

KONTINUIRANE WAVELET-TRANSFORMACIJE I NJIHOVA PRIMJENA NA SLIV KRČIĆA I IZVORA KRKE*

Damir JUKIĆ

Hrvatske vode, Vodnogospodarski odjel Split

REZIME

Wavelet-transformacije registriraju pojedine nestacionarne periodičke komponente u vremenskim serijama i lociraju razdoblje njihovog trajanja što predstavlja preduvjet za prepoznavanje i analizu uzroka njihovog pojavljivanja. Neke mogućnosti praktične primjene kontinuiranih wavelet-transformacija u hidrologiji krša su pokazane prvo na teoretskom primjeru linearnog rezervoara a zatim su analizirane na konkretnom primjeru sliva Krčića i izvora Krke. Ukupne srednje dnevne oborine i izračunate efektivne srednje dnevne oborine na slivu predstavljaju ulazni signal dok su srednja dnevna otjecanja iz izvorskih zona Krčića, Krke i Cetine izlazni signali. Rezultati pokazuju da se analizom načina transformacije pojedinih periodičkih komponenti iz ulaznog signala može doći do vrijednih informacija o procesima koji se odigravaju na slivu i u krškom podzemlju. Osim toga, komparativnim analizama rezultata dobivenih za pojedine vodonosnike mogu se potvrditi ili odbaciti pojedine hipoteze o načinu njihovog funkcioniranja i međusobnim odnosima.

Ključne riječi: hidrologija krša, kontinuirana wavelet-transformacija, analiza vremenskih serija, Krčić, Krka

1. OPĆENITO

Vremenske serije je moguće analizirati u vremenskoj ili frekvencijskoj domeni. Kod analiza u vremenskoj domeni težište se stavlja na međuzavisnost članova serije (korelacijska analiza), dok su kod analiza u frekvencijskoj domeni od primarnog značaja periodične promjene u vrijednostima članova serije (spektralna analiza i wavelet-transformacije). Korelacijska i spektralna analiza vremenskih serija oborina i otjecanja je tijekom protekla dva desetljeća

primjenjivana u hidrologiji krša u preliminarnim analizama za kvalitativni opis hidrogeoloških sustava te pri izboru metodologija za daljnja istraživanja [1, 21, 16, 13, 23 i 25]. Analize se temelje na pretpostavci da su vremenske serije oborina i otjecanja nastale realizacijom stohastičkih stacionarnih procesa [27]. Premda se ukupne oborine ponekad mogu smatrati približno stacionarnom vremenskom serijom, one ne predstavljaju stvarni ulaz u krški hidrogeološki sustav jer otjecanja generiraju efektivne oborine te je stoga pretpostavka o stacionarnosti praktično neodrživa. Uslijed nestacionarnosti i nedovoljne točnosti vremenskih serija u izračunatim statističkim funkcijama dobivaju se nepravilnosti i fluktuacije te na osnovu deformiranih funkcija najčešće nije moguće donijeti pouzdane zaključke o analiziranom sustavu.

Za razliku od spektralne analize, wavelet-transformacijama je moguće proučavati i nestacionarna obilježja vremenskih serija [5]. Širu primjenu u području geofizike, waveleti su pronašli devedesetih godina (npr. [11, 15, 20, 22, 24 i 29]), dok se početak njihove primjene u hidrologiji krša može vezati za radove [17, 18 i 19] koji su pokazali da se wavelet-transformacijama može fizikalno objasniti vremenska struktura odgovora krškog sliva na ulaznu oborinu, odnosno funkcioniranje krških kanala [28].

2. MATEMATIČKA OSNOVA KONTINUIRANIH WAVELET-TRANSFORMACIJA

Kontinuirana wavelet-transformacija se definira kao konvolucija između analizirane vremenske serije x_t , $t = 0, 1, 2, \dots, N-1$, i konjugirano kompleksnog oblika bazne funkcije – waveleta:

$$w_x(s, t) = \sum_{j=0}^{N-1} x_j \psi^* \left[\frac{(j-t)\delta t}{s} \right] \quad (1)$$

* Ovaj zanimljiv članak dr Damira Jukića preuzeli smo iz časopisa Vode Hrvatske. Zahvaljujemo autoru i redakciji tog cenjenog časopisa na odobrenju da članak štampamu u obliku u kome nam ga je poslao autor. Redakcija

gdje je s skala ili mjerilo waveleta a δt je vremenski korak. Primjenom konvolucijskog teorema praktični postupak određivanja wavelet-transformacije se može iz vremenske domene prebaciti u frekvencijsku domenu gdje je jednaka inverznoj Fourier-ovoj transformaciji [29]:

$$w_x(s, t) = \sum_{k=0}^{n-1} \hat{x}_k \hat{\psi}^*(s\omega_k) \exp(i\omega_k t \delta t) \quad (2)$$

gdje je $\hat{\psi}^*(s\omega_k)$ konjugirano kompleksna Fourier-ova transformacija bazne funkcije, \hat{x}_k je diskretna Fourier-ova transformacija analizirane vremenske serije:

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp(-\frac{2\pi i k t}{N}) \quad (3)$$

dok se kutna frekvencija računa prema:

$$\omega_k = \begin{cases} \frac{2\pi k}{N\delta t} & \text{za } k \leq \frac{N}{2} \\ -\frac{2\pi k}{N\delta t} & \text{za } k > \frac{N}{2} \end{cases} \quad (4)$$

U općem slučaju, wavelet-transformacija (2) je kompleksna funkcija s realnim i imaginarnim dijelom. Zbog toga se često koristi modul $W_x(s, t) = |w_x(s, t)|^2$ koji predstavlja spektar snage wavelet-transformacije. Kod analize vremenske distribucije pojedinih periodičkih komponenti interesantan je spektar snage realnog dijela wavelet-transformacije:

$$W_x^R(s, t) = \text{Re}(w_x(s, t))^2 \quad (5)$$

Analogno prethodnom, kros-spektar snage wavelet-transformacije između vremenskih serija x_t i y_t , $t = 0, 1, 2, \dots, N-1$, je:

$$W_{xy}(s, t) = w_x(s, t) \cdot w_y^*(s, t) \quad (6)$$

Postoji nekoliko vrsta baznih funkcija koje se mogu koristiti [29], među kojima je u hidrologiji najširu primjenu pronašla Morlet-ova bazna funkcija. Normalizirani oblik Fourier-ove transformacije Morlet-ove bazne funkcije je:

$$\hat{\psi}(s\omega_k) = \left(\frac{2\pi s}{\delta t}\right)^{1/2} \hat{\psi}_0(s\omega_k), \quad (7)$$

$$\hat{\psi}_0(s\omega) = \pi^{-1/4} H(\omega) \exp\left(-\frac{(s\omega - \omega_0)^2}{2}\right)$$

gdje $H(\omega) = 1$ za $\omega > 0$ i $H(\omega) = 0$ za $\omega \leq 0$. Ako se uzme da je frekvencija $\omega_0 = 6$, veza između mjerila waveleta s i Fourier-ovih perioda δt je:

$$\lambda = 1.03s \quad (8)$$

te se u tom slučaju vrijednost skale može približno poistovjetiti s periodom. Kod praktičnog proračuna vrijednosti wavelet-transformacija pomoću izraza (2), nakon odabira bazne funkcije, potrebno je odabrati niz vrijednosti skale s za koje će se vršiti proračun. Ako se ne koriste ortogonalne bazne funkcije, izbor vrijednosti je proizvoljan, međutim najzgodnije je odabrati niz s bazom eksponenta 2:

$$s_j = s_0 2^{j\delta j}, \quad j = 0, 1, \dots, J, \quad J = \frac{1}{\delta j} \log_2\left(\frac{N\delta t}{s_0}\right) \quad (9)$$

gdje je s_0 najmanja vrijednost skale koja se odabere tako da je ekvivalentna najmanjem Fourier-ovom periodu ($s_0 = 2\delta t$), dok vrijednosti δj određuje rezoluciju prikaza. Kod korištenja Morlet-ovih baznih funkcija obično se uzima da je $\delta j < 0.5$.

Wavelet-transformacija opisuje razdiobu varijance u vremenskoj i frekvencijskoj domeni te je njena ukupna energija jednaka varijanci analizirane vremenske serije:

$$\sigma_x^2 = \frac{\delta j \delta t}{C_\delta N} \sum_{j=0}^J \sum_{t=0}^N \frac{W_x(s_j, t)}{s_j} \quad (10)$$

gdje je C_δ konstanta proporcionalnosti čija vrijednost ovisi o odabranoj baznoj funkciji ($C_\delta = 0.776$ za Morlet-ovu baznu funkciju pri $\omega_0 = 6$). S ciljem utvrđivanja vremenske promjenjivosti pojedinih periodičkih komponenti, spektar snage wavelet-transformacije se može sumirati unutar nekog intervala skale od s_{j_1} do s_{j_2} :

$$\overline{W}_x(t) = \frac{\delta_j \delta t}{C_\delta} \sum_{j=j_1}^{j_2} \frac{W_x(s_j, t)}{s_j}, \quad t = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (11)$$

ili ako je zanimljiva preraspodjela varijance u domeni perioda tijekom nekog razdoblja od t_1 do t_2 , sumiranje se vrši u vremenskoj domeni:

$$\overline{W}_x(s_j) = \frac{1}{(t_2 - t_1 + 1)} \sum_{t=t_1}^{t_2} \frac{W_x(s_j, t)}{s_j} \quad (12)$$

Sumiranjem tijekom cijelog analiziranog razdoblja ($t_1 = 0$, $t_2 = N - 1$) dobije se tzv. globalni spektar waveleta.

3. TEORETSKI PRIMJER

Teoretski aspekti primjene wavelet-transformacija pokazat će se na primjeru linearnih rezervoara kod kojih je relacija između funkcije ulaza x i izlaza y definirana diferencijalnom jednačbom:

$$k \frac{dy}{dt} = y - x \quad (13)$$

gdje koeficijent linearnog rezervoara k ima značenje srednjeg vremena zadržavanja vode u rezervoaru. Analizirat će se dva linearna rezervoara s koeficijentima $k_1 = 20$ dana i $k_2 = 80$ dana.

Na slici 1.(e) nalazi se signal koji predstavlja ulaz u rezervoare. Ulazni signal je dobiven superpozicijom triju signala jednake amplitude i različitih perioda koje iznose redom: 11, 64, 341 i 682 dana (slike 1.a do d). Rezultirajući izlazni signali otjecanja iz prvog i drugog linearnog rezervoara su prikazani na slici 2.(a).

Na slici 3.(a) se nalazi spektar snage realnog dijela wavelet-transformacije superponiranog signala gdje je vidljiv način na koji ova funkcija identificira periodičke komponente unutar signala i njihovo trajanje; komponenta perioda 11 dana javlja se u prvoj polovici analiziranog razdoblja, komponenta perioda 64 dana javlja se u drugoj polovici razdoblja dok se periodičke komponente perioda 341 i 682 dana javljaju tijekom cijelog analiziranog razdoblja. Napominje se da je broj vrhova na svakoj periodičkoj komponenti dva puta veći od broja ciklusa pošto svakom ciklusu odgovaraju dva vrha jer spektar snage realnog dijela

wavelet-transformacije je kvadrat realnog dijela transformacije (5).

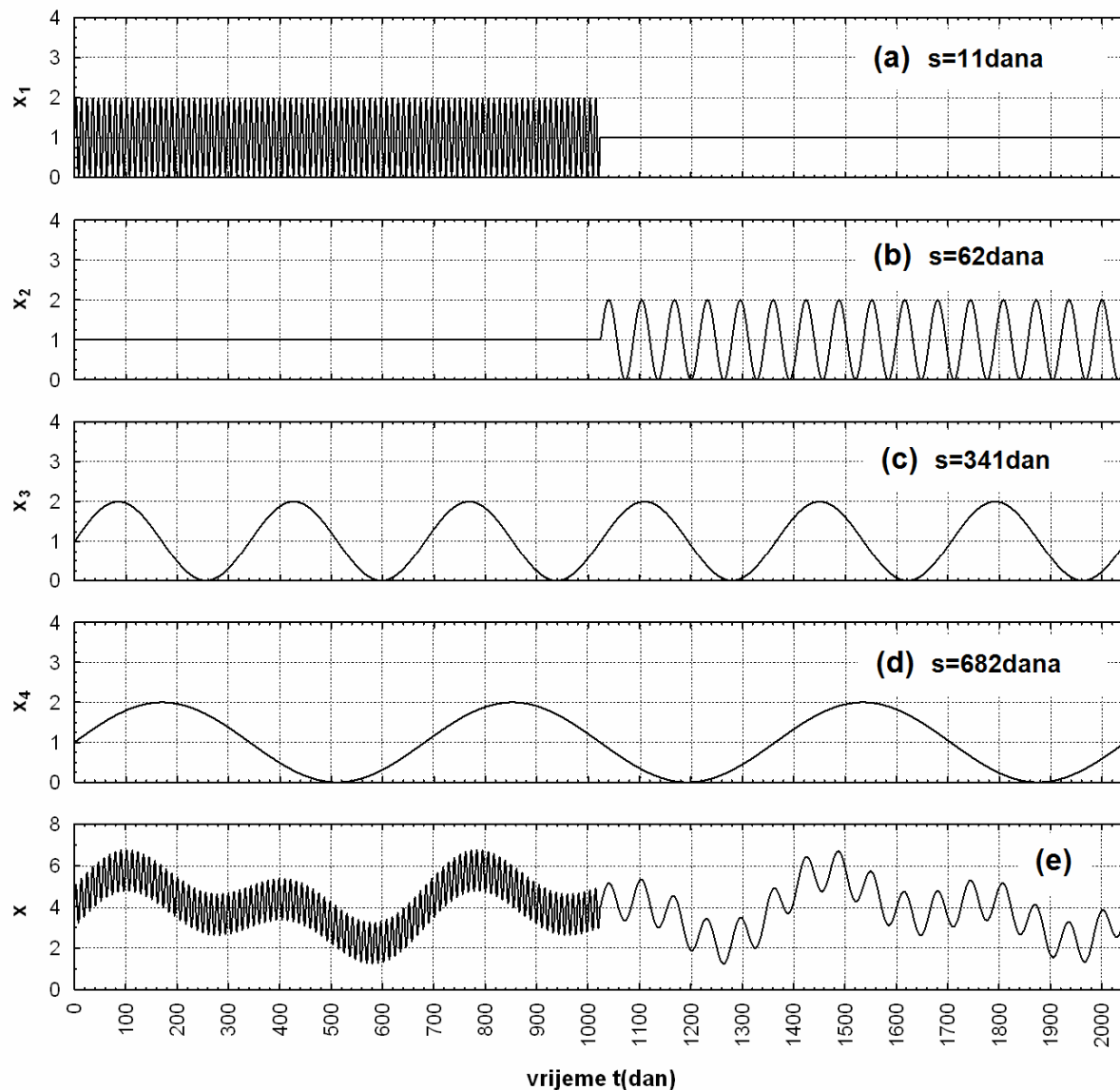
Na slikama 3.(b) i (c) nalaze se spektri snage realnih dijelova wavelet-transformacija izlaznih signala. Usporedbom spektara snage ulaznog i izlaznog signala može se zapaziti način na koji linearni rezervoari transformiraju ulazni signal. Periodička komponenta od 11 dana je kod prvog rezervoara gotovo u potpunosti prigušena, komponenta od 64 dana je također prigušena ali nešto manje izraženo dok su komponente od 341 i 682 dana pojačane. Kod drugog rezervoara komponenta od 11 dana nije vidljiva, komponenta od 64 dana je gotovo u potpunosti prigušena dok je komponenta od 682 dana najizraženija. Dakle, linearni rezervoari su preraspodijelili varijancu ulaznog signala iz područja niskih u područje visokih perioda gdje intenzitet preraspodjele ovisi o retencijskim sposobnostima rezervoara.

Na slici 4. uspoređeni su globalni spektri waveleta izlaznih signala iz prvog i drugog rezervoara s globalnim spektrom waveleta ulaznog signala. Četiri jasno izražena vrha na spektru ulaznog signala označavaju četiri periodičke komponente unutar signala. Kako komponente perioda od 11 i 64 dana imaju upola kraće trajanje, zapaža se da im je i energija također približno upola manja od energije komponenti perioda 341 i 682 dana. Na spektrima izlaznih signala je vidljivo da je prvi rezervoar preraspodijelio približno podjednaki dio varijance u području perioda od 341 i 682 dana dok je drugi rezervoar, koji ima znatno veću retencijsku sposobnost, najveći dio varijance dodijelio periodičkoj komponenti od 682 dana.

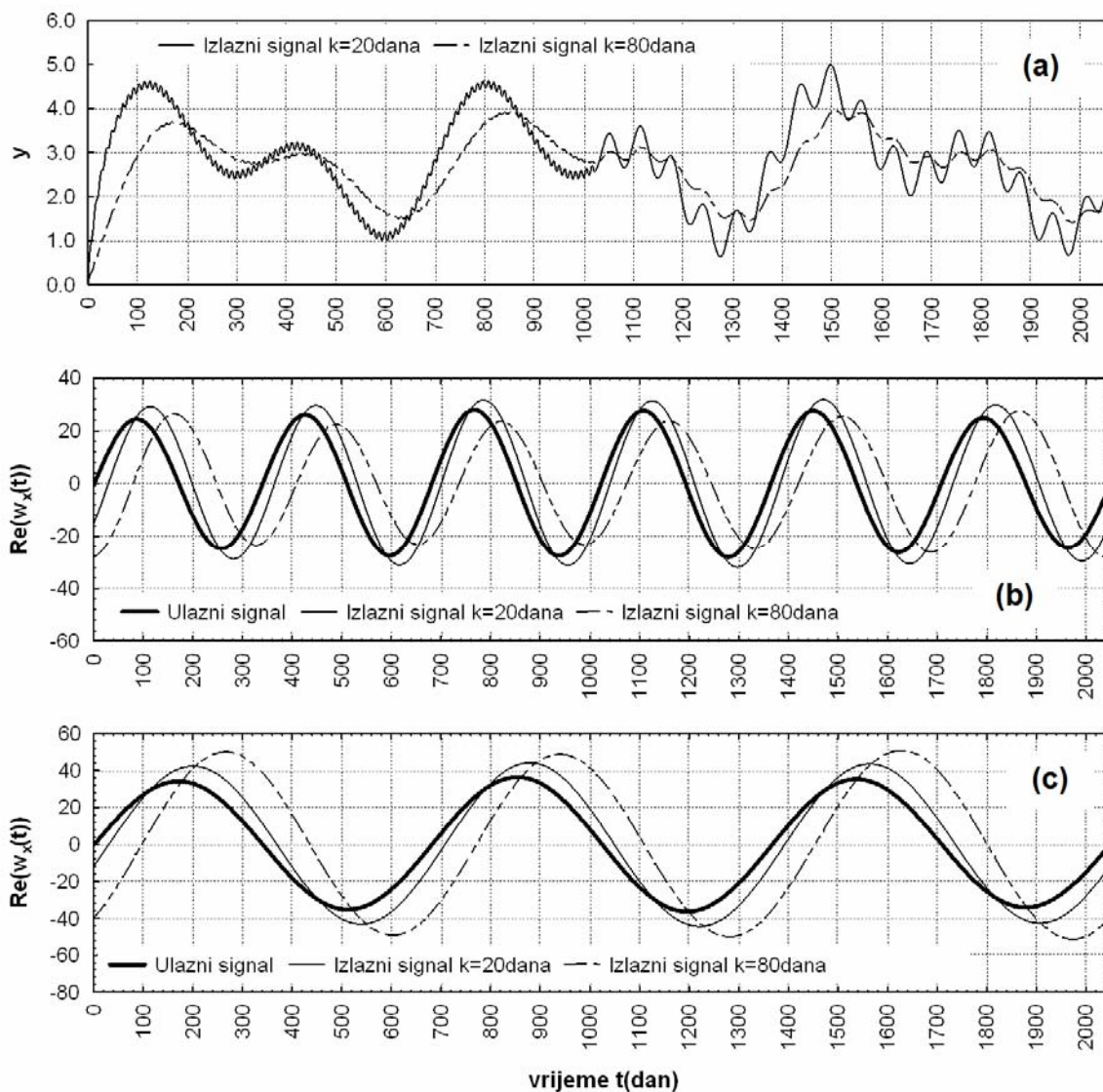
Na slikama 2.(b) i (c) su prikazani realni dijelovi wavelet-transformacija ulaznog signala i dvaju izlaznih signala za periode od 341 i 682 dana. Vremenski zaostatak izlaznih signala za ulaznim signalom određuje srednje vrijeme zadržavanja signala unutar rezervoara. Zaostatak izlaznog signala prvog rezervoara pri periodu od 341 dan iznosi 20 dana i identičan je teoretskom srednjem vremenu zadržavanja signala u rezervoaru. Zaostatak izlaznog signala drugog rezervoara pri istom periodu iznosi 58 dana, što je za 22 dana kraće od teoretske vrijednosti. Pri periodu od 682 dana, zaostatak izlaznog signala prvog rezervoara je 26 dana, dok zaostatak izlaznog signala drugog rezervoara iznosi 90 dana. Za razliku od perioda od 341 dan, gdje su oba zaostataka manja ili jednaka teoretskim vrijednostima, kod perioda od 682 dana zaostaci su veći od teoretskih vrijednosti. Može se zaključiti da su

kod otjecanja iz linearnog rezervoara komponente kraćih perioda formirane od dijela izlaznog signala koji se zadržava u rezervoaru kraće od prosječnog vremena zadržavanja, dok komponente dužih perioda formira dio izlaznog signala koji se zadržava u rezervoaru duže

od prosječnog vremena zadržavanja. Na identičan način se može pomoću wavelet-transformacije odrediti zaostatak izlaznog signala i na ostalim frekvencijama unutar bilo kojeg vremenskog intervala.



Slika 1. Ulazni signal u linearne rezervoare (e) dobiven superpozicijom signala (a), (b), (c) i (d).

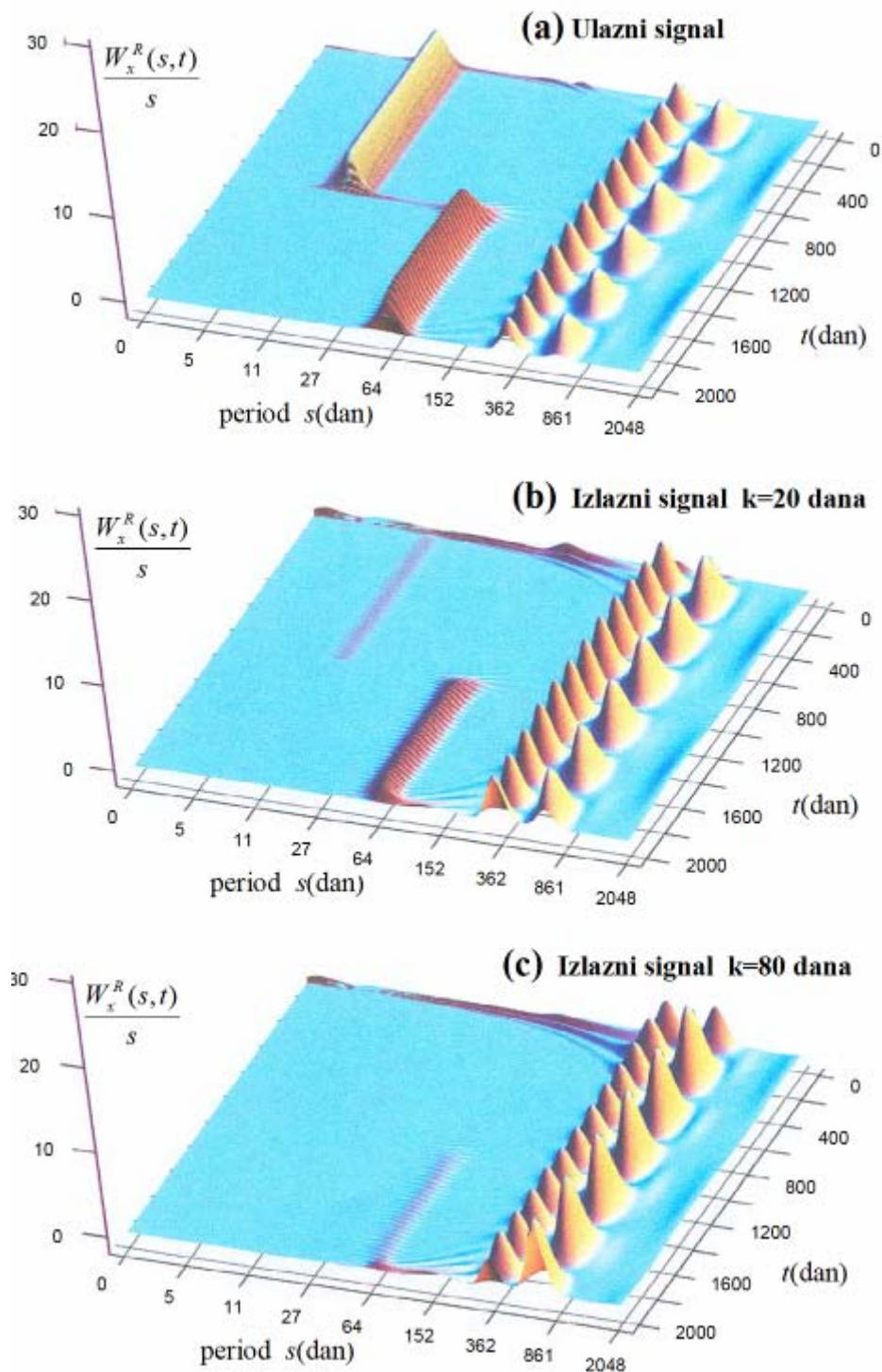


Slika 2. Izlazni signali iz prvog ($k=20$ dana) i drugog ($k=80$ dana) linearnog rezervoara (a) i realni dijelovi wavelet-transformacija ulaznog signala i izlaznih signala za periode od $s=341$ dan (b) i $s=682$ dana (c).

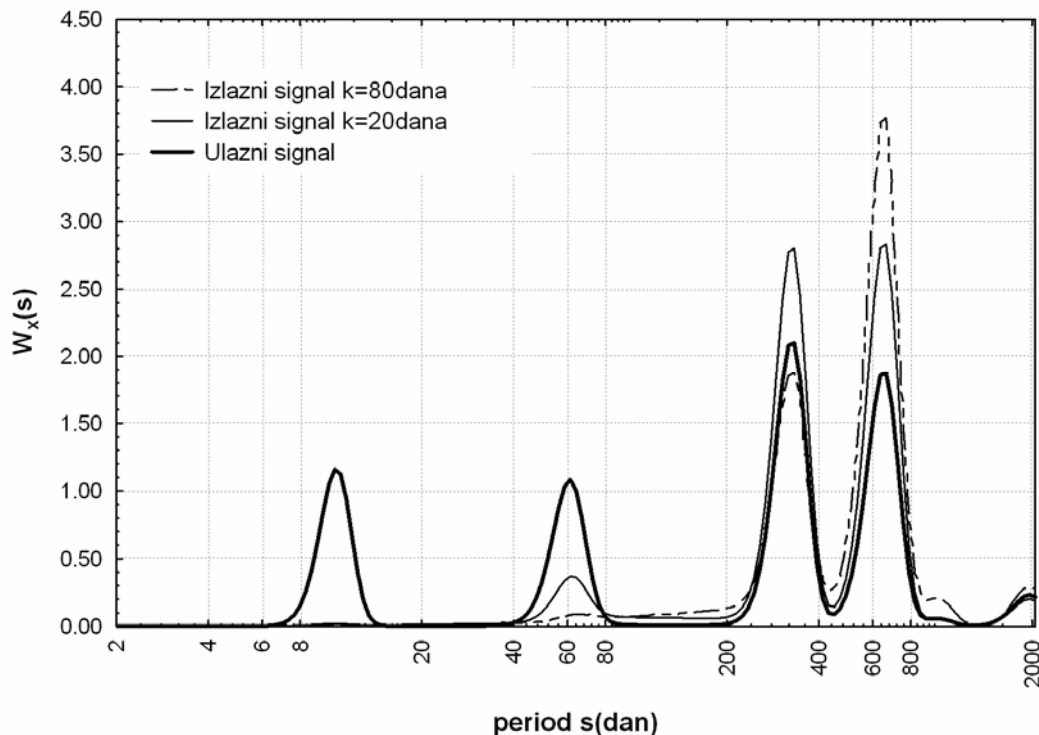
4. REZULTATI PRIMJENE NA SLIV KRČIĆA I IZVORA KRKE

Izvor rijeke Krčić nalazi se oko 12 km istočno od Knina na nadmorskoj visini od oko 370 m n.m. u podnožju planine Dinare (slika 5). Nakon desetak kilometara, Krčić završava svoj kratki vodeni tok ulaskom u Kninsko polje gdje se kod mjesta Topolje prelijeva preko dvadesetak metara visokog slapa. U špilji ispod slapa na nadmorskoj visini od cca 223-225 m n.m. smješten je Glavni izvor Krke. Izvorska zona

rijeke Krke sastoji se od tri dijela [2, 3]. Osim prethodno spomenutog Glavnog izvora, izvorsku zonu čine još Treći izvor smješten na lijevoj obali Krke 30 do 50 m nizvodno te Mali izvor koji se nalazi cca 100–150 m nizvodno od slapa, također na lijevoj obali Krke. Iako točnih mjerenja nema, procjenjuje se da 80-95% ukupnog otjecanja daje Glavni izvor, 10-15% daje Mali izvor dok je kapacitet Trećeg izvora približno dva do pet puta manji od kapaciteta Malog izvora [2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 30].



Slika 3. Spektar snage realnog dijela wavelet-transformacije ulaznog signala (a) i izlaznih signala iz prvog linearnog rezervoara (b) i drugog linearnog rezervoara (c).



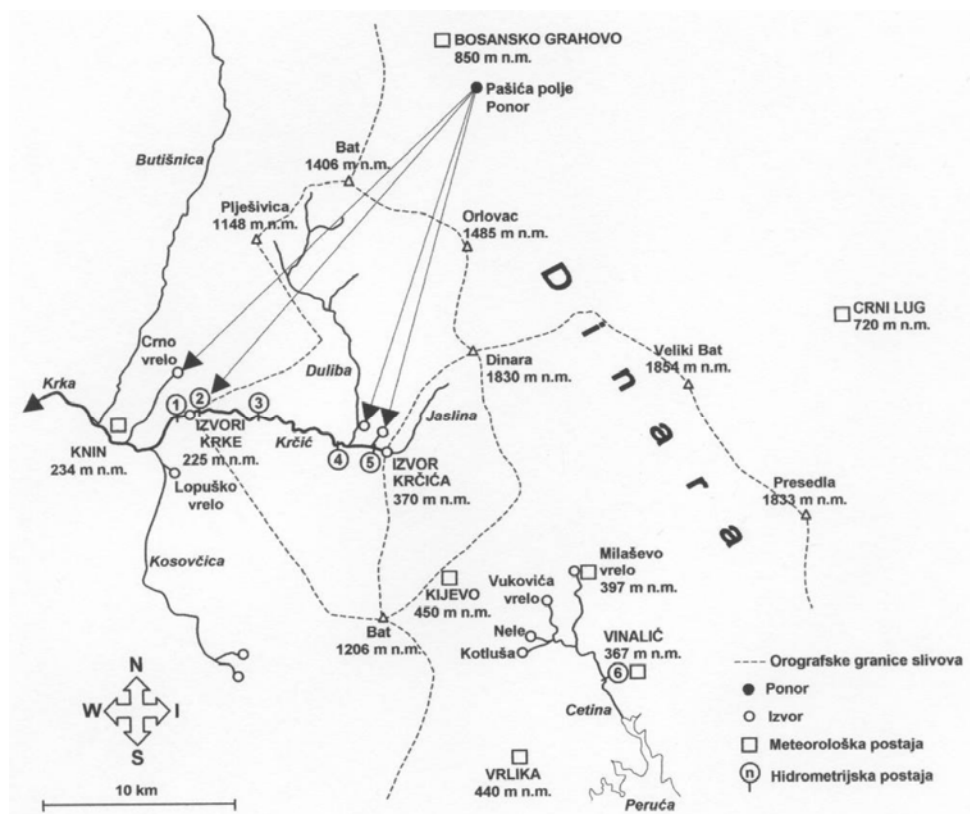
Slika 4. Globalni spektar waveleta ulaznog signala i izlaznih signala iz prvog ($k=20$ dana) i drugog ($k=80$ dana) linearnog rezervoara.

Prostor Krčića i izvora Krke građen je pretežno od jurskih naslaga lijasa, dogera i malma u karbonatnom razvoju. Iznimka je antiklinala duž toka Krčića koja je građena iz gornjotrijaskih dolomita. Propusnost dolomita ovisi o njihovoj tektonskoj oštećenosti i razlomljenosti. Prema hipotezama iznesenim u hidrogeološkoj studiji [8], tok podzemne vode kroz jezgru antiklinalne izgrađene od tektonski neoštećenih dolomita nije moguć te dolomiti stoga vrše funkciju podzemne barijere na dijelu svog prostiranja. Pretpostavlja se da su na ovaj način razdvojene podzemne vode područja sjeverno od Krčića od voda južnog područja. Vode iz sjevernog područja usmjerene su prema Glavnom izvoru Krke i Crnom vrelu, dok su vode s područja južno od Krčića usmjerene prema Malom vrelu, Lopuskom vrelu i Kosovčici (slika 5.). Kako dolomiti mogu propuštati vodu na mjestima gdje su jače tektonski oštećeni, pretpostavlja se da voda na Glavni izvor Krke dolazi uzduž tektonski razlomljene zone u desnom boku antiklinalne [8]. Područje između izvora Krčića i Cetine građeno je od dobro propusnih naslaga donje krede. Stoga vododjelnica prema slivu Cetine se mijenja

unutar jednog pojasa ovisno o nivoima podzemnih voda (tzv. podzemna zonarna razdjelnica). Pojas prolazi platoom u blizini mjesta Kijevo i pruža se u zaleđe planinskog masiva Dinare. Ovaj planinski masiv, građen iz naslaga malma, ima hidrogeološku funkciju relativne barijere te usmjerava tokove podzemnih voda u smjeru paralelnom svom pružanju. Teren između Dinare i Krčića je podijeljen u niz tektonskih blokova bez pravilne strukture. Prema hipotezi iznesenoj u hidrogeološkoj studiji [8], znatan dio vode na izvor Krčića pritječe iz područja Uništa uzduž rasjeda s južne strane Dinare. Ovaj zaključak je u suprotnosti s rezultatima hidrogeoloških istražnih radova koji su se radili za potrebe određivanja zona sanitarne zaštite izvora Vukovića vrelo [9] prema kojima područje Uništa i cijelo zaleđe Dinare pripada slivu Cetine. Rezultati trasiranja ponora u Pašića polju kod Bosanskog Grahova provedeni 1998. godine [9] pokazali su direktnu vezu ponorskog područja u Pašića polju sa slivom Krke (slika 1.). Boja izlivena u ponor 25.11.1998. pojavila se nakon 11 dana prvo u bočnim jarugama s desne obale Krčića a zatim i na glavnom izvoru Krke. Dva dana poslije boja se pojavila i na

Crnom vrelu ali u znatno manjim koncentracijama. Posebno je zanimljivo i indikativno to što boja nije opažena na izvoru Krčića. Veza također nije uspostavljena niti s Malim i Trećim izvorom Krke. Treba naglasiti da se u vodoprivrednoj osnovi [6] područje Pašića Polja nalazi u slivnom području rijeke

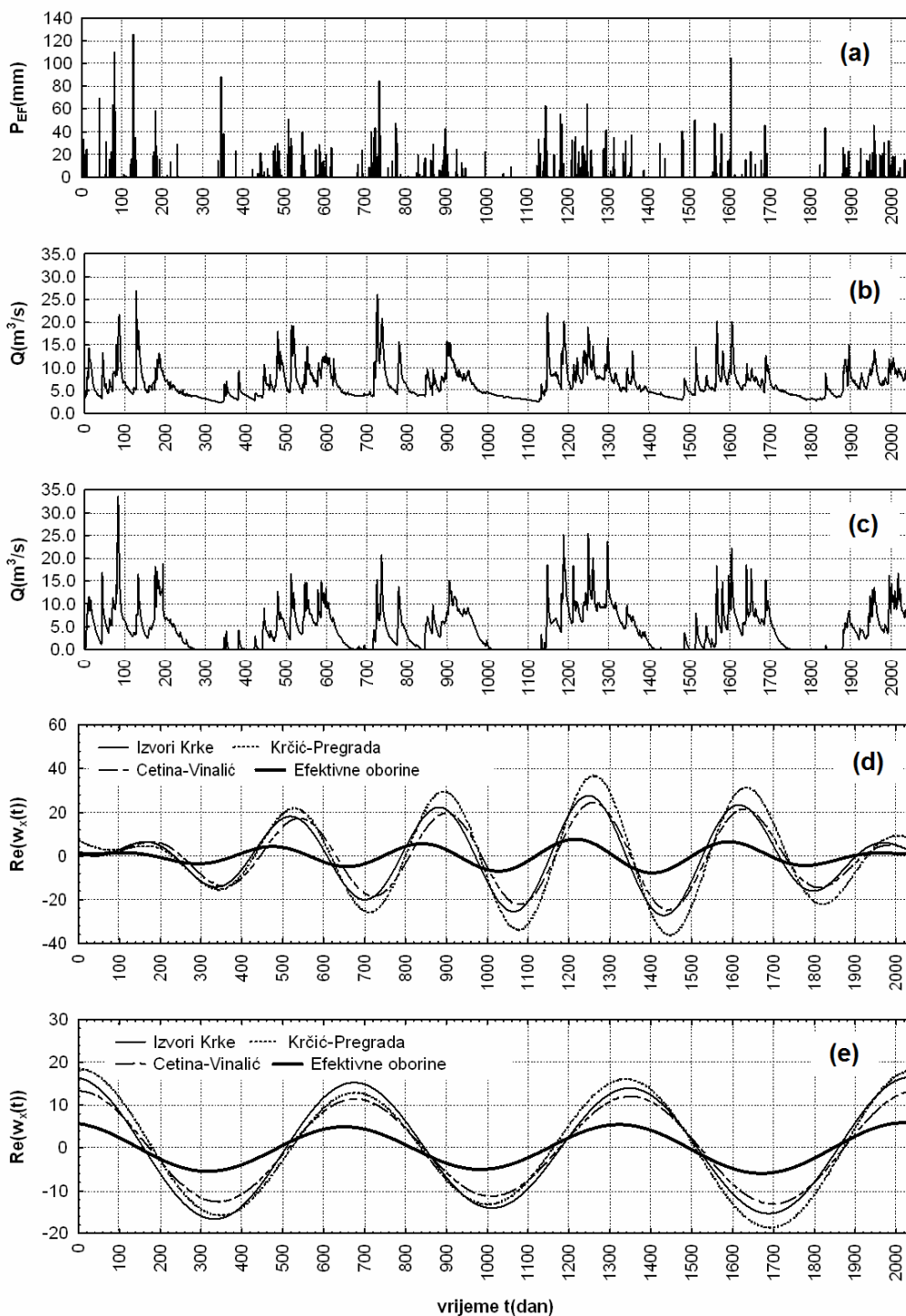
Cetine. Iznese kontradiktornosti pokazuju da vododjelnica slivova Krčića i Cetine zbog svoje složenosti još uvijek nije određena niti približno. Slična situacija je i sjeverno od Krčića gdje također granica sliva prema izvorima s lijeve obale Butišnice nije poznata kao niti vododjelnica s Crnomorskim slivom.



Slika 5. Pregledna situacija područja s orografskim granicama slivova, rasporedom meteoroloških i hidrometrijskih postaja te rezultatima trasiranja ponora u Pašića polju.

Na području slivova Krčića, izvora Krke i izvora Cetine trenutno se nalaze samo dvije aktivne hidrometrijske postaje; Krka-Topolje smještena oko 500 m nizvodno od izvora Krke (postaja 1, slika 5.) i postaja Cetina-Vinalić (postaja 6). Tijekom osamdesetih godina prošlog stoljeća bile su stalno ili povremeno aktivne još četiri hidrometrijske postaje: Krčić-Izvor (postaja 5), Krčić-Pregrada (postaja 4), Krčić-Krčić (postaja 3) i Krčić-Slap (postaja 2). Kao zajedničko razdoblje tijekom kojeg je većina postaja bila aktivna i svi podaci kompletirani izdvojen je niz od devet godina, od 1982. do 1990. U tablici 1. nalaze se osnovni statistički pokazatelji srednjih mjesečnih i

srednjih godišnjih otjecanja zabilježenih na postajama Krčić-Pregrada i Cetina-Vinalić te izvorima Krke. Vrijednosti otjecanja na izvorima Krke su dobivena oduzimanjem otjecanja s postaje Krčić-Krčić od otjecanja s postaje Krka-Topolje. Zbog gubitaka duž toka Krčića ovako dobivene vrijednosti ne predstavljaju stvarna otjecanja s izvora Krke, međutim nastala pogreška vjerojatno nema velikog utjecaja na ukupnu točnost otjecanja koja je upitna zbog nemogućnosti preciznog određivanja krivulje protoka [2, 3, 7]. Na slikama 6.(b i c) prikazana su srednja dnevna otjecanja na profilu Krčić-Pregrada i izvorima Krke za razdoblje od 2.10.1982. do 10.05.1988. god.



Slika 6. Dnevne efektivne oborine (a), srednja dnevna otjecanja na izvorima Krke (b) i profilu Krčić-Pregrada (c) te realni dijelovi wavelet-transformacija za periode od $s=362$ dana (d) i $s=724$ dana (e) za razdoblje od 2.10.1982. do 10.5.1988. god.

Unutar pretpostavljenih granica sliva Krčića i izvora Krke nema niti jedne meteorološke postaje te su stoga u provedenim analizama korišteni dnevni podaci s dvije najbliže postaje smještene izvan pretpostavljenih granica sliva. To je postaja Knin koja se nalazi na nadmorskoj visini od 234 m n.m. i postaja Kijevo koja je na visini od približno 450 m n.m. (slika 5). Srednje dnevne oborine na slivu za razdoblje 1982.-1990. generirane su izrazom:

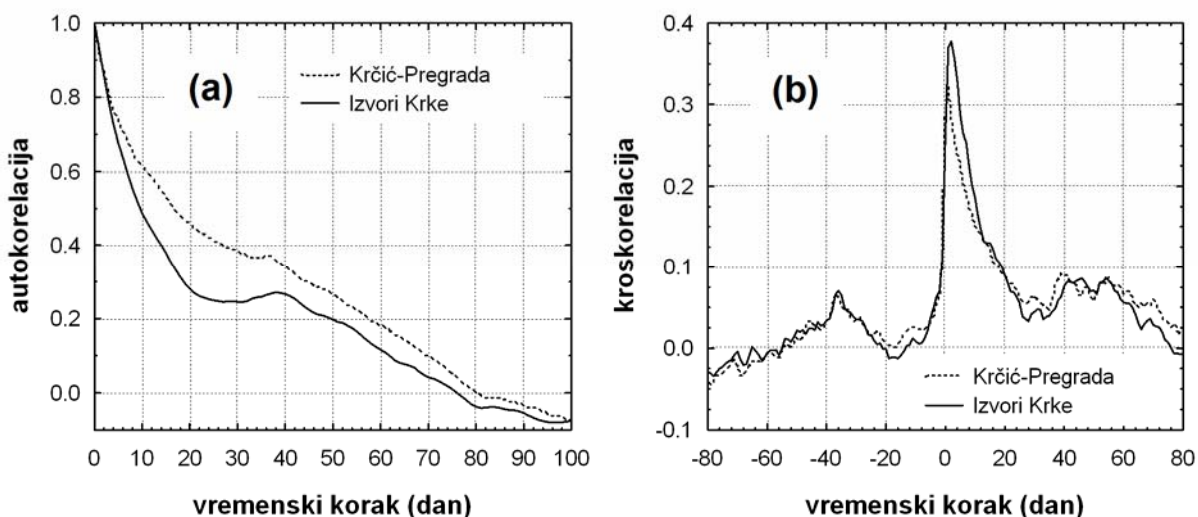
$$P_D = K[\theta P_{Kijevo} + (1 - \theta)P_{Knin}] \quad (14)$$

gdje su:

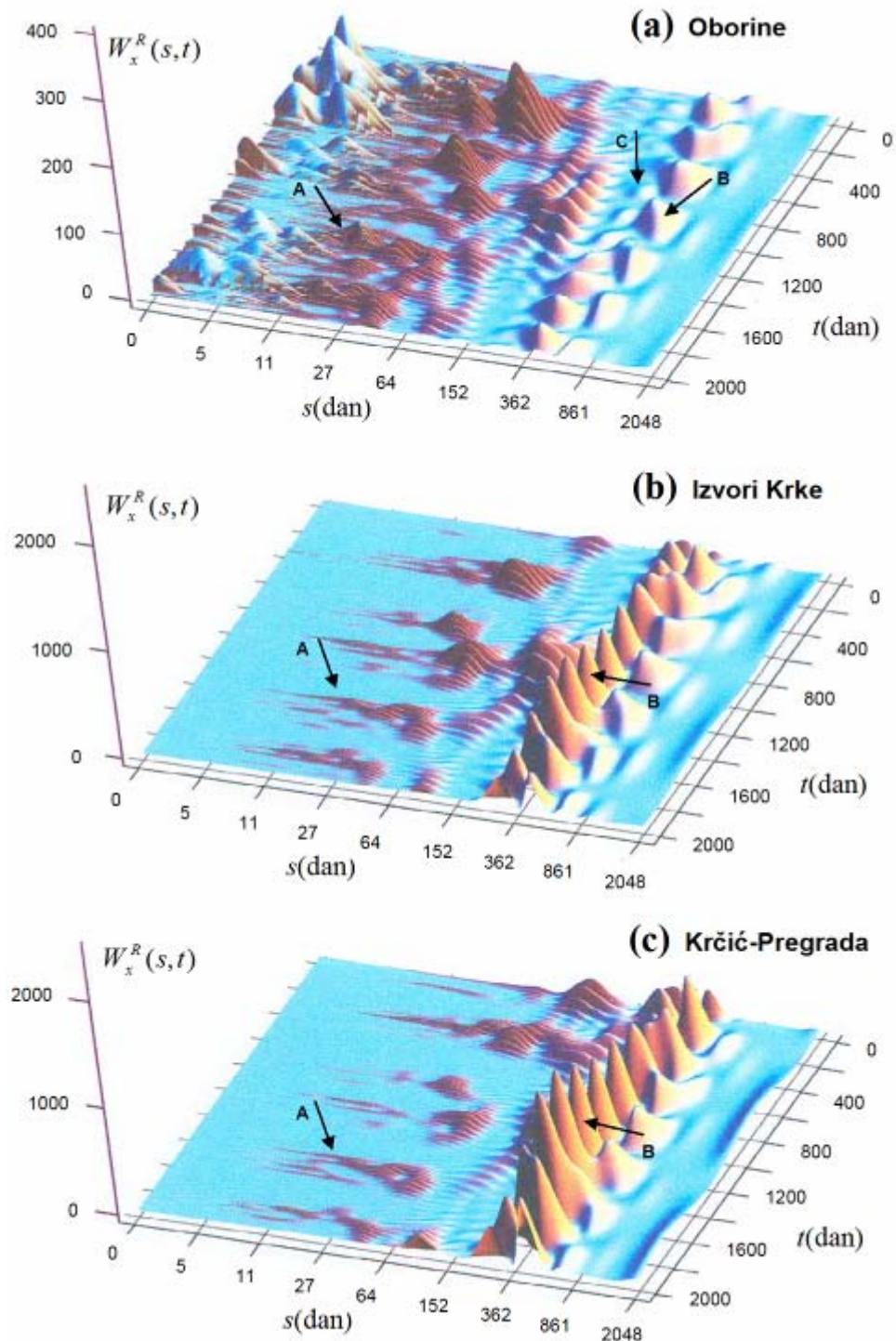
P_{Kijevo} i P_{Knin} dnevne oborine na postajama Kijevo i Knin, K korekcijski koeficijent koji uključuje u proračun visinski položaj postaja, θ težinski koeficijent koji uključuje u proračun prostornu nejednolikost oborina.

Težinski koeficijent θ je određen regresijom, tj. maksimiziranjem koeficijenta linearne regresije između srednjih godišnjih oborina na slivu i srednjih godišnjih otjecanja na profilu Krka-Topolje gdje su srednje godišnje oborine na slivu dobivene sumiranjem generiranih dnevnih oborina putem izraza (14) na godišnjoj razini. Proračun je pokazao da se maksimalni koeficijent linearne regresije postiže za vrijednost $\theta = 0,48$. Ovakvim postupkom je određena

jedinstvena vrijednost težinskog koeficijenta θ za cijelo analizirano razdoblje od 9 godina. Vrijednosti težinskog koeficijenta θ po pojedinim godinama nije bilo moguće odrediti ovakvim postupkom jer je zbog značajnih retencijskih i akumulacijskih sposobnosti vodonosnika korelacija između srednjih mjesečnih oborina na slivu i srednjih mjesečnih otjecanja na profilu Krka-Topolje vrlo mala. Preduvjet za procjenu koeficijenta K u izrazu (14) je poznavanje zavisnosti količine oborina o nadmorskoj visini na analiziranom području. Kako bi se utvrdila ova zavisnost u analizu su uključene godišnje oborine s dodatnih pet postaja smještenih u blizini pretpostavljenih granica sliva (Izvor Cetine, Vinalić, Vrlika, Crni Lug i Bosansko Grahovo; slika 5.) te je za pretpostavljenu prosječnu visinu sliva od oko 1000 m n.m. korekcijski koeficijent za analizirano razdoblje od 9 godina procijenjen na vrijednost $K = 1,52$. U tablici 1. dati su osnovni statistički pokazatelji generiranih srednjih mjesečnih i godišnjih oborina na slivu za razdoblje 1982.-1990. Efektivne oborine su izračunate metodom Palmer-ove bilance vode u tlu [26] gdje su vrijednosti parametara modela (kapaciteti površinskog sloja tla s_1 i kapacitet potpovršinske zone s_2) određeni spektralnom metodom [12, 14]. Na slici 6.(a) nalaze se dnevne efektivne oborine izračunate s vrijednostima parametara modela $s_1 = 4mm$ i $s_2 = 39mm$ za razdoblje od 2.10.1982. do 10.5.1988. god.



Slika 7. Autokorelacijske (a) i kroskorelacijske (b) funkcije srednjih dnevnih otjecanja na profilu Krčić-Pregrada i izvorima Krke.



Slika 8. Spektar snage realnog dijela wavelet-transformacije dnevnih oborina (a) i srednjih dnevnih otjecanja na izvorima Krke (b) i profilu Krčić-Pregrada (c).

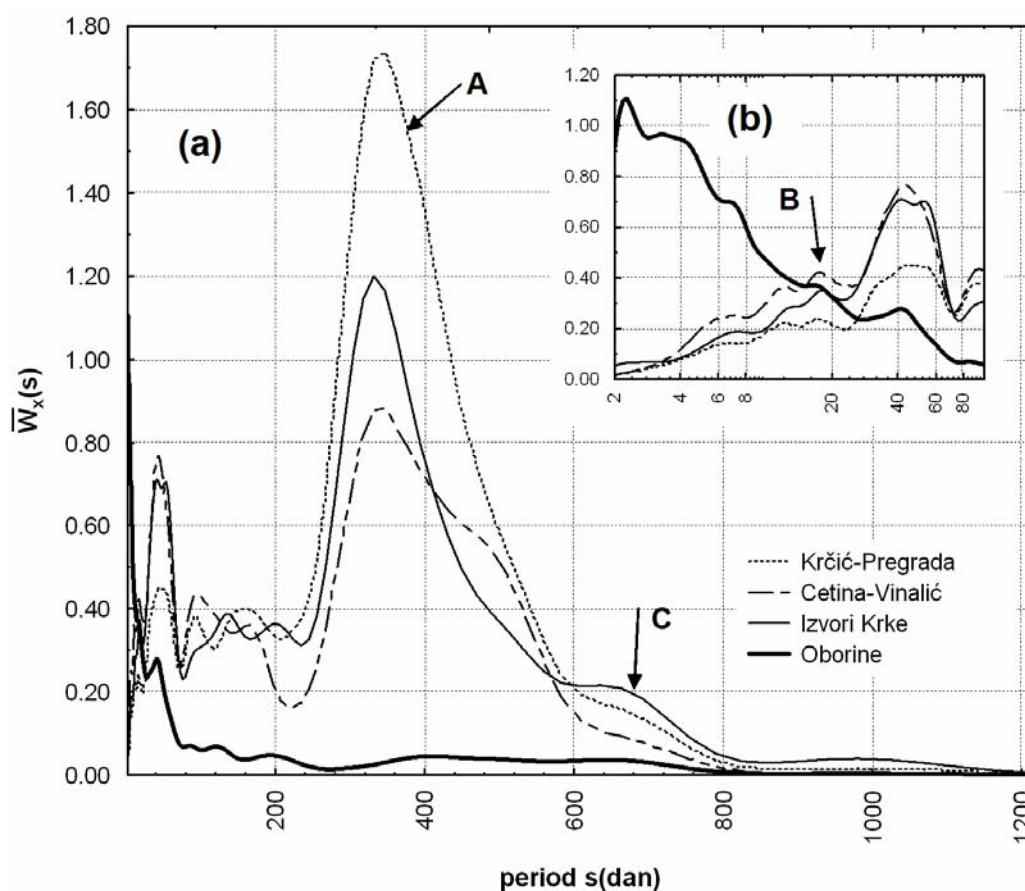
Na slici 7.(a) prikazane su autokorelacijske funkcije srednjih dnevnih otjecanja na profilu Krčić-Pregrada i izvorima Krke gdje se mogu zapaziti razlike u strukturi otjecanja na dva analizirana profila. Pamćenje sustava, definirano kao vremenski korak gdje autokorelacijska funkcija presijeca os apscise [23], kod oba izvora je približno jednako i iznosi između 75 i 80 dana. Međutim, linearna međuzavisnost članova vremenske serije izvora Krke relativno brzo se gubi u prvih dvadesetak dana nakon čega se trend zaustavlja. Na osnovi oblika funkcija se može zaključiti da je kod izvora Krke znatno izraženija dvokomponentnost otjecanja gdje brza komponenta otjecanja traje oko dvadesetak dana. Za razliku od funkcije izvora Krke, linearna međuzavisnost članova vremenske serije profila Krčić-Pregrada sporije opada a trajanje brze komponente otjecanja nije jasno izraženo. Na objema funkcijama je vidljiva pojačana autokoreliranost između 30. i 60. dana što je posljedica periodičkih komponenti u vremenskoj seriji otjecanja koje su kod profila Krčić-Pregrada manje izražene iz razloga što ovaj vodonosnik ima nešto veću retencijsku sposobnost. Na slici 7.(b) nalaze se kroskorelacijske funkcije između srednjih dnevnih oborina na slivu i srednjih dnevnih otjecanja na profilu Krčić-Pregrada i izvorima Krke. Zapaža se nešto manja koreliranost između oborina i otjecanja na profilu Krčić-Pregrada što je vjerojatno posljedica presušivanja Krčića. Naime, Krčić je prosječno stotinjak dana godišnje bez otjecanja te oborine koje padnu tijekom tog razdoblja nemaju odgovarajući odgovor sustava. Oba izvora brzo reagiraju na oborinu palu na sliv. Funkcija profila Krčić-Pregrada svoj maksimum postiže već pri vremenskom koraku od jednog dana dok izvori Krke imaju malo sporiji odgovor sustava (maksimum se postiže pri vremenskom koraku od dva dana). U prvih tridesetak dana veza između ulaznog i izlaznog signala se brže gubi na izvorima Krke što se može povezati s kraćim trajanjem brze komponente otjecanja vidljivim i na autokorelacijskoj funkciji. Slično kao i kod autokorelacijske funkcije, uslijed periodičkih komponenti u vremenskim serijama pojačana kroskorelacija između 30. i 60. dana vidljiva je na obje kroskorelacijske funkcije.

Na slici 8.(a) nalazi se spektar snage realnog dijela wavelet-transformacije srednjih dnevnih oborina na slivu gdje se zapaža prisutnost svih periodičkih komponenti. Veći dio varijance je raspoređen u području kratkih perioda (detalj A), dok su kod dugih perioda uočljivi vrhovi smješteni približno oko perioda od dvije godine (detalj B). Godišnje periodičnosti su

jedva primjetne (detalj C) što podrazumijeva da su sezonske neravnomjernosti u oborinama manje značajne od razlika između sušnih i kišnih godina. Na slikama 8.(b) i (c) nalaze se spektri snage realnih dijelova wavelet-transformacija srednjih dnevnih otjecanja na izvorima Krke i profilu Krčić-Pregrada. Zapaža se da su periodičke komponente kratkog trajanja u znatnoj mjeri prigušene (detalji A), dok su godišnje i višegodišnje pojačane. Kod oba vodonosnika jasno je vidljiv pravilan raspored vrhova kod perioda od jedne godine (detalji B). Kako je ova periodička komponenta bila jedva primjetna na spektru snage realnog dijela wavelet-transformacije dnevnih oborina, može se zaključiti da je nastala prvenstveno pod utjecajem izmjene godišnjih doba, odnosno uobičajenih sezonskih promjena klimatskih karakteristika (npr.: temperature i vlažnosti zraka, vlažnosti tla, sunčeve radijacije, naoblake, vjetra, vrste oborina, itd.) koje imaju značajan utjecaj na formiranje otjecanja na krškim izvorima. Zanimljivo je da godišnji vrhovi na spektrima snage realnih dijelova wavelet-transformacija profila Krčić-Pregrada i Cetina-Vinalić imaju određeni zaostatak za vrhovima izvora Krke. Na slici 6.(d) uspoređene su realni dijelovi wavelet-transformacija srednjih dnevnih otjecanja na izvorima Krke, profilu Krčić-Pregrada i profilu Cetina-Vinalić za vrijednost perioda od jedne godine koja otkriva da taj zaostatak godišnje iznosi od 12 do 14 dana. Zaostatak na godišnjoj razini je vjerojatno posljedica geografskog položaja sliva izvora Cetine koji se većim dijelom nalazi znatno dublje u zaleđu Dinare koja na ovom području predstavlja prirodnu granicu utjecaja mediteranske klime. Premda se topografski dio sliva izvora Krčića nalazi također s mediteranske strane Dinare i unutar topografskih granica sliva rijeke Krke, na slici 6.(d) se može primijetiti da se realni dijelovi wavelet-transformacija profila Krčić-Pregrada i Cetina-Vinalić vrlo dobro vremenski preklapaju što pokazuje da je izvor Krčića hidrološki znatno povezaniji s izvorima Cetine. Kako bi se moglo približno procijeniti vremenski zaostatak izlaznih signala otjecanja, na slici 6.(d) je prikazan i realni dio wavelet-transformacije izračunatih efektivnih dnevnih oborina koje predstavljaju znatno prihvatljiviju aproksimaciju stvarnog ulaznog signala od ukupnih dnevnih oborina. Prosječni godišnji zaostaci izlaznih signala iznose: 32 dana za izvore Krke, 46 dana za profil Krčić-Pregrada i 44 dana za izvore Cetine; što svjedoči o dosta dugom zadržavanju vode u podzemlju, međutim treba naglasiti da je ovakav rezultat vjerojatno jednim dijelom posljedica i privremenog zadržavanja dijela oborina na slivu u obliku snijega po obroncima Dinare. Na slici

6.(e) uspoređene su realni dijelovi wavelet-transformacija ulaznog i izlaznih signala za vrijednost perioda od dvije godine gdje se zapaža da je, za razliku od teoretskog primjera linearnog rezervoara, vremenski zaostatak manji od onog na godišnjoj razini, te iznosi prosječno od 15 do 30 dana s tim da najmanji zaostatak imaju otjecanja na profilu Krčić-Pregrada. Može se zaključiti da su višegodišnje periodičke komponente u otjecanjima s tri analizirane izvorske zone generirane prvenstveno brzim komponentom otjecanja. Rezultat potvrđuje da je način funkcioniranja linearnog rezervoara bitno različit od načina funkcioniranja krških vodonosnika gdje je izražena višekompo-

nentnost otjecanja; bujični karakter brze komponente otjecanja i sporo pražnjenje baznog dijela otjecanja. Kod analiziranih krških izvora se "višak vode" u nadprosječno vlažnim hidrološkim godinama najvećim dijelom relativno brzo transportira do izvora tijekom velikih otjecanja u vlažnom dijelu godine te je stoga njegov utjecaj na povećanje minimalnih protoka tijekom sušnog razdoblja ograničen. Zato se i režimi otjecanja na krškim izvorima tijekom nadprosječno vlažnih i prosječno vlažnih hidroloških godina razlikuju uglavnom po intenzitetu otjecanja u vlažnom dijelu godine dok su razlike u minimalnim otjecanjima u sušnom razdoblju manje značajne.



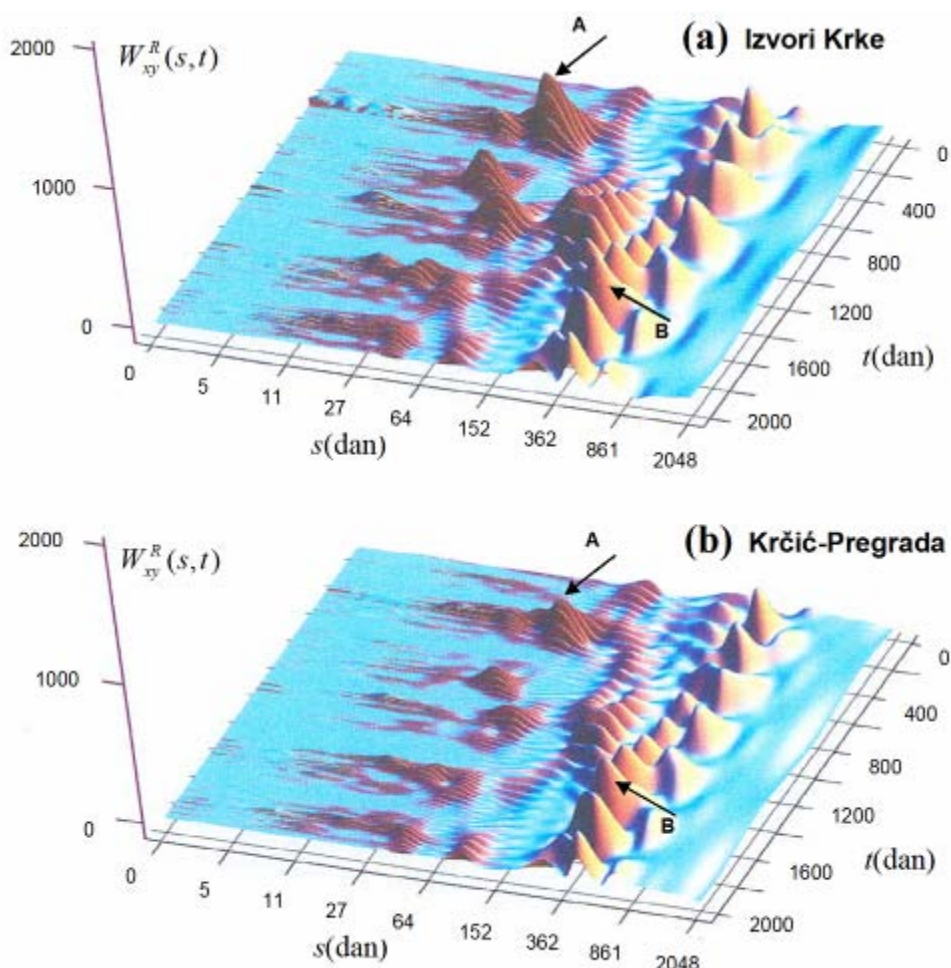
Slika 9. Globalni spektar waveleta dnevnih oborina i srednjih dnevnih otjecanja na profilu Krčić-Pregrada, izvorima Krke i profilu Cetina-Vinalić u linearnom mjerilu (a) i logaritamskom mjerilu (b).

Na slikama 9.(a) i (b) nalaze se globalni spektri waveleta srednjih dnevnih oborina na slivu i srednjih dnevnih otjecanja za tri analizirana profila u linearnom i logaritamskom mjerilu. Logaritamsko mjerilo znatno

olakšava analizu transformacije ulaznog signala pri kratkim periodima. Prvi dio grafičkog prikaza gdje su vrijednosti globalnog spektra waveleta oborina veće od spektra otjecanja može se poistovjetiti s razdobljem

akumuliranja vode u vodonosnicima, dok drugi dio gdje su vrijednosti globalnog spektra otjecanja veće od spektra oborina predstavlja razdoblje pražnjenja. U prvom dijelu vodonosnik prigušuje ulazni signal dok ga u drugom dijelu pojačava. Pod pojmom akumuliranja vode u vodonosniku podrazumijeva se razdoblje nakon oborine tijekom kojeg površinske vode turbulentnim tokom kroz kanale i rascjepe vadozne zone otječu u

podzemlje, dok se pojam pražnjenja vodonosnika odnosi na razdoblje nakon završetka brzog turbulentnog toka vode kroz vadoznu zonu, kad se intenzivira sporo pražnjenje sitnih pora i pukotina freatične zone. Iz tog razloga, mjesto gdje vrijednosti globalnog spektra waveleta otjecanja postaju veće od vrijednosti spektra oborina određuje približno trajanje brze komponente otjecanja.



Slika 10. Kros-spektar snage realnog dijela wavelet-transformacije srednjih dnevnih otjecanja na izvorima Krke (a) i profilu Krčić-Pregrada (b).

Na slici 9.(b) zapaža se da je trajanje brze komponente otjecanja na izvorima Krke oko 20 dana dok je na profilu Krčić-Pregrada oko 26 dana. Najbrže se prazni vodonosnik izvora Cetine gdje trajanje brze komponente otjecanja iznosi samo oko 15 dana. Način

preraspodjele varijance ulaznog signala iz područja niskih perioda u područje visokih perioda može se povezati s retencijskom sposobnošću vodonosnika. Ako se usporede globalni spektri waveleta triju analiziranih izvora pri periodima od jedne godine

uočava se da globalni spektar profila Krčić-Pregrada ima najveći dio varijance raspoređen unutar ovog područja što podrazumijeva da njegov vodonosnik ima najveću retencijsku sposobnost. Pošto se radi o izvoru najmanjeg kapaciteta (tabela 1.) koji presušuje redovito svake godine, rezultat pokazuje da kod krških vodonosnika treba razlikovati retencijsku od akumulacijske sposobnosti vodonosnika. Za razliku od retencijske sposobnosti, koja ovisi uglavnom o okršenosti vodonosnika, akumulacijsku sposobnost definiraju i druge hidrogeološke značajke kao što su npr.: nadmorska visina i položaj izvora u odnosu na vodonosnik (silazno ili uzlazno vrelo), vremenska promjenjivost granica sliva, pritjecanja iz susjednih vodonosnika ili otvorenih vodotoka, itd. Vrijednosti globalnih spektara waveleta otjecanja u području višegodišnjih perioda potvrđuju da vodonosnik izvora Krke ima najveću akumulacijsku sposobnost, međutim zanimljivo je da vodonosnik izvora Krčića ima prividno veću akumulacijsku sposobnost od vodonosnika izvora Cetine. Ovakav rezultat može biti posljedica utjecaja bujica i malih izvora smještenih na desnoj obali rijeke Krčić između izvora Krčića i profila Krčić-Pregrada koji preljevaju vodu iz sliva izvora Krke u sliv Krčića, no ne može se u potpunosti odbaciti niti mogućnost da se u specifičnim hidrogeološkim uvjetima vodonosnik izvora Krčića također prihranjuje djelomično vodom iz vodonosnika izvora Krke, premda rezultati trasiranja [9] to demantiraju.

Na slikama 10.(a) i (b) nalaze se kros-spektri snage između realnih dijelova wavelet-transformacija srednjih dnevnih oborina na slivu i srednjih dnevnih otjecanja na profilu Krčić-pregrada i izvorima Krke koji pokazuju način na koji vodonosnici modificiraju ulazni signal oborina te se usporedbom sa spektrima snage realnog dijela wavelet-transformacija otjecanja mogu prepoznati periodičke komponente koje nisu direktna posljedica ulaznog signala već drugih hidroloških ili možda antropogenih utjecaja. Zapaža se da je varijanca u području niskih perioda gotovo u potpunosti prigušena. Periodičnosti između 30. i 60. dana su nešto istaknutije a najbolje se mogu uočiti u prvom dijelu analiziranog razdoblja (detalj A). Posljedice ovih periodičkih komponenti su se mogle primijetiti na autokorelacijskim i kroskorelacijskim funkcijama u obliku nepravilnosti (slika 7.). Za razliku od spektra snage realnog dijela wavelet-transformacije otjecanja (slike 8.b i c), vrhovi godišnjih perioda na kros-spektrima su vidljivi samo u drugom dijelu analiziranog razdoblja (detalj B) što potvrđuje da sezonske periodičnosti u otjecanjima nisu nastale

uslijed sličnih periodičkih komponenti u oborinama već su rezultat sezonskih promjena klimatskih karakteristika koje se odigravaju na slivu tijekom svake godine.

5. ZAKLJUČAK

Za razliku od korelacijske i spektralne analize, wavelet-transformacijama se mogu registrirati pojedine nestacionarne periodičke komponente u vremenskim serijama i locirati razdoblje njihovog trajanja što predstavlja preduvjet za prepoznavanje i analizu uzroka njihovog pojavljivanja. U ovom radu su analizirane vremenske serije dnevnih oborina i srednjih dnevnih otjecanja s tri hidrometrijska profila koji predstavljaju otjecanja iz izvorskih zona Krčića, Krke i Cetine. Rezultati su pokazali da se u analiziranim otjecanjima mogu razlikovati tri grupe periodičkih komponenti. Komponente perioda manjih od jedne godine nastaju prvenstveno kao rezultat oborinskih epizoda koje se javljaju tijekom pojedinih godina u pravilnim vremenskim intervalima. Sezonske periodičke komponente nisu direktna posljedica oborina već ostalih klimatskih karakteristika koje se mijenjaju s promjenama godišnjih doba a koje bitno utječu na procese evapotranspiracije i infiltracije. Višegodišnje periodičke komponente su rezultat izmjene vlažnih i sušnih hidroloških godina te opisuju globalne klimatske zakonitosti na slivu tijekom dužeg vremenskog razdoblja kao i njihove promjene. Analizom načina transformacije pojedinih periodičkih komponenti iz ulaznog signala može se doći do vrijednih informacija o procesima koji se odigravaju na slivu i u krškom podzemlju te o osnovnim karakteristikama vodonosnika kao što su npr.: retencijske i akumulacijske sposobnosti, srednje vrijeme zadržavanja vode i trajanje brze komponente otjecanja. Komparativnim analizama rezultatata dobivenih za pojedine vodonosnike mogu se zatim potvrditi ili odbaciti pojedine hipoteze o načinu njihovog funkcioniranja i njihovim međusobnim odnosima. Rezultati analiza su pokazali da su vodonosnici izvora Krke, Krčića i Cetine različite retencijske i akumulacijske sposobnosti što je jednim dijelom posljedica različite razvijenosti mreže podzemnih kanala, dok je drugim dijelom posljedica nadmorske visine i relativnog visinskog položaja triju analiziranih izvora u odnosu na njihove vodonosnike, odnosno različitog načina funkcioniranja. Izvori Cetine se nalaze na najvišoj koti i uglavnom prazne gornje horizonte područja Dinare i zapadnog dijela Livanjskog polja. Njihov vodonosnik ima najmanju

retencijsku sposobnost što ukazuje na postojanje dobro razvijene mreže podzemnih kanala koji ga dreniraju. Izvor Krčića je smješten tridesetak metara niže od izvora Cetine na kontaktu propusnog zaleđa i nepropusne hidrogeološke barijere koja se proteže duž toka Krčića. Premda izvor Krčića ima najmanji kapacitet i presušuje redovito svake godine, njegov vodonosnik ima najveću retencijsku sposobnost što je vjerojatno posljedica nešto slabije okršnosti prostora u njegovom zaleđu. Rezultati trasiranja [9] su pokazali da se ovaj izvor ne prihranjuje iz smjera Bosanskog Grahova što znači da mu se najveći dio vodonosnika nalazi južno i istočno od izvora u području Suhog polja kod Kijeva i planinskom masivu Dinare gdje se nalazi pretpostavljena podzemna zonarna razdjelnica sa slivom Cetine [8]. Wavelet-transformacije su to potvrdile jer je zapaženo da između vodonosnika izvora Krčića i Cetine postoji znatno veća hidrološka povezanost nego između vodonosnika izvora Krčića i glavnog izvora Krke iz čega se može zaključiti da izvor Krčića i izvori Cetine najvjerojatnije imaju jednim dijelom zajednički vodonosnik. Glavni izvor Krke nalazi se na gotovo 150 m nižoj nadmorskoj visini od izvora Krčića. Uzlazno je krško vrelo koje izbija iz krškog kanala [2, 3] te prazni niže dijelove podzemlja što mu osigurava veliku akumulacijsku sposobnost. Iz tog razloga kod izvora Krke postoji izražena dvokomponentnost oštjećenja; brza komponenta oštjećenja traje prosječno oko 20 dana nakon čega se vodonosnik znatno sporije prazni te je izvor praktično nepresušan.

LITERATURA

- [1] Angelini P., 1997. Correlation and spectral analyses of two hydrogeological systems in Central Italy, *Hydrol. Sci. J.* 42(3), 425-438.
- [2] Bonacci O., 1985. Hydrological investigations of Dinaric karst at the Krčić catchment and the River Krka springs, *J. Hydrol.* 82, 317-326.
- [3] Bonacci O., 1987. *Karst Hydrology*. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- [4] Bonacci O., 1989. Specifičnost hidrologije sliva Krke, Simpozij Nacionalni park Krka, Šibenik, str. 85-114.
- [5] Daubechies I., 1992. *Ten Lectures on Wavelets*. Society for industrial and applied mathematics, Philadelphia, Pennsylvania.
- [6] Vodoprivredna osnova slivova Krke i Zrmanje. Elektroprojekt – Zagreb, 1976.
- [7] Istraživanje vodnih resursa Dalmacije s ciljem optimalizacije njihovog korištenja, Knjiga I, Sliv Krčića i izvor Krke. Građevinski institut, OOUR Fakultet građevinskih znanosti – Split, 1982.
- [8] Hidrogeološka studija područja Trogir-Šibenik-Drniš-Knin. Geološki zavod, OOUR za inženjersku geologiju, petrologiju i mineralne sirovine – Zagreb, 1984.
- [9] Izvor Vukovića vrelo, Hidrogeološki istražni radovi za prijedlog zona sanitarne zaštite crpilišta vodovoda. Institut za geološka istraživanja, Zavod za hidrogeologiju i inženjersku geologiju – Zagreb, 2001.
- [10] Fritz F., Pavičić A., Renić A. 1989. Porijeklo voda u nacionalnom parku Krka, Simpozij Nacionalni park Krka, Šibenik, str. 115-126.
- [11] Gauchere C., 2002. Use of wavelet transform for temporal characterization of remote watersheds, *J Hydrol.* 269, 101-121.
- [12] Jukić D., 2003. Određivanje efektivnih oborina u domeni frekvencija, *Hrvatske vode* 43, 107-118.
- [13] Jukić D., Denić-Jukić V., 2003. Karakterizacija krških vodonosnika korelacijskom i spektralnom analizom, *Zbornik radova 3. Hrvatske konferencije o vodama*, Hrvatske vode, Osijek.
- [14] Jukić D., Denić-Jukić V., 2004. A frequency domain approach to groundwater recharge estimation in karst, *J. Hydrol.* 289, 95-110.
- [15] Kumar P., Foufoula-Georgiou E., 1993. A multicomponent decomposition of spatial rainfall fields 2. Self-similarity in fluctuations. *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 8, 2533-2544.
- [16] Labat D., Ababou R., Mangin A., 2000. Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part I: convolution and spectral analyses. *J. Hydrol.* 238, (123-148).
- [17] Labat D., Ababou R., Mangin A., 2000. Rainfall-runoff relations for karstic springs. Part II: continuous wavelet and discrete orthogonal multiresolution analyses. *J. Hydrol.* 238, (149-178).
- [18] Labat D., Ababou R., Mangin A., 2001. Introduction of Wavelet Analyses to Rainfall/Runoff Relationship for a Karstic Basin: The Case of Licq-Atherey Karstic System. *Ground Water.* 39(4), (605-615).
- [19] Labat D., Mangin A., Ababou R., 2002. Rainfall-runoff relations for karstic springs: multifractal analyses. *J. Hydrol.* 256, (176-195).

- [20] Labat D., Godderis Y., Probst J. L., Guyot J. L., 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advance in Water Resources* 27, (631-642).
- [21] Larocque M., Mangin A., Razack M., Banton O., 1997. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France), *J. Hydrol.* 205, 217-231
- [22] Lau K.-M., Weng H., 1995. Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 76, No. 12.
- [23] Mangin A., 1984. Pour une meilleure connaissance des systemes hydrologiques a partir des analyses correlatoire et spectrale, *J. Hydrol.* 67, 25-43.
- [24] Nakken M., 1999. Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns. *Environmental Modelling & Software*, 14, 283-295.
- [25] Padilla A., Pulido-Bosch A., 1995. Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *J. Hydrol.* 168, 73-89.
- [26] Palmer W.C., 1965. *Meteorological Drought*, US Department of Commerce, Research paper No 45, Washington D.C., 58 pp.
- [27] Shumway R.D., Stoffer D.S., 2000. *Time Series Analysis and its applications*. Springer Verlag, New York.
- [28] Tam V.T., De Smedt F., Batelaan O., Dassargues A., 2004. Characterization of a cavern conduit system in Vietnam by time series correlation, cross-spectrum and wavelet analyses. *Hydrol. Sci. J.* 49(5), 879-900.
- [29] Torrence C., Compo G.P., 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 72, No. 1.
- [30] Žugaj R., Marković V., 1989. Karakteristike vodnog režima rijeke Krke, *Simpozij Nacionalni park Krka, Šibenik*, str. 127-138.

CONTINUOUS WAVELET TRANSFORMATIONS AND THEIR APPLICATION ON THE KRČIĆ RIVER BASIN AND THE SOURCE OF THE KRKA RIVER

by

Damir JUKIĆ

Croatian waters, Water management department Split

Summary

Wavelet transformations register non-stationary time series of individual periodic components and locate the periods of their duration which is a precondition for recognizing and analysis of the cause of their appearance. Some possibilities of the practical application of continuous wavelet transformations in karst hydrology are shown first on the theoretical example of a linear reservoir, and afterwards analyzed on the concrete example of the Krčić River basin and the source of the Krka River. The daily mean total precipitation and the calculated effective mean daily precipitation in the river basin present the input signal, whereas the mean daily discharges from the zones of

the Krčić, Krka and Cetina Rivers sources represent the output signals. The results show that the analysis of the transformation mode of individual periodical components of the input signal can offer valuable information about the processes that occur in the river basin and in the karst underground. Additionally, comparative analyses of results obtained for individual aquifers can confirm or reject hypothesis on the mode of their functioning and mutual relations.

Key words: karst hydrology, continuous wavelet transformation, time series analysis, the Krčić River, the Krka River.

Redigovano 14.08.2006.

