., (2000), *SHETRAN: distributed river basin flow and transport modeling system*, Journal of Hydrologic Engineering, 5(3): 250-258.
10. Birkinshaw S.J., James P., Ewen J., (2010), *Graphical User Interface for Rapid Set-up of SHETRAN Physically-Based River Catchment Model*, Environmental Modelling and Software, 25: 609-610.
11. Prohaska S., (2006), *Hidrologija II*, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za vodoprivredu "Jaroslav Černi, Republički hidrometeorološki zavod, Beograd.
12. Prohaska S., Djurđević, V., Ilić A., Vukelić, V., Koprivica, A., (2013) *Assessment of Climate Change Impact on Water Resources in Serbia*, 6th International Conference on Water Resources and Environment Research ICWRER 2013, 3-7 June, Koblenz, Germany, Conference Proceedings, pp. 502-514.
13. Djurdjevic V., Rajkovic B., (2008a), *Verification of a coupled atmosphere-ocean model using satellite observations over the Adriatic Sea*. Annals of Geophysics 26:1935-1954.
14. Djurdjevic V., Rajkovic B., (2008b), *Air-sea interaction, Fluid mechanics of environmental interfaces*, Editors: Gualtieri C. and Mihajlovic T.D., Taylor and Francis.
15. Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B, Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Jung T.Y., Kram T., La Rovere E.L., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Riahi K., Roehrl A., Rogner H.H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z., (2000), *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 599pp.
16. Klemes V., (1986), *Operational testing of hydrological simulation models*, Hydrol. Sci. J., 31(1): 13-24.
17. Nash J.E., Sutcliffe J.V., (1970), *River flow forecasting through conceptual models 1. A discussion of principles*, Journal of Hydrology, 10: 182-190.
18. Henriksen H., Troldborg L., Nyegaard P., Sonnenborg T., Refsgaard J., Madsen B., (2003), *Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark*, Journal of Hydrology, 280: 52-71.
19. Van Liew M.W., Garbrecht J., (2003), *Hydrologic simulation of the Little Washita river experimental basin using SWAT*, Journal of the American Water Resources Association, 39(2): 413-426.

17. Savetovanje SDHI i SDH - Vršac, Srbija 2015. Conference SDHI & SDH - Vršac, Serbia

20. Bathurst J.C., Kilsby C., White S., (1996), *Modelling the impacts of climate and land use change on basin hydrology and soil erosion. In: Mediterranean Europe. Mediterranean Desertification and Land Use*, Brandt C.J. and Thornes J.B. (eds.) Chichester, John Wiley and Sons Ltd. 355–387.
21. Mourato S., Moreira M., Corte-Real J., (2014), *Water availability in southern portugal for different climate change scenarios subjected to bias correction*, *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 8(1): 109-117.