Modeliranje otjecanja iz izvora Žrnovnice primjenom parametarske transfer funkcije

Sikimić, Goran

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:331059

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split







SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

GORAN SIKIMIĆ

Split, 2016.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE

GORAN SIKIMIĆ

MODELIRANJE OTJECANJA IZ IZVORA ŽRNOVNICE PRIMJENOM PARAMETARSKE TRANSFER FUNKCIJE

Diplomski rad

Split, 2016.

Modeliranje otjecanja iz izvora Žrnovnice primjenom parametarske transfer funkcije

Sažetak:

Tema rada je simulacija otjecanja iz krškog vodonosnika putem matematičkog modela. Rad sadrži postupak izrade, kalibracije i verifikacije modela. Model se sastoji od modela efektivnih oborina koji se temelji na Palmeru i modela otjecanja koji se temelji na parametarskoj transfer funkciji.
Podaci koji se koriste su:
1) dnevni podaci o protoku vode na izvoru Žrnovnice za razdoblje 1995. - 2014.
2) količina oborina na postaji Dugopolje za razdoblje 1995. -2014.
3) dnevna temperatura u °C za razdoblje 1995. - 2014.
4) dnevna relativna vlažnost za razdoblje 1995. - 2014.
Osnovni cilj ovog rada je bio provjeriti mogućnost korištenja zadanog parametarskog modela za simulaciju otjecanja iz krškog izvora Žrnovnice.
Rezultati su pokazali da se ovaj model može koristiti za prognozu budućeg otjecanja i procjenu bilance vode izvora Žrnovnice.

Ključne riječi:

simulacija otjecanja, krški vodonosnik, kalibracija, verifikacija, efektivna oborina, Palmer-ova metoda, model otjecanja, parametarska transfer funkcija

Modelling of karst spring discharge by using parameter transfer functions

Abstract:

The subject of this thesis is a simulation of discharge from the karst aquifer by using mathematical models. The work includes process development, calibration and verification of the model. The model consists of a model of the effective rainfall based on Palmer and runoff model that is based on a parametric transfer function.
The data used are:
1) daily discharge from the spring Žrnovnica for the period 1995th- 2014th
2) daily rainfall at the station Dugopolje for the period 1995th -2014th
3) daily temperature in °C for the period 1995th-2014th
4) daily relative humidity for the period 1995th-2014th
The main objective of this work was to verify the possibility of using the parameter transfer function model for simulating discharge from the karst source of Žrnovnica.
The results showed that this model can be used to forecast future discharge in order to estimate the groundwater balance of the karst spring Žrnovnica.

Keywords:

runoff simulation, karst aquifer, calibration, verification, effective rainfall, Palmer method, runoff model, parametric transfer function

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ:	**DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**
KANDIDAT:	**Goran Sikimić**
BROJ INDEKSA:	**538/2014**
KATEDRA:	**Katedra za Hidrotehniku**
PREDMET:	**Hidrologija krša**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema**:**

Modeliranje otjecanja iz izvora Žrnovnice primjenom parametarske transfer funkcije

Opis zadatka:

Na osnovu dnevnih podataka o protoku vode na izvoru Žrnovnice, te oborina na postaji Dugopolje za razdoblje 1995. - 2014. potrebno je izraditi model otjecanja iz izvora korištenjem parametarske transfer funkcije oblika:

$$u(t) = \frac{\Theta}{k_1} \cdot e^{\frac{-t}{k_1}} + \frac{1-\Theta}{k_2} \cdot e^{\frac{-t}{k_2}}$$

gdje su k_1, k_2 i Θ parametri modela.

Diplomski rad će sadržavati:

1. Matematičku osnovu provedenih analiza
2. Efektivne oborine određene Palmer-ovom bilancom vode u tlu
3. Analizu recesijskog dijela hidrograma i glavnu krivulju iscrpljenja
4. Postupak kalibracije modela
5. Postupak verifikacije modela
6. Analizu rezultata
7. Zaključak

U Splitu, 24.02. 2016.

Voditelj Diplomskog rada:	Predsjednik Povjerenstva za završne i diplomske ispite:
Prof. dr. sc. Damir Jukić	Prof. dr. sc. Ivica Boko

Zahvaljujem se mom mentoru Prof. Dr. Sc. Damiru Jukiću na Fakultetu arhitekture, građevinarstva i geodezije (Split, Hrvatska). Također se zahvaljujem roditeljima na strpljenju i potpori tijekom svih ovih godina studiranja.

Sadržaj

1. UVOD U KRŠ 7
1.1 TOPIVE STIJENE U KOJIMA NASTAJE KRŠ 7
1.2 KRŠKE RIJEKE 8
1.3 RIJEKA ŽRNOVNICA 8
2. MODELIRANJE EFEKTIVNIH OBORINA 10
2.1 POTENCIJALNA EVAPOTRANSPIRACIJA (ETp) 12
2.2 STVARNA EVAPOTRANSPIRACIJA (ET) 12
2.3 PROCJEĐIVANJE I OTJECANJE (R i RO) 13
2.4 SADRŽAJ VODE U TLU (S) 14
2.5 GUBITAK VODE IZ TLA (L) 14
2.6 REZULTATI PALMEROVE METODE 15
3. MODELIRANJE OTJECANJA 17
3.1 KORACI IZRAČUNA 17
3.2 KRIVULJA RECESIJE 18
3.3 SEPARACIJA HIDROGRAMA OTJECANJA 22
4. POSTUPAK KALIBRACIJE MODELA 24
4.1 UVOD U KALIBRACIJU 24
4.2 KORACI IZRAČUNA I ODREĐIVANJE POGREŠKE 25
5. VERIFIKACIJA MODELA 41
6. ANALIZA REZULTATA 44
7. ZAKLJUČAK 45
LITERATURA 46
POPIS SLIKA 47
POPIS TABLICA 48

1. UVOD U KRŠ

Krš je znanstveni izraz nazvan po geografskom predjelu Dinarida na Jadranskoj obali, između Slovenije i Trsta.
Tip reljefa koji se razvija na tlu sastavljenom od topivih stijena, najčešće kalcijevog karbonata ($CaCO_3$) ili magnezijevog karbonata ($MgCO_3$)).
Vapnenac bez obzira koliko tvrd, djelovanjem kiše se topi, dajući karakterističnо zemljište, špilje i podzemne riječne kanale u kojima nestaje površinska drenaža kroz naprsline i razne ponore koji su također otopljeni, a zemlja ostaje relativno neplodna.
Može se reći da krš predstavlja skup pojava koje se odnose na protjecanje vode i oblike reljefa u karbonatnim stijenama. Voda ponire i protječe kroz podzemne špilje. Na površini nastaju međusobno izolirane udubine nazvane egzokršem, dok se složeni sustavi šupljina u podzemlju nazivaju endokršem.
Krški vodonosnici su prisutni na svim kontinentima i brojnim oceanskim otocima i na njih otpada više od 20 % zemljine površine.

1.1 TOPIVE STIJENE U KOJIMA NASTAJE KRŠ

Krš se razvija u topivim stijenama koje obuhvaćaju oko 18% svih sedimentnih stijena u koje su uključene slijedeće tri grupe:
1) evaporitni sedimenti
2) silikatne stijene
3) karbonatne stijene

Pod pojmom taložina (sediment) podrazumijeva se mekan, rastresit i neokamenjen talog. Sedimentne stijene predstavljaju okamenjeni talog, preoblikovan u čvrste stijene.
Evaporitni sedimenti ili evaporiti su stijene nastale kemijskim izlučivanjem iz prirodnih, visoko koncentriranih otopina, nazvanih saline ili brine, nakon snažnog isparavanja, tj. evaporacije.
Silikatne stijene među kojima spada i kvarcit, mnogo su slabije topive od evaporita i karbonata. S druge strane čisti kvarcit se otapa tako da ne ostavlja nikakve ostatke što omogućava oblikovanje velikih šupljina, ali i nastanak drugih krških oblika. Procesi okršavanja slabo topivih stijena mogući su samo u uvjetima tople i vlažne tropske klime.
U karbonatne stijene spadaju: vapnenci, laporoviti vapnenci, vapnoviti lapori, dolomitični vapnenci, dolomiti, konglomerati, vapnenački pješčenjaci, marliti, itd. Po načinu postanka pripadaju kemijskim i biokemijskim sedimentnim stijenama.
Vapnenci se sastoje od karbonatnih minerala: kalcita, magnezijevog kalcita i rjeđe aragonita.

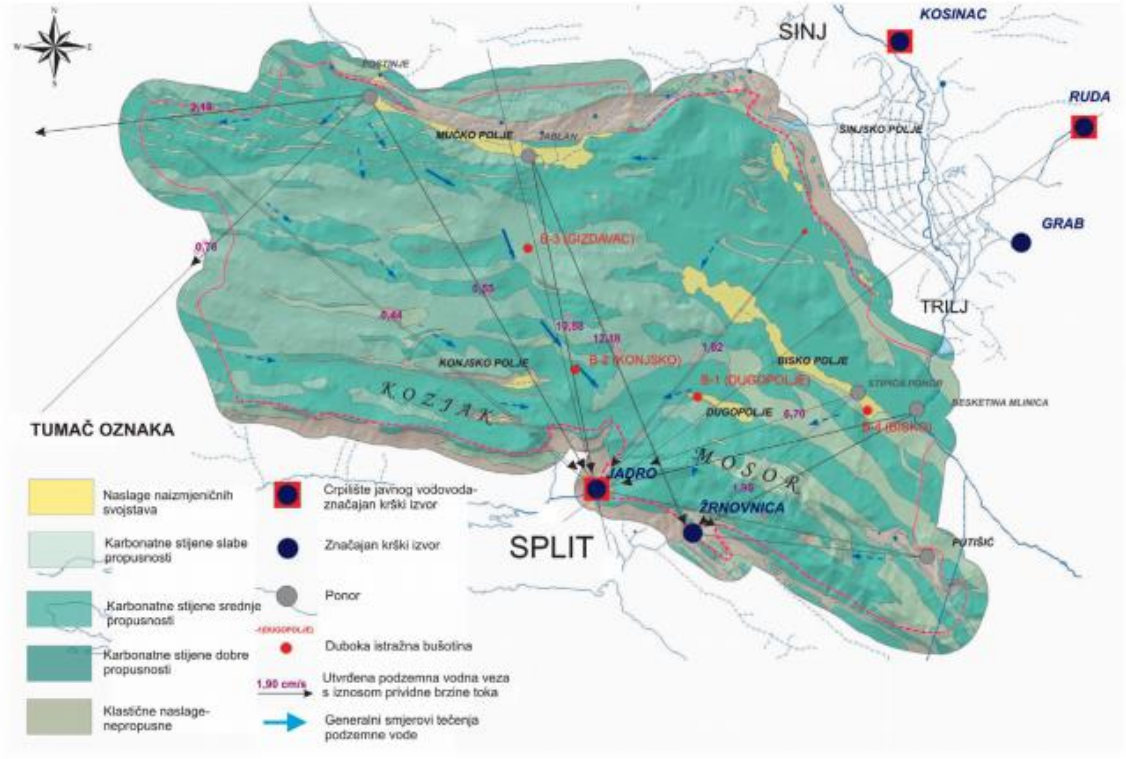
Proces topivosti kod kalcita i dolomita mnogo je složeniji nego proces topivosti kod evaporita, a zavisi o temperaturi i parcijalnom pritisku ugljičnog dioksida. U atmosferi parcijalni pritisak CO_2 iznosi oko 0,0003 bara, ali je ta vrijednost za plinove u tlu više od 1 000 puta veća te iznosi od 0,01 bar do0,03 bara. To predstavlja glavni razlog veće topivosti stijena koje leže ispod površine. Topivost karbonata zavisi i o stupnju kontakta između otopine, CO_2 u plinovitom stanju i minerala u krutom stanju.
Većina vapnenaca potječe iz slane, morske vode, ali postoje i oni nastali u slatkoj vodi i na kopnu. Procijenjeno je da se godišnje u oceane unosi od 500 do 1 000 milijuna tona sulfata i karbonata. Većina bude istaložena na kontinentalnim pragovima, a dio u dubokom dijelu oceana.

1.2 KRŠKE RIJEKE

Krške su rijeke osobito karakteristične po zamršenim odnosima podzemnih i nadzemnih dijelova svoga toka, ali upravo ono što im daje posebnu čar istodobno ih čini izuzetno osjetljivima i na najmanje oblike onečišćenja. Kroz krševiti teren onečišćena voda procjeđuje se vrlo brzo i uz minimalnu filtraciju izbija u otvorene vodotoke. Naše krške rijeke spadaju u rijeke kraćeg toka. Rijeke imaju ključnu ulogu u nastajanju i razvoju krških fenomena. Slapovi, sedra, vrela, ponori i krški izvori samo su neki od tih znamenitih fenomena izravno povezanih s rijekama.

1.3 RIJEKA ŽRNOVNICA

Žrnovnica je hrvatska rijeka, smještena u Splitsko - dalmatinskoj županiji, koja izvire u podnožju Mosora (između kamenitih Pečinica i Orlica) i presijeca kotlinu po dužini.
Od izvora do ušća duga je 4 800 metara.
To je krška rijeka bržeg toka s manjim slapovima i dosta brzaka. Teče kroz istoimeno mjesto i ulijeva se u more svega nekoliko kilometara od Splita u smjeru Omiša.
Izvor Žrnovnice nalazi se na 90 m n.m. u zoni dodira naslaga splitske Zagore i obalnog fliškog pojasa. U morfološkom smislu uočava se izrazito raščlanjen reljef posebno na područjima gdje su rasprostranjene karbonatne stijene. Nalazi se nekoliko krških polja, uvali i zaravni. Najveće je Mućko krško polje. oko 400 hektara, zatim slijede Dicmansko polje, Dugopolje i Konjsko polje.
Izvor rijeke se sastoji od niza manjih izvora koji se javljaju na širem području u visinskom rasponu od 77 do 88 m n.m. U periodu 1995.-2014. na mjernoj postaji Izvor Žrnovnice izmjeren je minimalni protok 0,34 m^3/s, a maksimalan 19,2 m^3/s, dok srednji godišnji protok iznosi 1,9 m^3/s. Dio izvorišta se koristi za potrebe vodoopskrbe naselja Sitno Donje i Ţrnovnica, a dio se koristi za navodnjavanje.
Područje sliva Jadra i Žrnovnice odlikuje se naglašenom razlomljenošću i prisutnom tektonskom aktivnošću. Na potonje izravno upućuje stalno pojavljivanje potresa. Tektonska aktivnost rezultira i promjenama strukturnih odnosa osobito sustava rasjeda i pukotina.



Slika 1. Shematska hidrogeološka karta slivnog područja izvora Jadra i Žrnovnice[9]



Slika 2. rijeka Žrnovnica

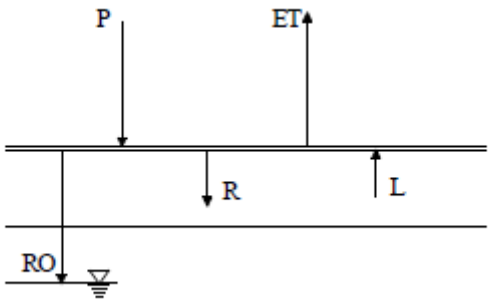
2. MODELIRANJE EFEKTIVNIH OBORINA

U ovom radu efektivne oborine proračunavati će se pomoću Palmerove bilance vode u tlu.
Palmerov postupak izračunavanja komponenti bilance vode moguće je primijeniti za različite vrste podloge. Sa gledišta Palmerove teorije, biranje broja vrsta i dubina tla je neograničeno budući da se bilanca vode po ovoj metodi može izračunavati, teoretski, za svaki m^2.
Pandžić[7] je koristeći pedološke i meteorološke podatke s 58 meteoroloških postaja primorske i gorske Hrvatske za razdoblje 1961-1980 pokazao da su komponente vodne ravnoteže periodičkog karaktera.
Najveća ovisnost komponenata bilance je o količini oborine, temperaturi te o vrsti tla.
Ova metoda primjenjuje se za određivanje bilance vode u tlu koja je izvorno izvedena za nekrška područja, međutim, njena primjena u području krša dala je zadovoljavajuće rezultate.

Jednadžba bilance vode prema Palmeru glasi:

$$P + L = ET + R + RO \quad (1)$$

Termini iz jednadžbe:
P - oborina (precipitation)
L - gubitak vode (loss)
ET - evapotranspiracija (evapotranspiration)
R - procjeđivanje (recharge)
RO - otjecanje (runoff)

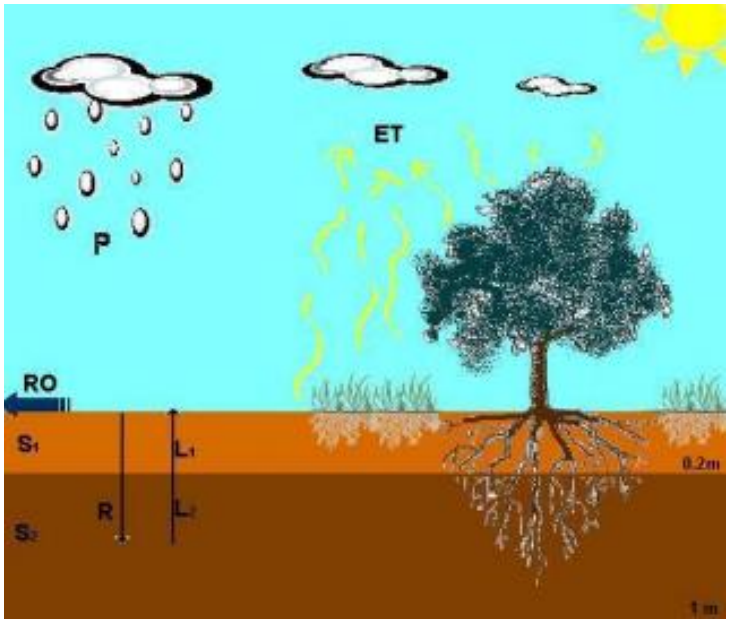


Slika 3. Jednadžba bilance vode na granici tlo – zrak prema Palmeru[6]

Palmerova metoda zasniva se na nekoliko pretpostavki. Da bi se mogla koristiti ova metoda potrebno je poznavati podatke o dnevnim količinama oborina, sadržaju vode u tlu i potencijalnoj evapotranspiraciji.
Postoje razne formule za proračunavanje potencijalne evapotranspiracije. Iz toga razloga, odabire se ona formula koja se može preračunati na osnovu poznatih podataka.

Prva pretpostavka je da se oborina koja dospije u tlo prvo troši na evapotranspiraciji. Zatim se popunjavaju zalihe vode u tlu procjeđivanjem, a višak oborine otječe. Upravo iz te pretpostavke dolazi do podcjenjivanja otjecanja u ljetnim mjesecima, jer se zbog velikih temperatura zalihe vode u tlu troše na evapotranspiraciju. Zbog velike evapotranspiracije ljeti, Palmer bi nam svojim proračunom mogao pokazati da u tom razdoblju nema otjecanja.
Preciznost metode raste s duljinom promatranog razdoblja, npr. nekoliko tjedana i više.

Druga pretpostavka je da u početku proračuna pretpostavimo da je kapacitet vode u tlu maksimalan (ako proračun započinje u zimskom razdoblju).
Sve komponente vodne ravnoteže izražavaju se u milimetrima.



Slika 4. Shematski prikaz komponenti vodne ravnoteže, pri čemu su: *P* oborina, *ET* stvarna evapotranspiracija, *RO* otjecanje, *R* procjeđivanje, *S* sadržaj vode u tlu, *L* gubitak vode iz tla, a indeksi *1* i *2* se odnose na plići (0-0.2 m) i dublji (0.2-1 m) sloj

2.1 POTENCIJALNA EVAPOTRANSPIRACIJA (ETp)

Potencijalna evapotranspiracija je maksimalna količina vodene pare koja bi mogla biti uklonjena evapotranspiracijom, a izražava se debljinom sloja vode. Drugim riječima, potencijalna evapotranspiracija je maksimalno moguća evapotranspiracija koja se može ostvariti u uvjetima dovoljne količine vlage.

Postoji više različitih empirijskih formula, međutim u ovom radu se na osnovu poznatih podataka koristi modificirana Eagleman-ova metoda :

$$\mathrm{ET_p} = \varphi \cdot C_t \cdot C_w \cdot e_{max} \cdot (100 - RH)^{1/2} \quad (2)$$

$$e_{max} = 6{,}1 \cdot \exp\left(\frac{17{,}1 \cdot T}{234{,}2 + T}\right) \quad (3)$$

e_{max} - srednji maksimalni tlak vodene pare (mbar)
$\mathrm{ET_p}$ - potencijalna evapotranspiracija (mm)
T - temperatura zraka (°C)
RH - srednja relativna vlažnost zraka (%)
C_t - koeficijent koji ovisi o srednjoj temperaturi zraka

$C_t = 0{,}63$ za $T < 0°C$
$C_t = 0{,}63 + 0{,}024T$ za $0 < T < 21°C$
$C_t = 1{,}13$ za $T > 21°C$

C_w - konstanta koja ovisi o brzini vjetra. [10]
φ - koeficijent korekcije za dnevni korak, uzima se kao 0,0329

2.2 STVARNA EVAPOTRANSPIRACIJA (ET)

Evapotranspiracija se pretpostavlja kao zbroj evaporacije (isparavanje vode s površine tla) i transpiracije (isparavanje vode s biljaka pri čemu se zanemaruje gubitak vode potreban za rast biljke). Stvarna evapotranspiracija može biti jednaka ili manja od potencijalne evapotranspiracije.

$$\mathrm{ET} = \begin{cases} \mathrm{ETp}, & \mathrm{P} - \mathrm{ETp} \geq 0 \\ \mathrm{P} + \mathrm{L}, & \mathrm{P} - \mathrm{ETp} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Iz priložene jednadžbe vidi se da je ETp = ET u situaciji kada je količina oborine veća ili jednaka od proračunate potencijalne evapotranspiracije.

2.3 PROCJEĐIVANJE I OTJECANJE (R i RO)

Procjeđivanje vode je postupak propuštanja vode kroz poroznu sredinu.
Otjecanje vode je odvodnja vode s površine tla.

Da bi došlo do procjeđivanja potrebno je ispuniti 2 uvjeta:

- količina oborine mora biti veća od potencijalne evapotranspiracije
- zalihe vode u tlu nisu popunjene

Da bi došlo do otjecanja potrebno je ispuniti 2 uvjeta:

- količina oborine mora biti veća od potencijalne evapotranspiracije
- tlo mora biti zasićeno vodom

$$R = \begin{cases} 0, & P - ETp \leq 0 \\ P - ETp, & 0 < P - ETp < S_{max} - S' \\ S_{max} - S', & P - ETp \geq S_{max} - S' \end{cases} \quad (5)$$

$$RO = \begin{cases} 0, & P - ETp \leq 0 \\ 0, & 0 < P - ETp < S_{max} - S' \\ P - ETp - R, & P - ETp \geq S_{max} - S' \end{cases} \quad (6)$$

S' - ukupni sadržaj vode u tlu na početku mjeseca
S_{max} - ukupni maksimalni sadržaj vode u tlu

2.4 SADRŽAJ VODE U TLU (S)

Potrebno je poznavati sadržaj vode u tlu samo na početku promatranog razdoblja za koji se vrši hidrološki proračun. Ostale vrijednosti se dobiju računski.
Pretpostavi se da je početni sadržaj vode u tlu jednak maksimalnom kapacitetu tla. To je moguće pretpostaviti u zimskom periodu, nakon dugotrajnih kiša.

Pretpostavka je da se sadržaj vode u tlu nalazi u 2 sloja. Površinski sloj koji se prvi puni oborinskom vodom i iz kojeg se voda prvo troši na evapotranspiraciju. Drugi ili potpovršinski sloj, za kojeg se pretpostavlja da se on puni oborinskom vodom tek kada je prvi sloj popunjen i prazni tek kada ispari sva voda iz prvog sloja.

Uzimajući u vidu da se u ovom radu promatra rijeka Žrnovnica koja se nalazi u kršu, onda se može pretpostaviti da nema površinskog sloja vode. ($S_1 = 0$)
U ovom radu $S_2 = 20$ (mm) iz čega slijedi, $S_{max} = 20$ (mm).
$S = S_1 + S_2 = S_2$
S_2 - potpovršinski sloj vode

$$\Delta S = \begin{cases} 0, & L = R = 0 \\ -L, & L > 0 \; i \; R = 0 \\ R, & L = 0 \text{ i } R > 0 \end{cases} \tag{7}$$

L - gubitak vode iz potpovršinskog sloja tla (mm)

2.5 GUBITAK VODE IZ TLA (L)

Da bi došlo do gubitka vode iz tla potrebno je ispuniti 2 uvjeta:

- stvarna evapotranspiracija mora biti veća od količine oborinske vode
- mora postojati vode u tlu

S obzirom da je promatrana rijeka krška onda se gubitak vode može odvijati samo iz drugog sloja. ($L_1 = 0$)

$L = L_1 + L_2 = L_2$ (8)
L_2 = gubitak vode iz drugog sloja tla (mm)

$$L = \begin{cases} (ETp - P) \cdot \frac{S'}{S_{max}}, & 0 < (ETp - P) \cdot \frac{S'}{S_{max}} \leq S' \\ 0, & (ETp - P) \cdot \frac{S'}{S_{max}} \leq 0 \\ S', & (ETp - P) \cdot \frac{S'}{S_{max}} \geq S' \end{cases} \tag{9}$$

2.6 REZULTATI PALMEROVE METODE

Podaci sa kojima se raspolagalo za izračun Palmera su:

1) izmjereni podaci o količini oborina na postaji Dugopolje za razdoblje 1995. -2014.

2) dnevna temperatura u °C za razdoblje 1995. - 2014.

3) dnevna relativna vlažnost za razdoblje 1995. - 2014.

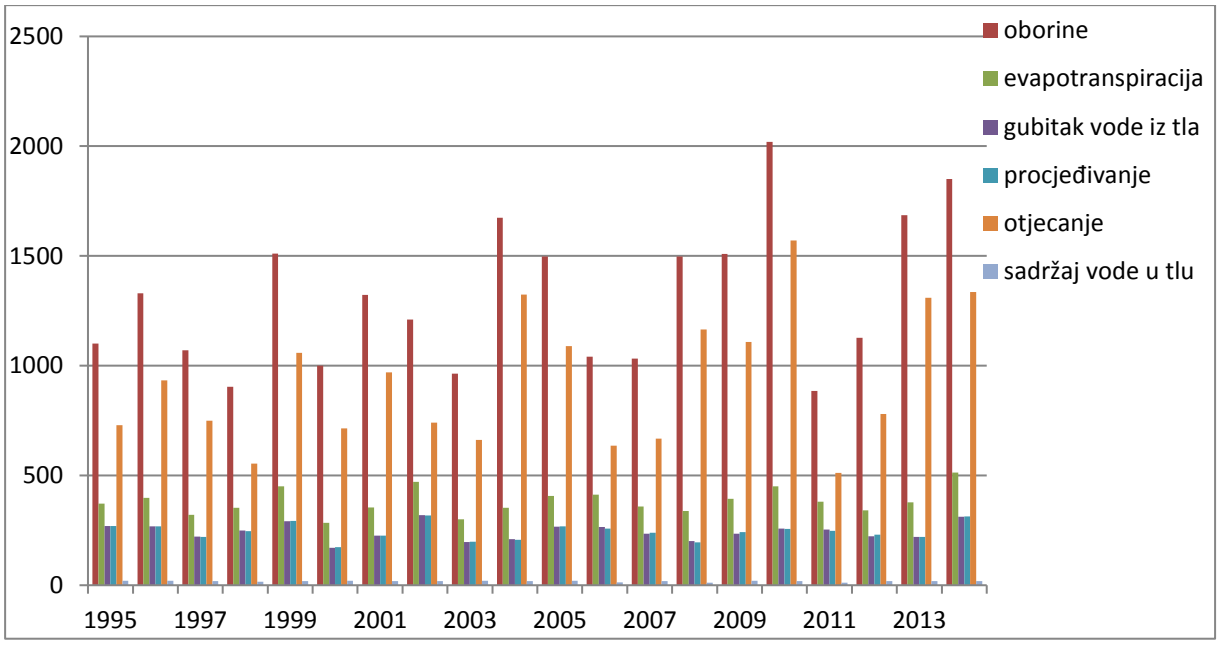
Korištenjem ovih vremenskih serija dobiju se rezultati prikazani na slici 5.
Cijeli postupak izračuna provodio se u programskom paketu Microsoft Office Excel 2007. Primjer proračuna je dat u tabelama 1. i 2.

Tablica 1. Izračun Palmerove metoda za jedan mjesec

Datum	Dugopolje P(mm)	T(°C)	RH	Zrnovnica	dan	Smax(mm)	emax(mbar)	Ct	Etp(mm)	L1(mm)	L2(mm)	L(mm)	R(mm)	RO(mm)	ET(mm)	ΔS1(mm)	ΔS2(mm)	S1(mm)	S2(mm)	S(mm)
1.1.1995	18,3	8,6	95	3,46	1	20	11,1783	0,8364	0,55	0,000	0,000	0,000	0,000	17,750	0,55	0,00	0,00	0	20	20,00
2.1.1995	26,6	1	92	4,66	2		6,5600	0,6540	0,32	0,000	0,000	0,000	0,000	26,281	0,32	0,00	0,00	0,00	20,00	20,00
3.1.1995	2,7	1,8	60	3,74	3	Cw	6,9498	0,6732	0,78	0,000	0,000	0,000	0,000	1,921	0,78	0,00	0,00	0,00	20,00	20,00
4.1.1995	0	1,4	49	3,05	4	0,8	6,7524	0,6636	0,84	0,000	0,842	0,842	0,000	0,000	0,84	0,00	0,00	0,00	20,00	20,00
5.1.1995	0	1	54	2,53	5		6,5600	0,6540	0,77	0,000	0,734	0,734	0,000	0,000	0,73	0,00	-0,84	0,00	19,16	19,16
6.1.1995	0	2,1	59	2,17	6	S1(mm)	7,1011	0,6804	0,81	0,000	0,750	0,750	0,000	0,000	0,75	0,00	-0,73	0,00	18,42	18,42
7.1.1995	0	0,9	61	1,95	7	0	6,5127	0,6516	0,70	0,000	0,616	0,616	0,000	0,000	0,62	0,00	-0,75	0,00	17,67	17,67
8.1.1995	0	0,3	62	1,63	8		6,2349	0,6372	0,64	0,000	0,550	0,550	0,000	0,000	0,55	0,00	-0,62	0,00	17,06	17,06
9.1.1995	0	-0,9	61	1,43	9	S2(mm)	5,7106	0,6300	0,59	0,000	0,488	0,488	0,000	0,000	0,49	0,00	-0,55	0,00	16,51	16,51
10.1.1995	0	-2,6	71	1,33	10	20	5,0345	0,6300	0,45	0,000	0,360	0,360	0,000	0,000	0,36	0,00	-0,49	0,00	16,02	16,02
11.1.1995	0	-0,4	91	1,28	11		5,9241	0,6300	0,29	0,000	0,231	0,231	0,000	0,000	0,23	0,00	-0,36	0,00	15,66	15,66
12.1.1995	3,2	0,6	60	1,18	12	Φ	6,3725	0,6444	0,68	0,000	0,000	0,000	2,516	0,000	0,68	0,00	-0,23	0,00	15,43	15,43
13.1.1995	0	0,6	54	1,09	13	0,0329	6,3725	0,6444	0,73	0,000	0,658	0,658	0,000	0,000	0,66	0,00	2,52	0,00	17,95	17,95
14.1.1995	0	0,2	47	1,01	14		6,1897	0,6348	0,75	0,000	0,651	0,651	0,000	0,000	0,65	0,00	-0,66	0,00	17,29	17,29
15.1.1995	0	2	44	0,965	15		7,0504	0,6780	0,94	0,000	0,783	0,783	0,000	0,000	0,78	0,00	-0,65	0,00	16,64	16,64
16.1.1995	0	2,4	49	0,924	16	827,74	7,2554	0,6876	0,94	0,000	0,743	0,743	0,000	0,000	0,74	0,00	-0,78	0,00	15,85	15,85
17.1.1995	0	-1	62	0,924	17		5,6687	0,6300	0,58	0,000	0,438	0,438	0,000	0,000	0,44	0,00	-0,74	0,00	15,11	15,11
18.1.1995	0	0,4	66	0,884	18		6,2805	0,6396	0,62	0,000	0,452	0,452	0,000	0,000	0,45	0,00	-0,44	0,00	14,67	14,67
19.1.1995	0	4,8	95	0,884	19		8,5996	0,7452	0,38	0,000	0,268	0,268	0,000	0,000	0,27	0,00	-0,45	0,00	14,22	14,22
20.1.1995	8,8	3,6	81	0,924	20		7,9024	0,7164	0,65	0,000	0,000	0,000	6,048	2,103	0,65	0,00	-0,27	0,00	13,95	13,95
21.1.1995	0	4,2	88	0,924	21		8,2445	0,7308	0,55	0,000	0,549	0,549	0,000	0,000	0,55	0,00	6,05	0,00	20,00	20,00
22.1.1995	0	6,9	89	0,924	22		9,9510	0,7956	0,69	0,000	0,672	0,672	0,000	0,000	0,67	0,00	-0,55	0,00	19,45	19,45
23.1.1995	0	9,5	74	0,965	23		11,8804	0,8580	1,37	0,000	1,284	1,284	0,000	0,000	1,28	0,00	-0,67	0,00	18,78	18,78
24.1.1995	5,7	5,8	76	1,23	24		9,2215	0,7692	0,91	0,000	0,000	0,000	2,506	2,279	0,91	0,00	-1,28	0,00	17,49	17,49
25.1.1995	3,2	5,7	84	2,06	25		9,1576	0,7668	0,74	0,000	0,000	0,000	0,000	2,461	0,74	0,00	2,51	0,00	20,00	20,00
26.1.1995	0	10,8	74	1,95	26		12,9628	0,8892	1,55	0,000	1,547	1,547	0,000	0,000	1,55	0,00	0,00	0,00	20,00	20,00
27.1.1995	12,6	5,2	75	2,06	27		8,8438	0,7548	0,88	0,000	0,000	0,000	1,547	10,175	0,88	0,00	-1,55	0,00	18,45	18,45
28.1.1995	10	3,7	77	2,53	28		7,9585	0,7188	0,72	0,000	0,000	0,000	0,000	9,278	0,72	0,00	1,55	0,00	20,00	20,00
29.1.1995	0	5	94	3,89	29		8,7210	0,7500	0,42	0,000	0,422	0,422	0,000	0,000	0,42	0,00	0,00	0,00	20,00	20,00
30.1.1995	0	6,4	94	4,34	30		9,6133	0,7836	0,49	0,000	0,475	0,475	0,000	0,000	0,48	0,00	-0,42	0,00	19,58	19,58
31.1.1995	0	5,5	57	3,74	31		9,0309	0,7620	1,19	0,000	1,134	1,134	0,000	0,000	1,13	0,00	-0,48	0,00	19,10	19,10

Tablica 2. Prikaz uvjeta ravnoteže i koeficijenata otjecanja za razdoblje 1995.-2014.

	P(mm)	ET(mm)	L(mm)	R(mm)	RO(mm)	S(mm)	P+L =	ET+R+RO	C
1995	1101	372	269	269	729	20	1370	1370	0,66
1996	1330	397	269	269	933	20	1599	1599	0,70
1997	1070	321	221	220	749	20	1291	1291	0,70
1998	904	353	249	246	554	16	1153	1153	0,61
1999	1511	450	291	293	1059	19	1802	1802	0,70
2000	1000	284	171	173	714	20	1171	1171	0,71
2001	1323	354	225	225	969	19	1548	1548	0,73
2002	1210	471	319	317	740	19	1529	1529	0,61
2003	963	300	197	198	662	20	1160	1160	0,69
2004	1675	352	209	208	1324	19	1884	1884	0,79
2005	1497	406	266	268	1089	20	1763	1763	0,73
2006	1041	412	265	258	636	13	1306	1306	0,61
2007	1032	359	234	239	668	18	1266	1266	0,65
2008	1498	339	202	195	1166	11	1699	1699	0,78
2009	1510	394	234	242	1108	20	1743	1743	0,73
2010	2020	451	258	257	1570	19	2278	2278	0,78
2011	885	380	254	248	512	12	1139	1139	0,58
2012	1127	340	224	231	780	19	1351	1351	0,69
2013	1686	377	220	220	1309	19	1906	1906	0,78
2014	1850	513	312	313	1336	20	2162	2162	0,72
									0,70



Slika 5. Prikaz Palmer-ovih komponenata bilance vode u milimetrima za svaku godinu

Proračun metodom Palmera bilo je potrebno izvršiti kako bi se dobila efektivna oborina RO (količina oborine koja je otekla u milimetrima) koja će poslužiti kao ulazna veličina u modeliranju otjecanja.

3. MODELIRANJE OTJECANJA

3.1 KORACI IZRAČUNA

Model otjecanja se temelji na parametarskoj transfer funkciji:

$$u(t) = \frac{\Theta}{k_1} \cdot e^{\frac{-t}{k_1}} + \frac{1-\Theta}{k_2} \cdot e^{\frac{-t}{k_2}}$$

gdje se nepoznati parametri Θ, k_1 i k_2 određuju na osnovu podataka o protoku vode na izvoru Žrnovnice, te oborina na postaji Dugopolje za razdoblje 1995.-2014.

Analizi recesijskog dijela hidrograma pristupa se kako bi se odredio recesijski koeficijent (α) uz pomoću kojeg se izračun parametar k_1 koji nam je potreban kao ulazna veličina u modeliranju otjecanja.

$k_1 = 1 / \alpha$ (10)

U ovom radu potrebno je izvršiti separaciju hidrograma kako bi se dobila vrijednost parametra Θ koji pokazuje koliki je udio baznog otjecanja u ukupnom otjecanju.
Nakon što su se odredili parametri Θ i k_1 preostaje još odrediti parametar k_2.

Parametar k_2 pripada komponenti direktnog otjecanja i ima najveći utjecaj na vrhove hidrograma. Pomoću postupaka kalibracije i verifikacije pronaći će se najbolja vrijednost k_2.
Efektivna oborina pomnožena sa jediničnim hidrogramom rezultirat će hidrogramom otjecanja.

$$Q_k = \sum_{j=1}^{n} u_{k-j+1} \cdot P_j \quad (11)$$
$$k = 1, 2, 3, \ldots, (n+m-1)$$

P_j - visina efektivne oborine u trenutku j (mm)
u_k - ordinata jediničnog hidrograma ($m^3s^{-1}mm^{-1}$)
k - redni broj ordinate složenog hidrograma direktnog otjecanja
n - broj blokova na koji je podijeljen hijetogram efektivne kiše
m - broj ordinata (većih od nule)
Q_k - ordinata ukupnog hidrograma (m^3/s)

Konkretno u ovom zadatku, efektivna oborina (RO) je izračunata putem Palmer-ove metode i ona će poslužiti za konstrukciju hidrograma otjecanja.

Princip superpozicije i konstrukcije hidrograma prikazan je na primjeru jednomjesečnih efektivnih oborina.
Da bi se odredio protok u trenutnoj godini koji je posljedica oborina palih u prethodnoj godini koristit će se Maillet-ov izraz :

$$Q_k = Q_0 \cdot \exp^{(-\alpha \cdot k)} \quad (12)$$

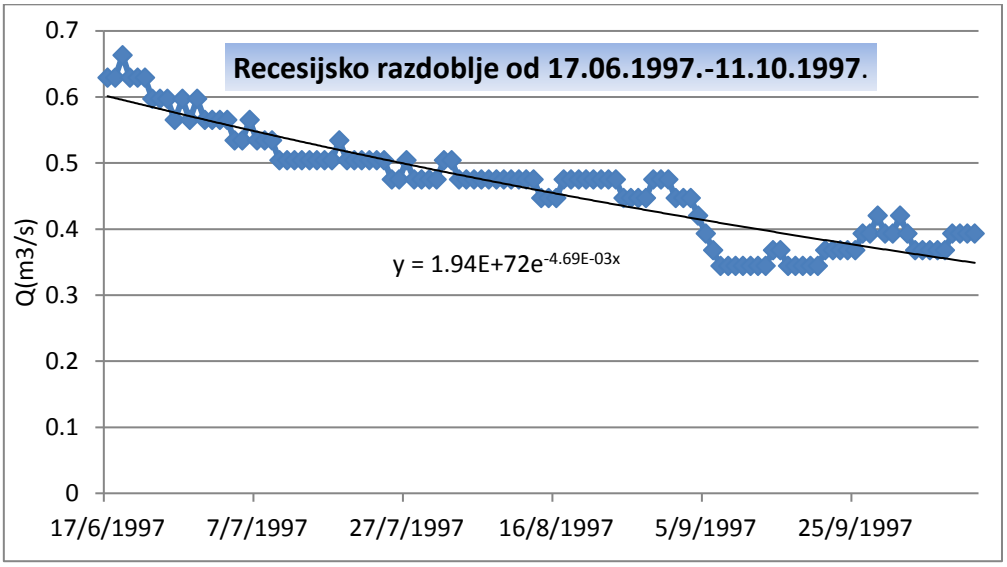
Q_0 - početno otjecanje (m^3/s)
Q_k - ordinata ukupnog hidrograma (m^3/s)
α - recesijski koeficijent

Prema tome može se zaključiti da ako u nekom trenutku k postoji neka izdašnost Q_k onda će zakon njenoga opadanja u funkciji vremena ostati isti ako se ne promijeni karakter izvora i hidrogeološka svojstva.

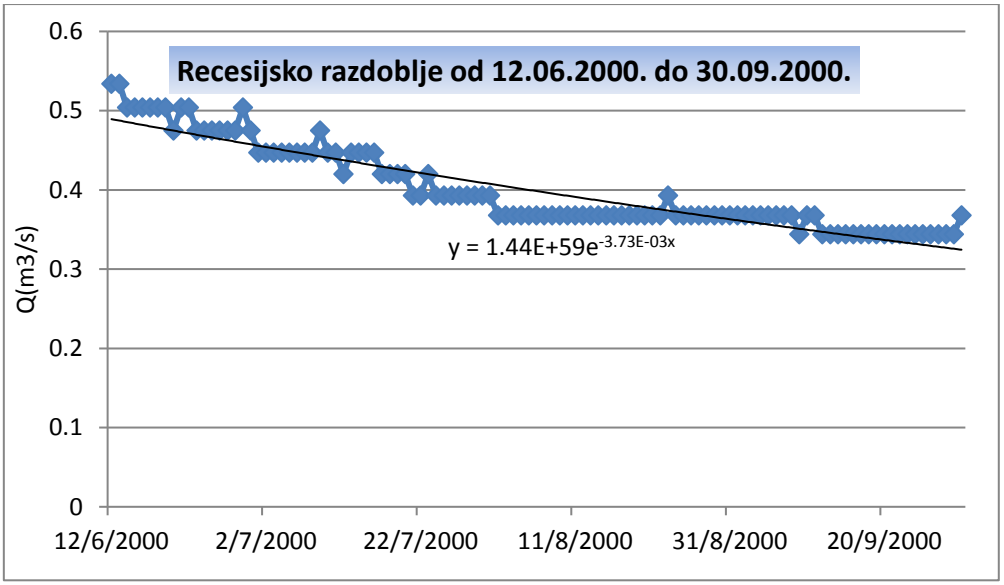
3.2 KRIVULJA RECESIJE

U hidrogeološkim istraživanjima posebna pozornost posvećuje se recesijskom dijelu krivulje, jer njegov oblik snažno ovisi o hidrogeološkim značajkama vodonosnoga sustava, a njegova matematička identifikacija omogućuje prognozu opadanja izdašnosti u sušnome razdoblju.
U vrijeme izostanka padalina, rijeke se napajaju podzemnim vodama i predočavaju one zalihe koje su uskladištene u hidrološkom bazenu, vodonosniku ili hidrogeološkoj strukturi tijekom prethodnog kišnog razdoblja.
Do ideje o načinu povezivanja hidrograma s prethodnim padalinama došao je francuski fizičar Edmond Maillet 1903. godine.
Krivulja recesije se konstruira nanoseći vrijeme u danima na apscisu i odgovarajuće srednje dnevne količine u m^3/s na ordinatu. Njen oblik u beskišnom razdoblju posljedica je procesa odvodnjavanja vodonosnika.

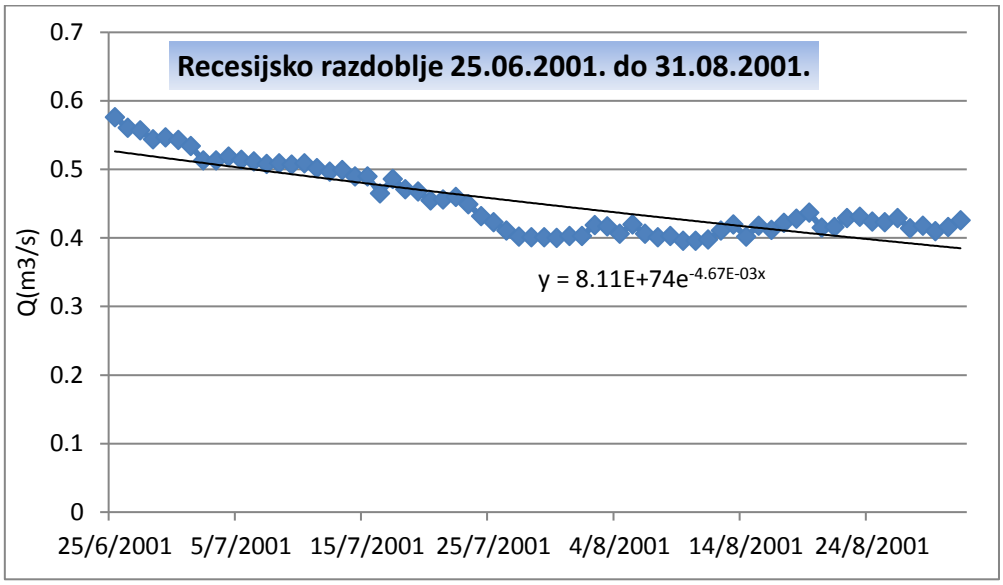
Prvi korak određivanju recesijskog koeficijenata je odabir nekoliko vremenskih perioda koja su okarakterizirana nedostatkom oborina i opadanjem hidrograma otjecanja. Za koeficijent recesije prema Mailletu odabrane su godine: 1997, 2000, 2001, 2003 i 2008. Sljedeći korak je grafički prikaz odabranih vremenskih perioda. Na osi ordinata nalazi se protok u m^3/s, a na osi apscisa datum kada je opažen taj protok.



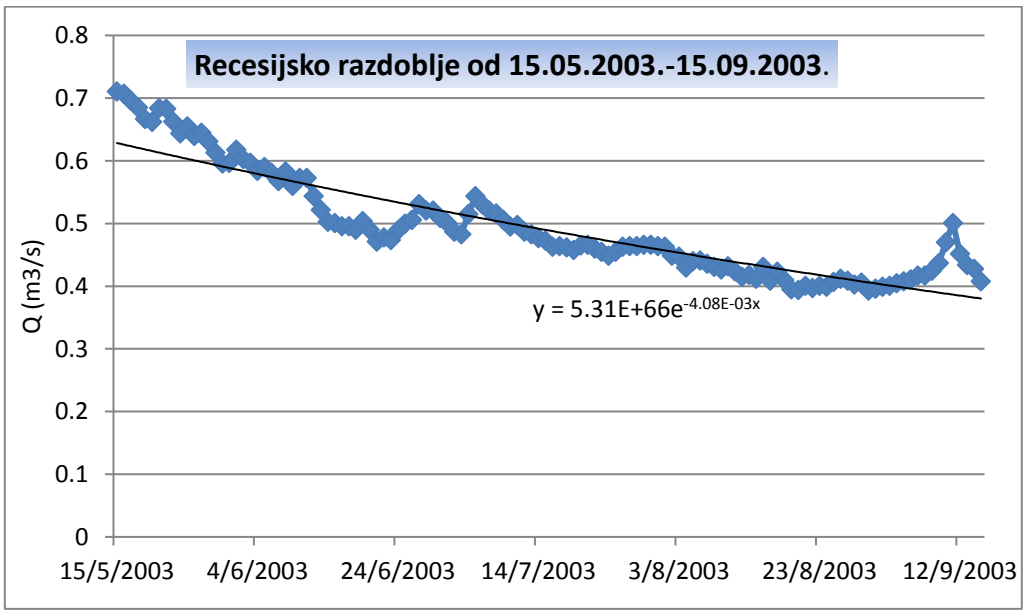
Slika 6. Recesijsko razdoblje za 1997. godinu



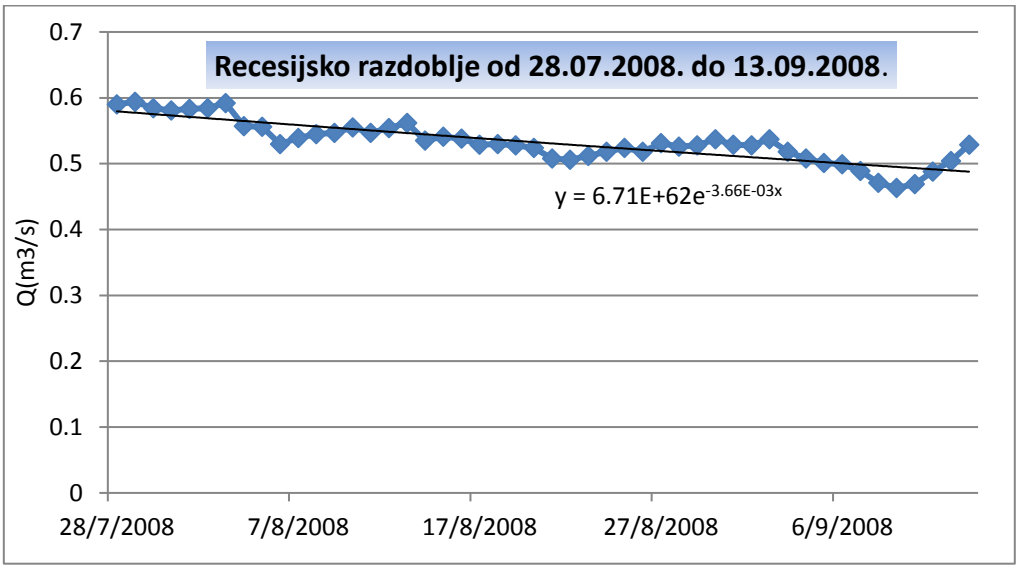
Slika 7. Recesijsko razdoblje za 2000. godinu



Slika 8. Recesijsko razdoblje za 2001. godinu



Slika 9. Recesijsko razdoblje za 2003. godinu



Slika 10. Recesijsko razdoblje za 2008. godinu

Treći korak je podatke prikazane ne grafu aproksimirati eksponencijalnom jednadžbom kako bi se mogao očitati recesijski koeficijent za svaki odabrani period.
Sa slika se očitava:

α_{1997} = 0,0047 (dan^{-1})
α_{2000} = 0,0037 (dan^{-1})
α_{2001} = 0,0047 (dan^{-1})
α_{2003} = 0,0041 (dan^{-1})
α_{2008} = 0,0037 (dan^{-1})

Srednja vrijednost očitanih koeficijenata usvaja se kao koeficijent recesije.
α = 0,004166 (dan^{-1})

Iz ovoga se dobiva parametar k_1 sa kojim se ulazi u modeliranje.

$k_1 = 1 / \alpha = 1 / 0{,}004166$ dan^{-1}
k_1 = 240,0384 (dan)

3.3 SEPARACIJA HIDROGRAMA OTJECANJA

Hidrogram je grafički prikaz protoka vode u vremenu te se sastoji od direktnog i baznog otjecanja. Kod hidrograma krških izvora direktno otjecanje predstavlja brzu komponentu otjecanja koja se odvija kroz podzemne kanale dok bazno otjecanje predstavlja sporu komponentu otjecanja koja nastaje pražnjenjem vode iz sitnih šupljina koje se nalaze unutar krškog masiva kao što su npr. međuzrnate šupljine, prsline, pukotine, itd.
Ukoliko su oborine u obliku pljuskova velikog intenziteta, hidrogrami će biti oštriji sa kraćom vremenskom bazom. Međutim, oblik hidrogram otjecanja ovisi i o brojnim drugim čimbenicima, kao što su: poroznost, položaj razine podzemne vode, zasićenost zona iznad izvora, dotok iz drugih izvora itd. Bitno je naglasiti da je s inženjerskog gledišta, bazni tok "bitniji" s obzirom da su izvori koji služe za vodoopsrkrbu većinom prihranjivani njime. Ipak, s druge strane, ne smije se zanemariti i važnost direktnog otjecanja i istraživanja istog, zbog obrane od poplava, budući da nagle poplave u kršu vrlo često znaju biti uzrok velikih problema.

Prvi korak je konstruiranje stvarnog hidrograma iz mjerenja kojima se raspolaže.
Zbog jednostavnosti separacije, odabire se dvogodišnji period 1995.-1996. i time se usvaja pogreška koja je prihvatljiva jer neće imati značajniji utjecaj na rezultat.

Nakon podjele otjecanja na bazno i direktno (Slika 11) određuje se njihov volumen koji predstavlja površinu ispod grafa. Aproksimacijom rezultata dobiva se da je odnos baznog volumena i ukupnog volumena 0,29 / 1.
Iz toga se dobiva vrijednost parametra Θ.

Θ = 0,29 i predstavlja udio baznog u ukupnom otjecanju
1-Θ = 0,71 i predstavlja udio direktnog u ukupnom otjecanju



Slika 11. Podjela otjecanja na bazno i direktno za razdoblje 1995.-1996.

4. POSTUPAK KALIBRACIJE MODELA

4.1 UVOD U KALIBRACIJU

Kalibracija modela podrazumijeva usklađivanje rezultata modela sa mjerenim vrijednostima podešavanjem parametara modela.

Svrha ovog rada je izraditi model koji će nam opisati buduća otjecanja na rijeci Žrnovnici.
Taj model bi bio alat za prognoziranje otjecanja koja se još nisu dogodila.
Potrebno je odabrati kalibracijske godine koje će najbolje aproksimirati simulirano otjecanje sa stvarnim izmjerenim podacima. Nakon odabira kalibracijskih godina, vrši se verifikacija, odnosno provjera kako se parametri koji su odabrani na temelju kalibracijskog razdoblja ponašaju u odnosu na ostala razdoblja.

Općenito, kalibracija se provodi u nekoliko koraka:
1) definirati način na koji će se upotrebljavati rezultati modela
2) procijeniti koji su parametri modela najutjecajniji za rezultate od interesa i za njih odrediti interval unutar kojeg se mogu nalaziti
3) mjerenjima prikupiti podatke za potrebu kalibracije
4) definirati način uspoređivanja izračunatih i mjerenih veličina
5) izračunati rezultate modela na osnovu početnih vrijednosti parametara (pretpostaviti parametre temeljem iskustva ili informacija)
6) grubo podesiti parametre modela
7) provesti analizu osjetljivosti
8) podesiti parametre modela u fino, posebno one parametre na koje je model najosjetljiviji

4.2 KORACI IZRAČUNA I ODREĐIVANJE POGREŠKE

Prvi korak je odabrati nekoliko vremenskih razdoblja na kojima će se vršiti kalibracija modela. Odabrane su godine: 1995, 1996, 2001, 2005, 2010, 2012 i 2013.
U drugom koraku ugrubo se pretpostavlja jedini parametar koji je ostao za odrediti, k_2.
Nakon grube pretpostavke odabiru se godine koje metodom najmanjih kvadrata rade najmanju pogrešku simuliranog od stvarnog otjecanja.

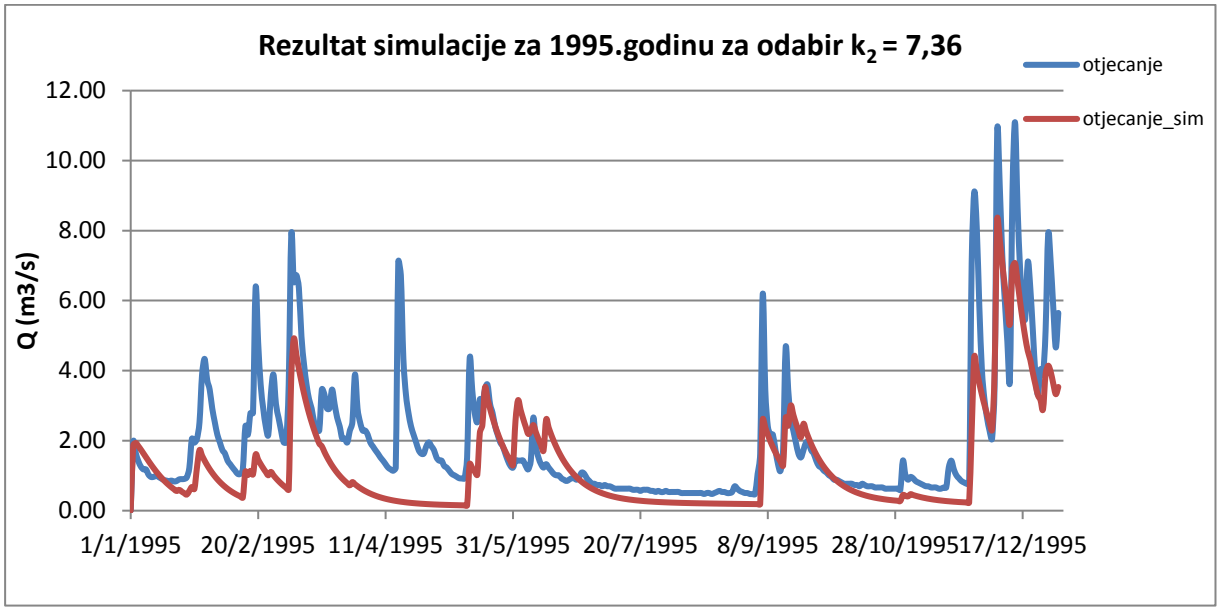
Metoda najmanjih kvadrata provodi se na način da se za svaki dan u godini promatra kvadrat odstupanja simulirane od stvarne vrijednosti otjecanja. Sumiraju se sve vrijednosti kvadrata odstupanja, a one godine koje nam daju najmanju sumu (odnosno pogrešku) odabiru se kao kalibracijske godine.

$$(Q_{1_sim} - Q_1)^2 = \Delta e_1$$
$$(Q_{2_sim} - Q_2)^2 = \Delta e_2$$
$$(Q_{3_sim} - Q_3)^2 = \Delta e_3$$
$$\vdots$$
$$(Q_{n_sim} - Q_n)^2 = \Delta e_n$$

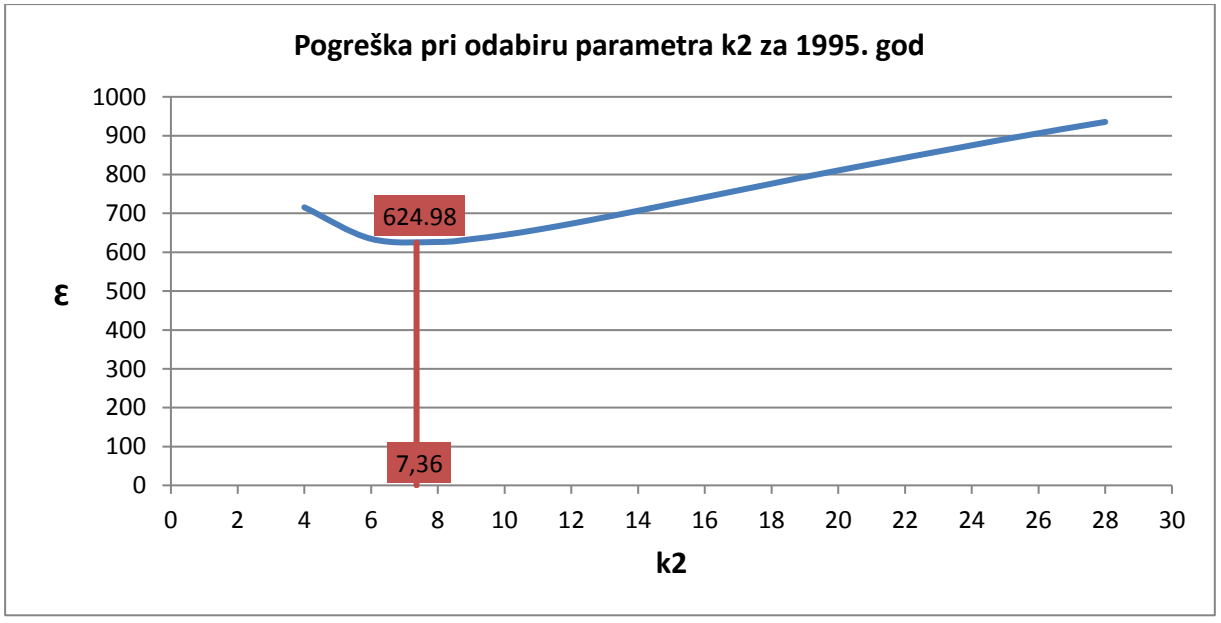
$$\sum_{i=365}^{n} (Q_{i_sim} - Q_i)^2 = \sum_{i=365}^{n} \Delta e_1 = \varepsilon \qquad (13)$$

Q_{n_min} = simulirano otjecanje u n-tom danu
Q_n = stvarno otjecanje u n-tom danu
ε = pogreška u modeliranju na godišnjoj bazi

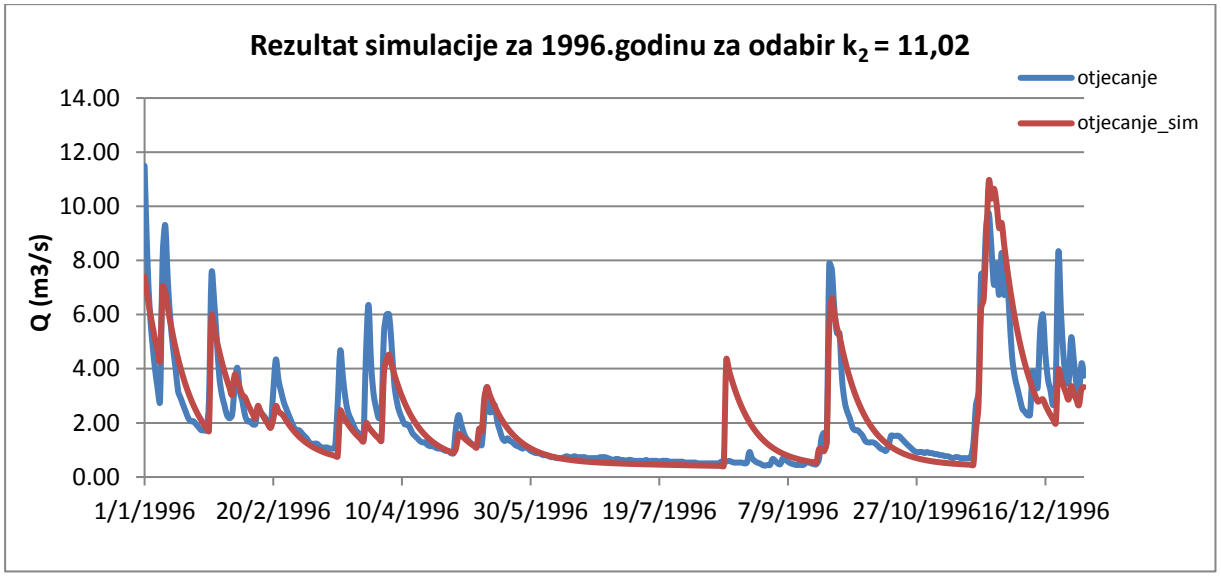
Na sljedećim slikama prikazani su grafovi pogrešaka ovisno o odabiru parametra k_2 za svaku promatranu godinu. Također, naznačene su i vrijednosti k_2 koji daju minimalnu pogrešku za korištenje ovog modela.



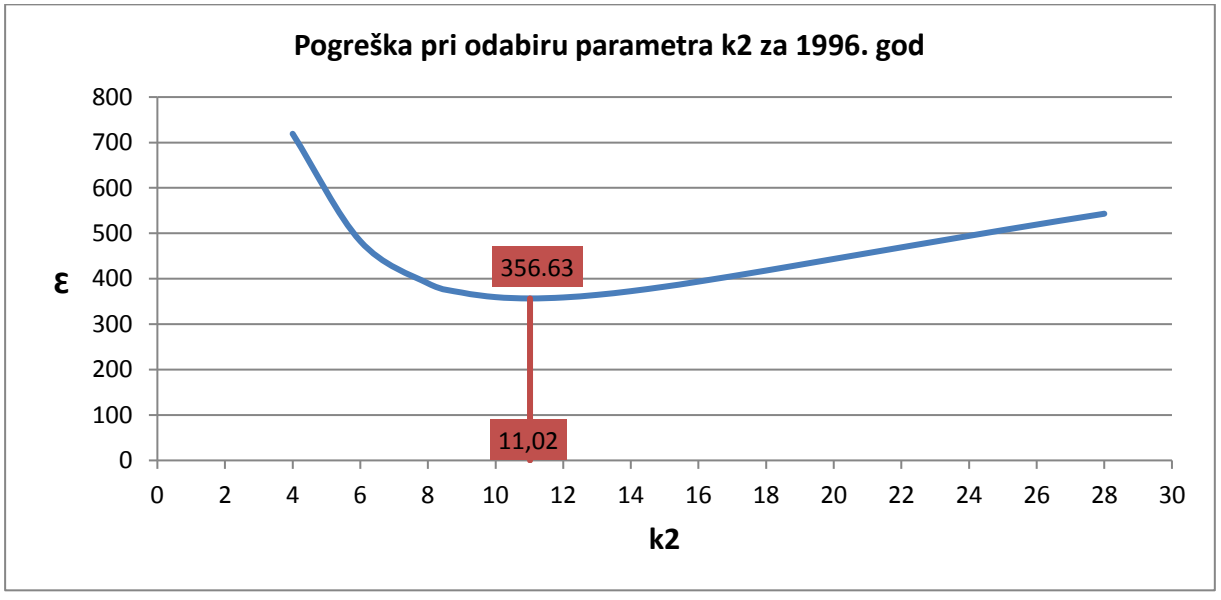
Slika 12(a). Rezultat simulacije za 1995.godinu za odabir $k_2 = 7,36$



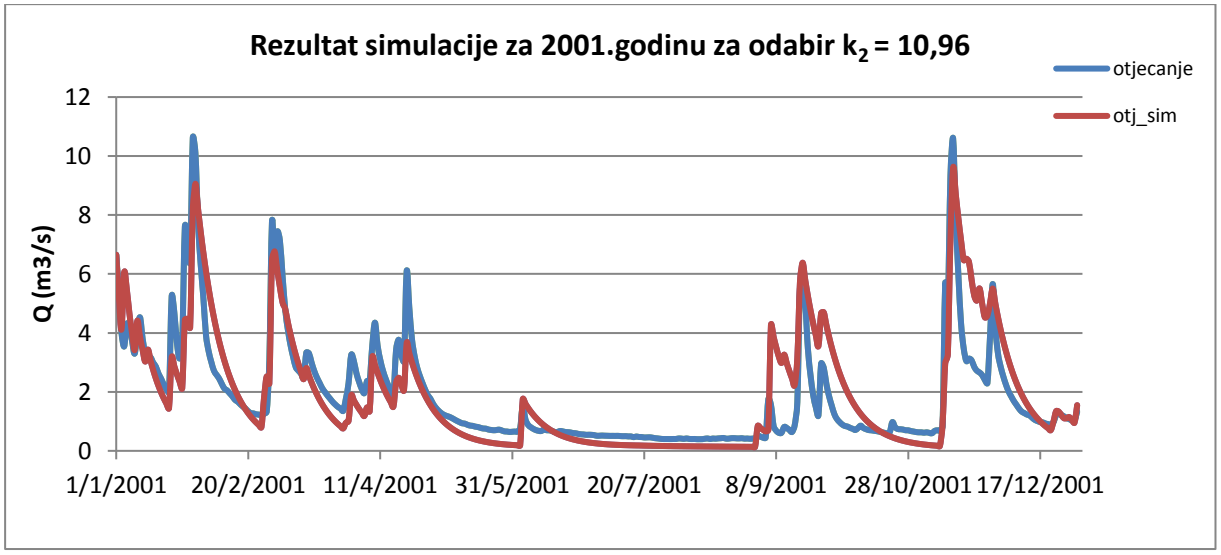
Slika 12(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 1995. godinu



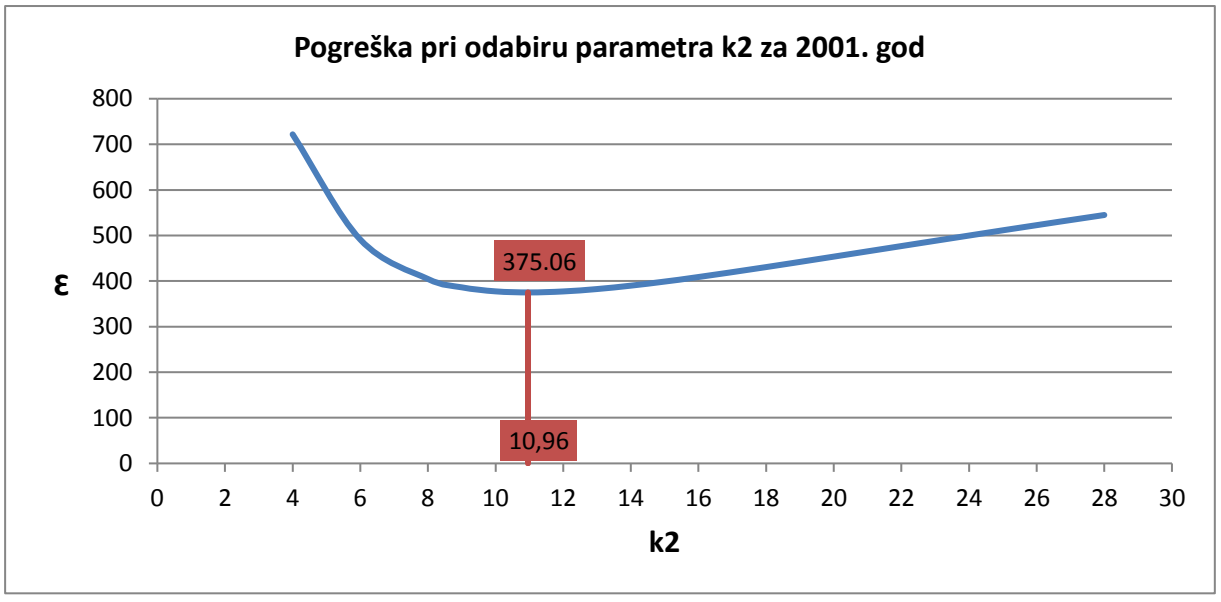
Slika 13(a). Rezultat simulacije za 1996.godinu za odabir $k_2 = 11,02$



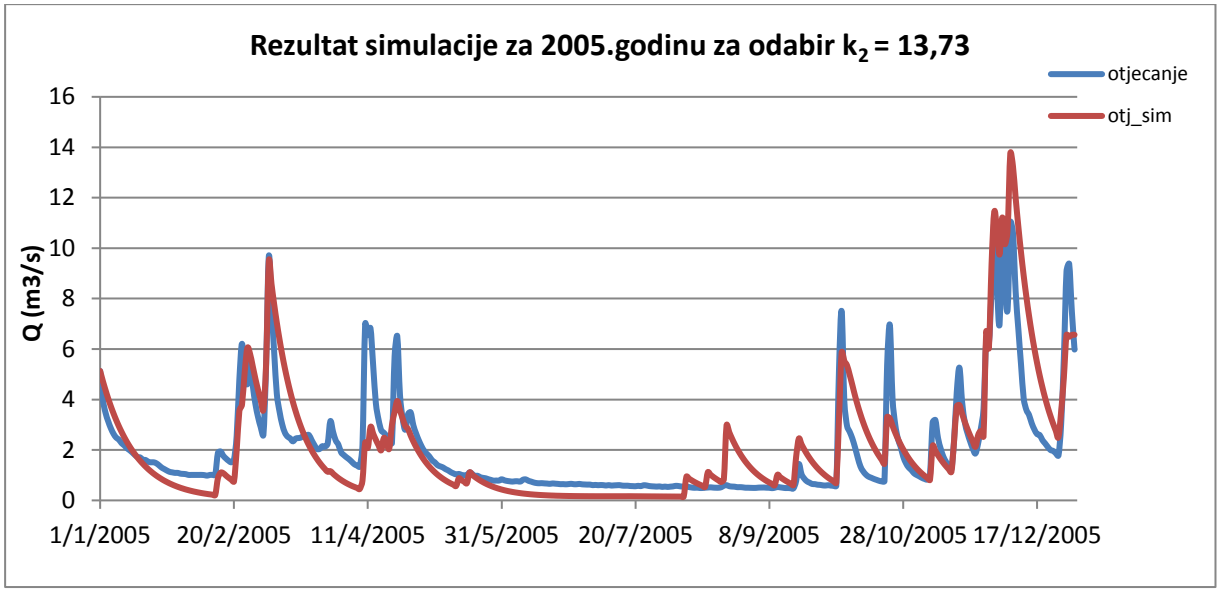
Slika 13(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 1996. godinu



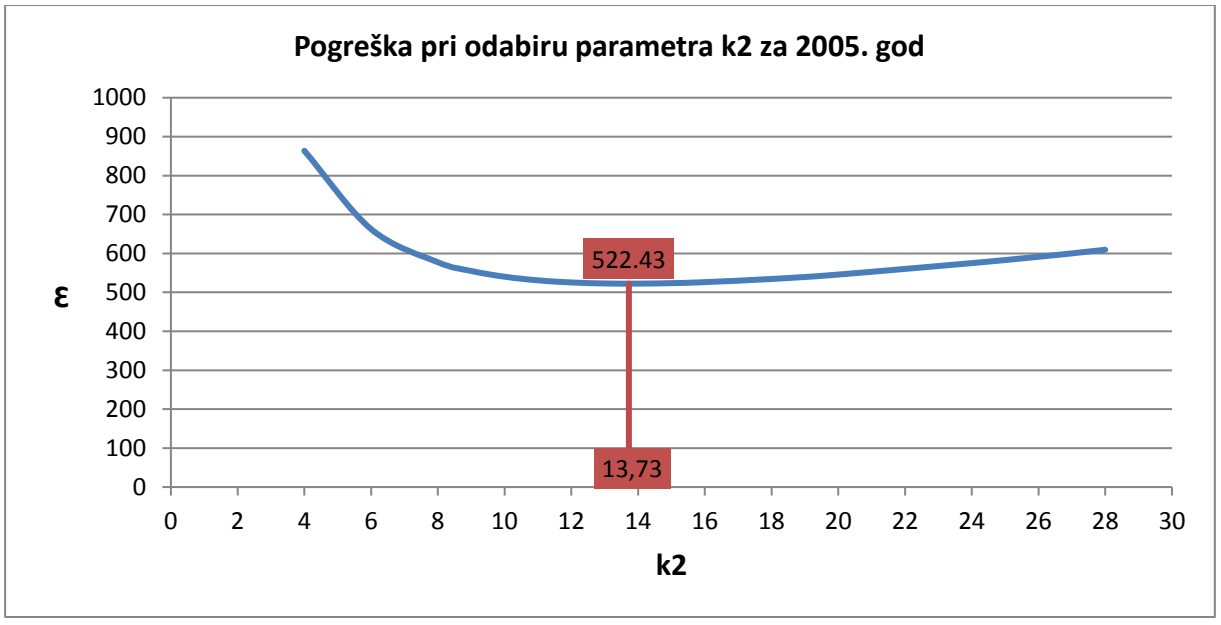
Slika 14(a). Rezultat simulacije za 2001.godinu za odabir $k_2 = 10,96$



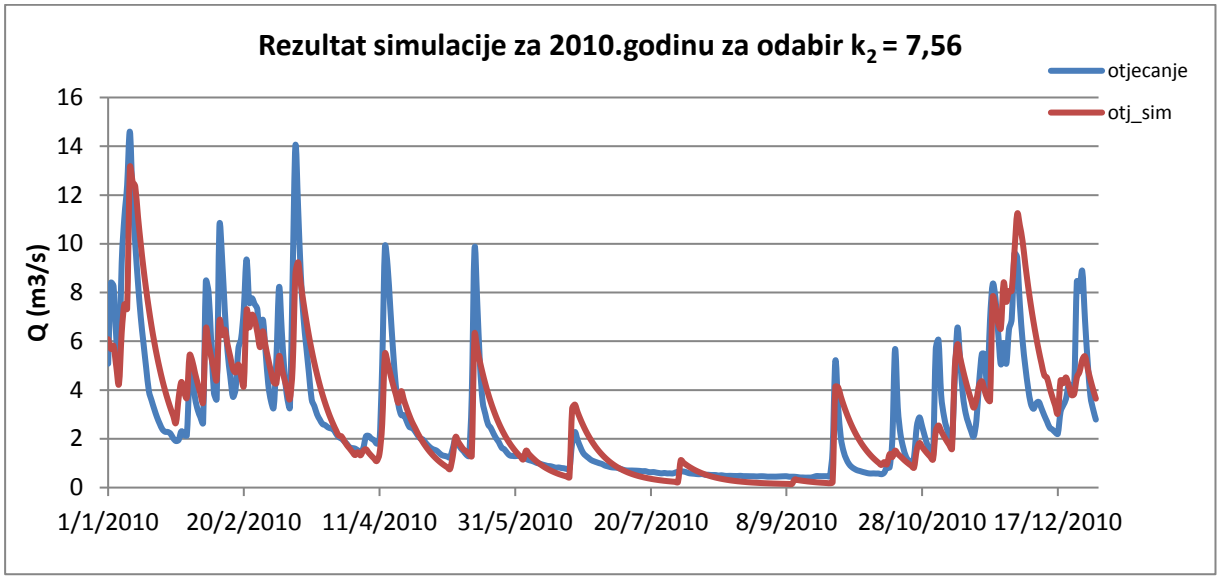
Slika 14(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 2001. godinu



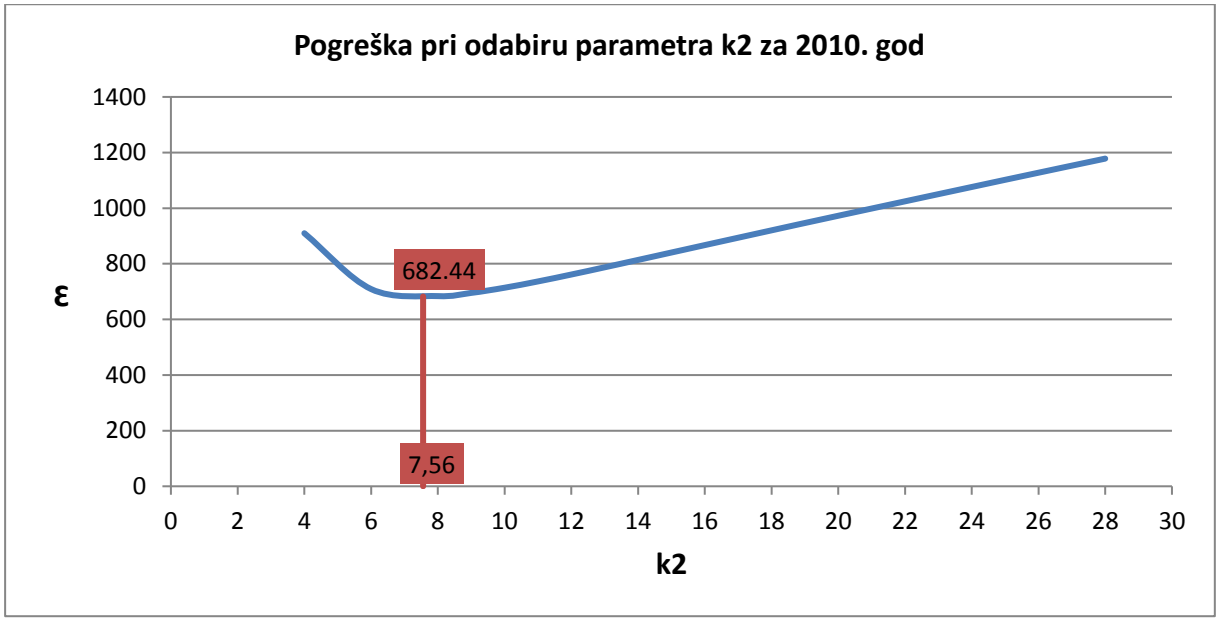
Slika 15(a). Rezultat simulacije za 2005.godinu za odabir $k_2 = 13,73$



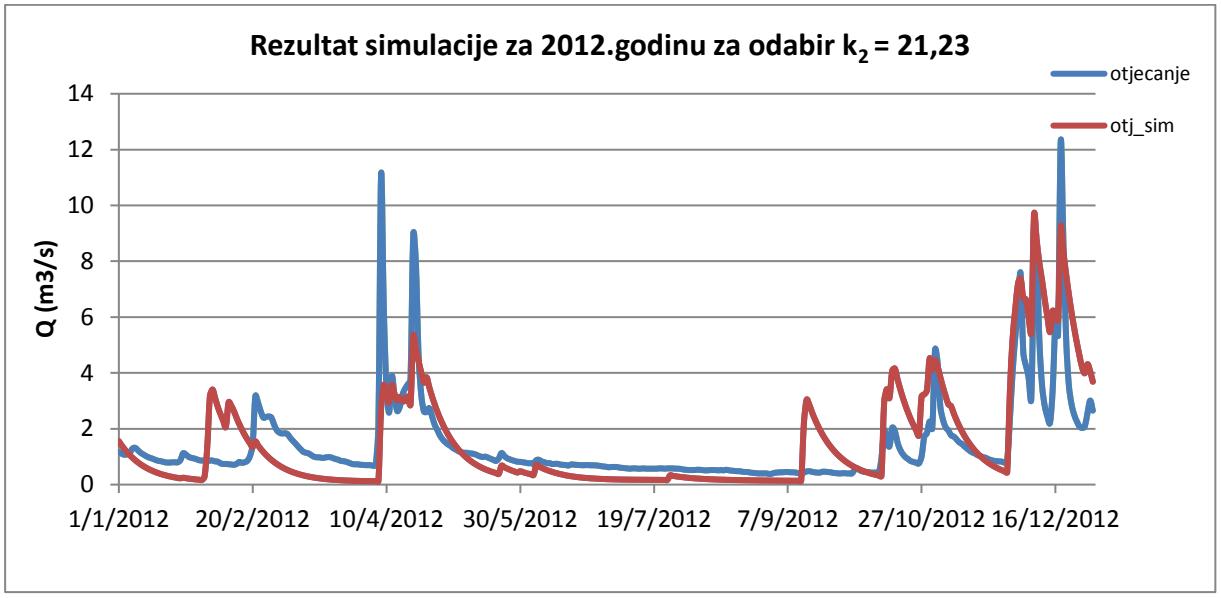
Slika 15(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 2005. godinu



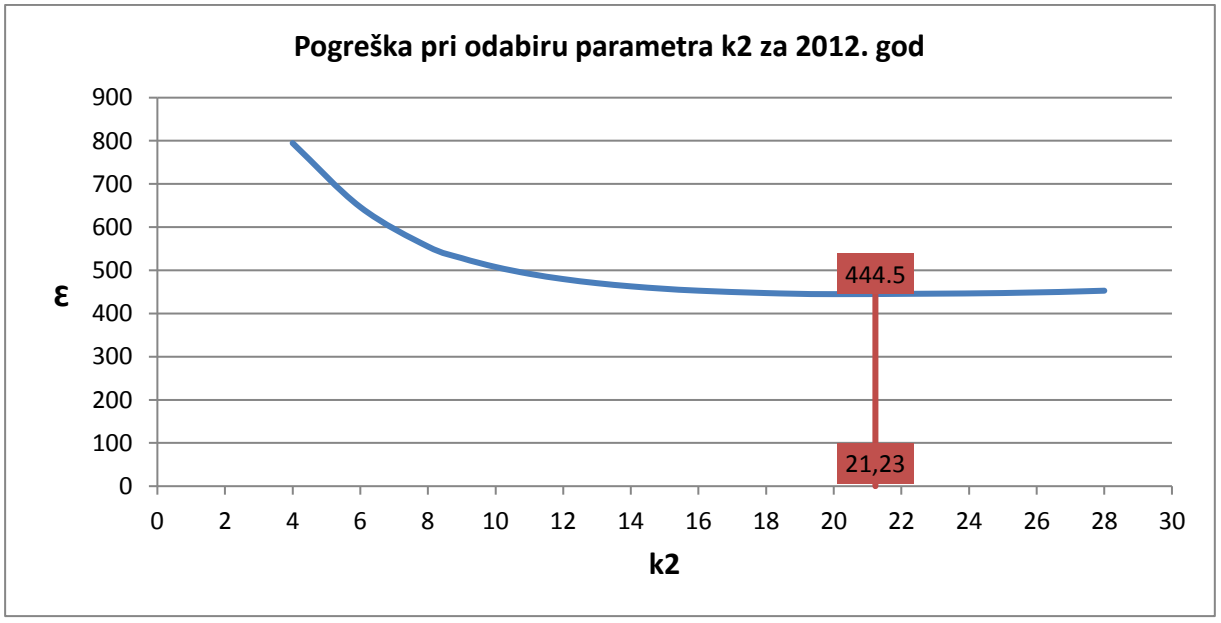
Slika 16(a). Rezultat simulacije za 2010.godinu za odabir $k_2 = 7,56$



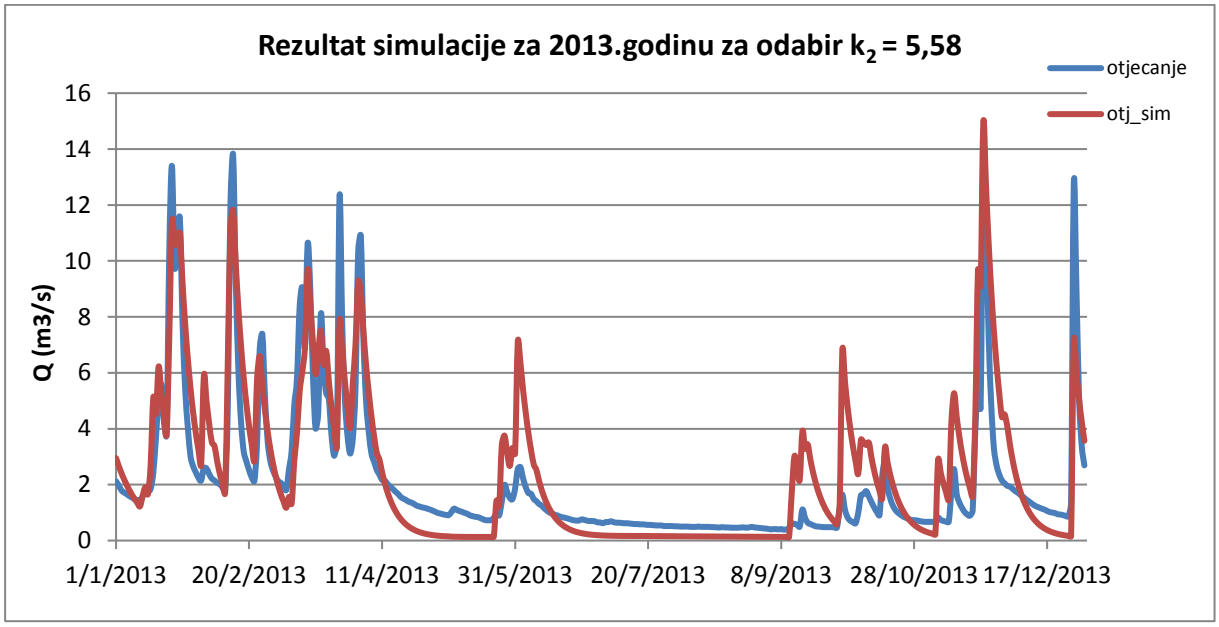
Slika 16(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 2010. godinu



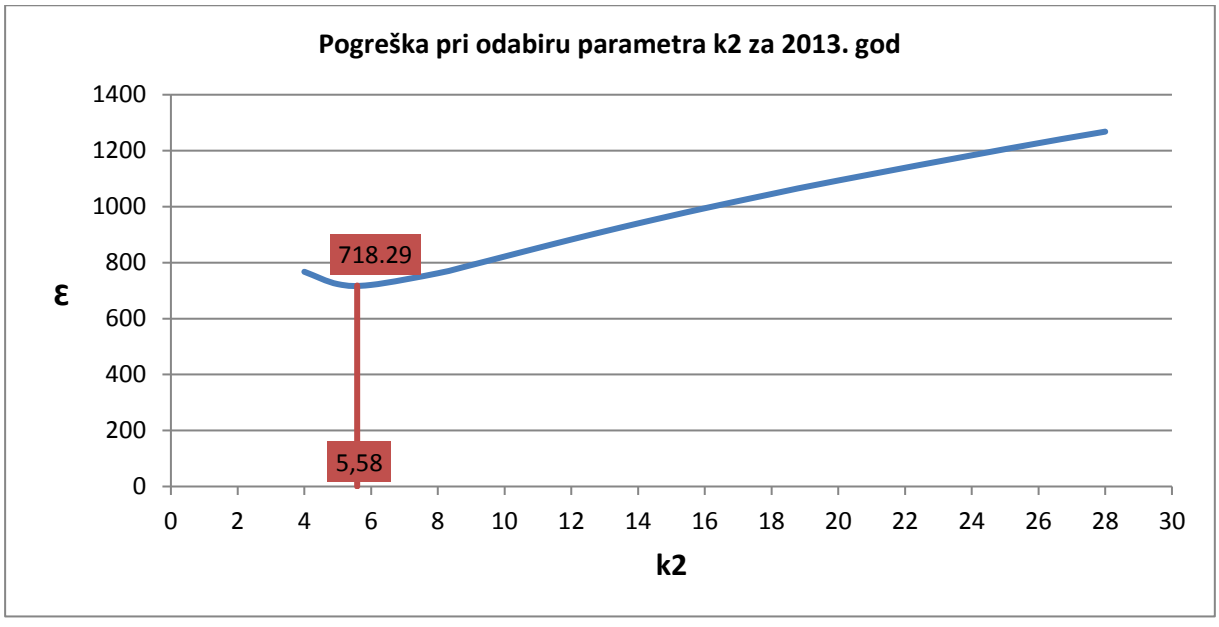
Slika 17(a). Rezultat simulacije za 2012.godinu za odabir $k_2 = 21,23$



Slika 17(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 2012. godinu

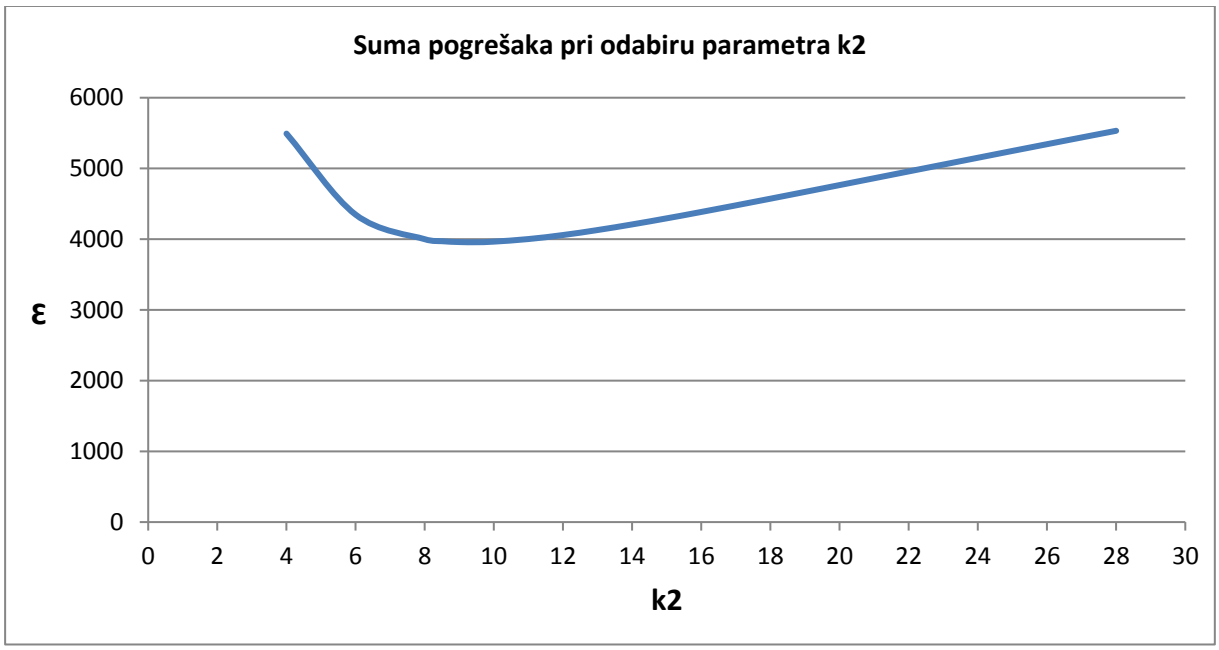


Slika 18(a). Rezultat simulacije za 2013.godinu za odabir $k_2 = 5,58$



Slika 18(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 2013. godinu

Slijedeći korak je pronalaženje prikladnog koeficijenta k_2. Sve pogreške sa prethodnih slika (ovisne o odabiru k_2) sumirane su i prikazane na slici 19. Sa slike je vidljivo da se najmanja pogreška javlja na intervalu $k_2 \in [9,10]$. Bilo koji broj odabran unutar tog intervala radit će zanemarivu pogrešku s obzirom na neki drugi broj unutar istog intervala. Iz tog razloga odabire se k_2 koji, vizualno, najbolje opisuje stvarni hidrogram otjecanja.
Za kalibracijske godine najmanja pogreška se radi za $k_2 = 10$. Time je odabran i posljednji parametar za modeliranje otjecanja.



Slika 19. Suma svih pogrešaka za odabrani k_2

Ulazni podaci za izradu modela su :

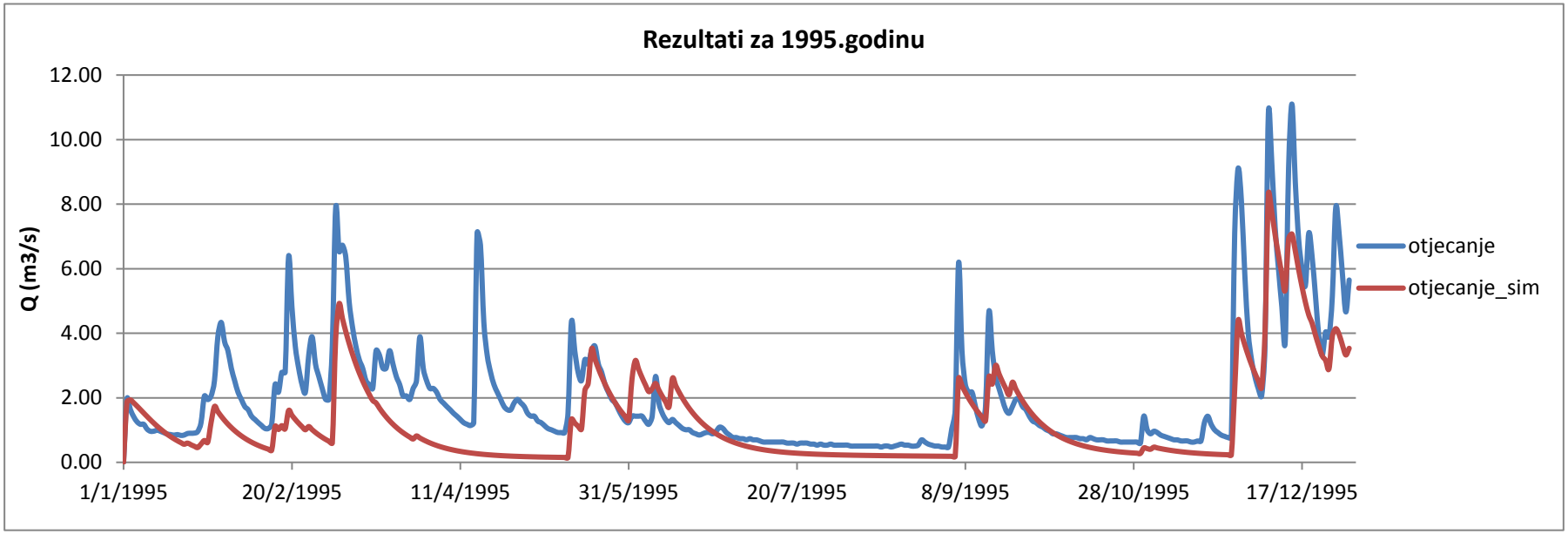
- oblik parametarske transfer funkcije:

$$u(t) = \frac{0{,}29}{240{,}0384} \cdot e^{\frac{-t}{240{,}0384}} + \frac{0{,}71}{10} \cdot e^{\frac{-t}{10}} \qquad (14)$$

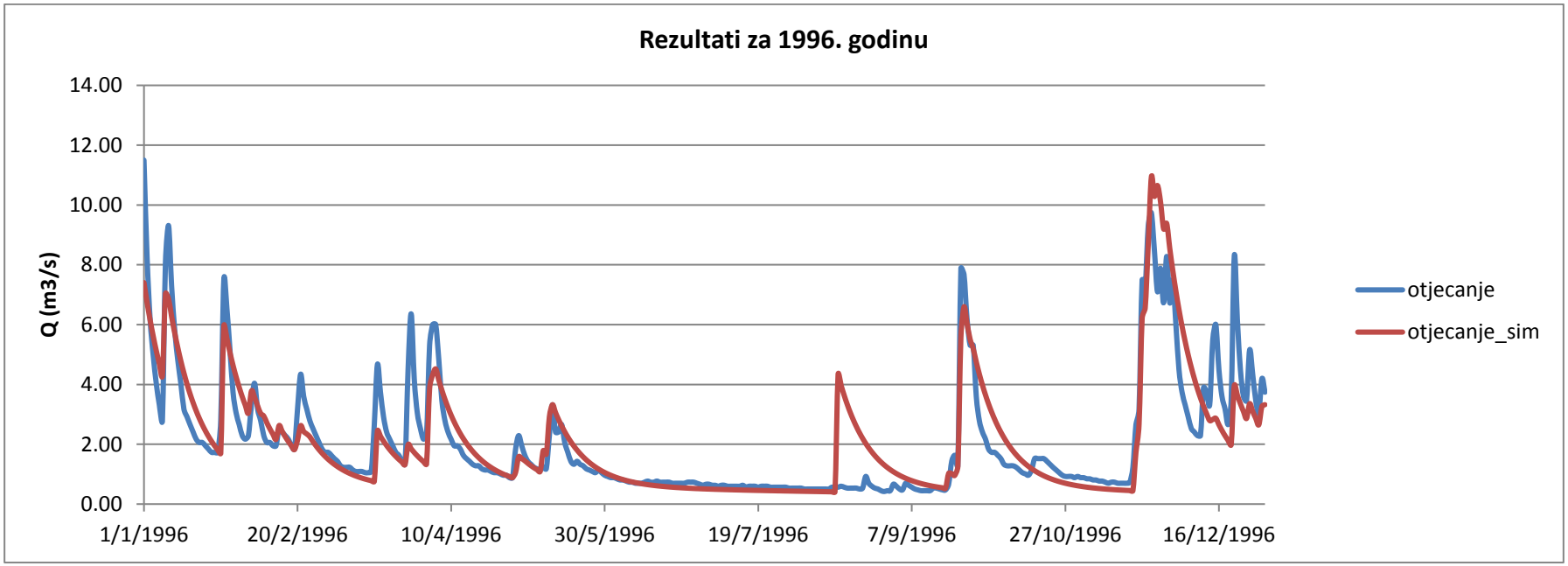
- efektivne oborine (RO) izračunate metodom Palmera

  Oblik parametarske transfer funkcije određen je parametrima:
  - k_1 - određen je analizom recesijskog dijela hidrograma i predstavlja inverznu vrijednost koeficijenta recesije (komponenta baznog otjecanja)
  - Θ - određen je separacijom hidrograma otjecanja i predstavlja udio baznog u ukupnom otjecanju
  - k_2 - određen metodom najmanjeg kvadrata te postupcima kalibracije i verifikacije (opisano u prethodnom poglavlju) i predstavlja komponentnu direktnog otjecanja

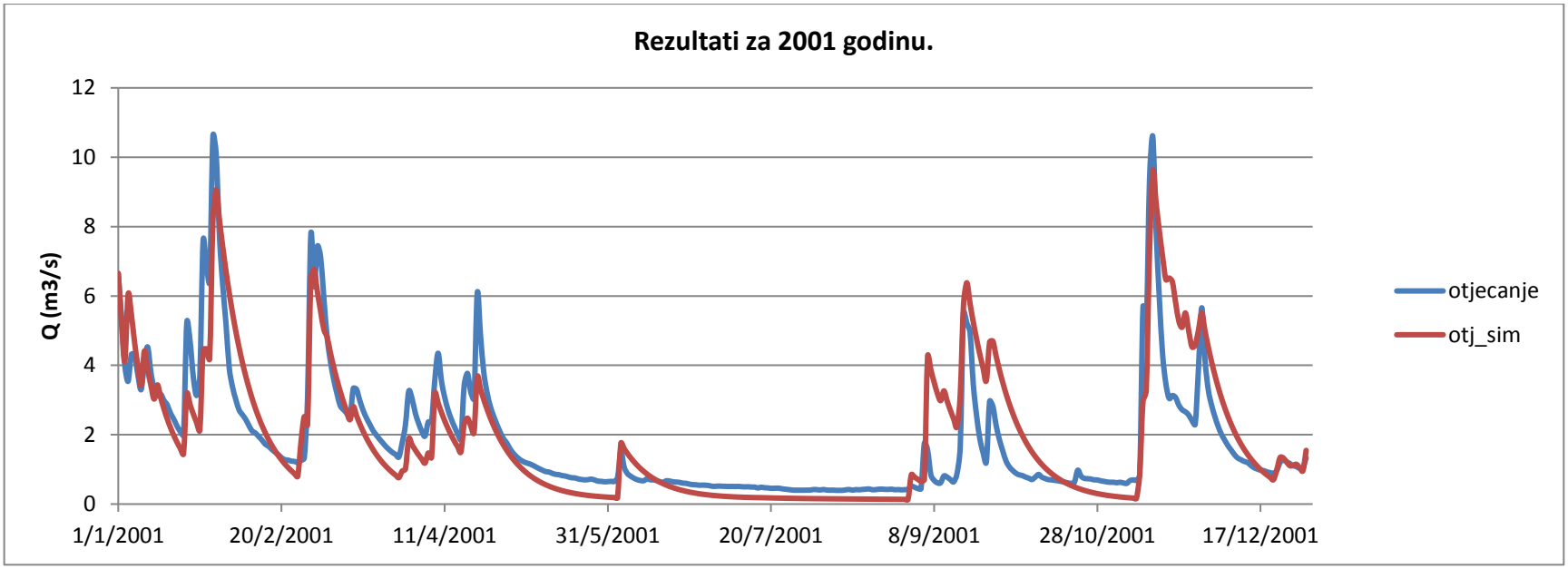
Ulazni podaci nam daju rezultate prikazane na slikama 20 - 26.



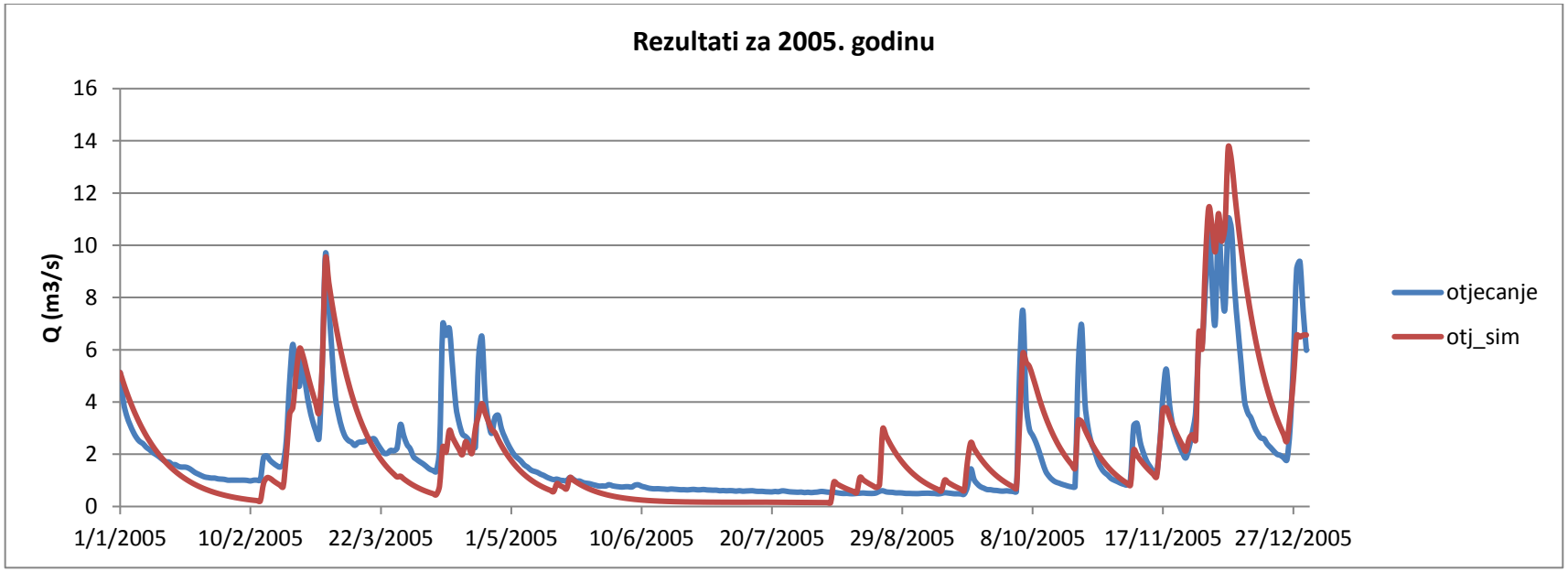
Slika 20. Rezultati modela za 1995. godinu



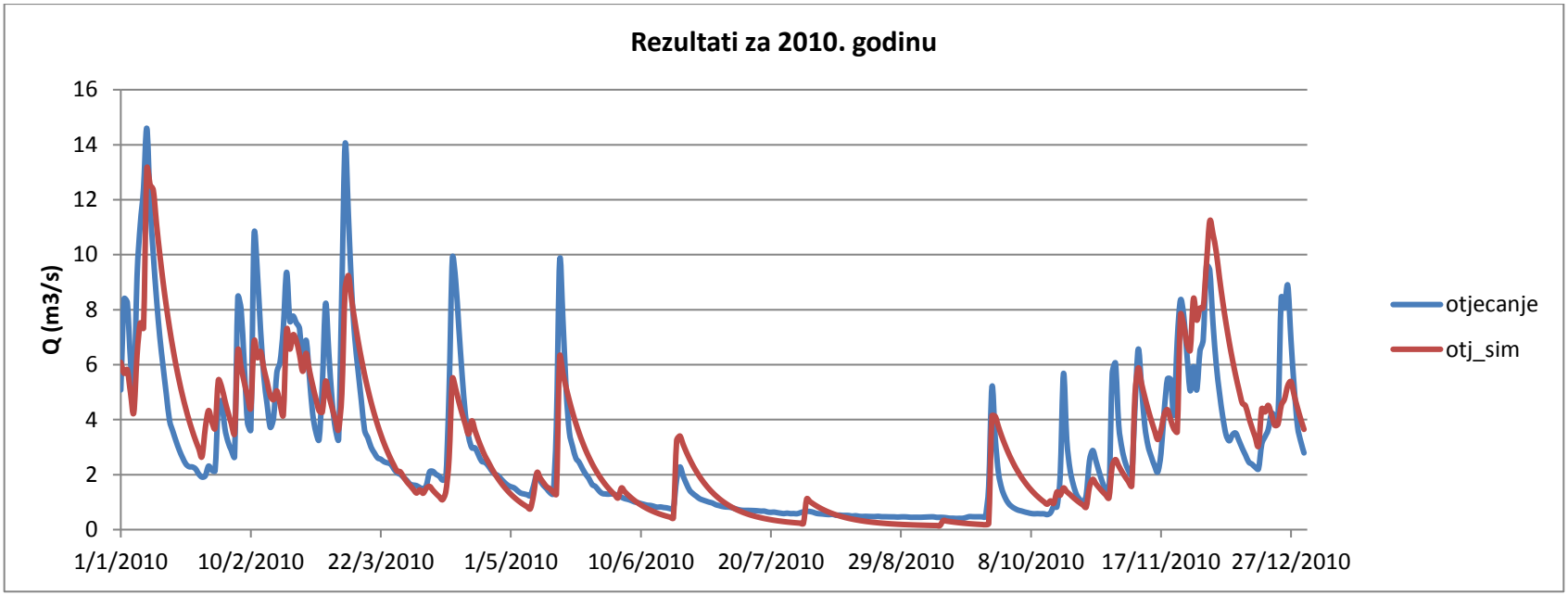
Slika 21. Rezultati modela za 1996. godinu



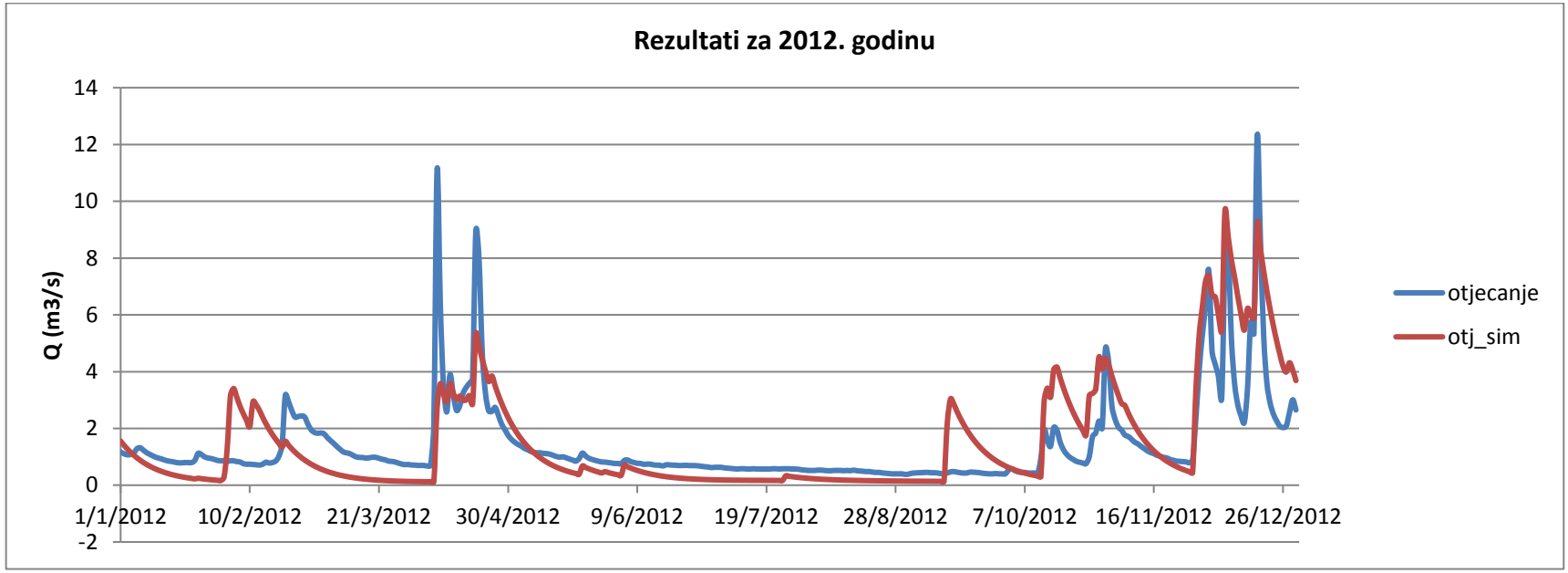
Slika 22. Rezultati modela za 2001. godinu



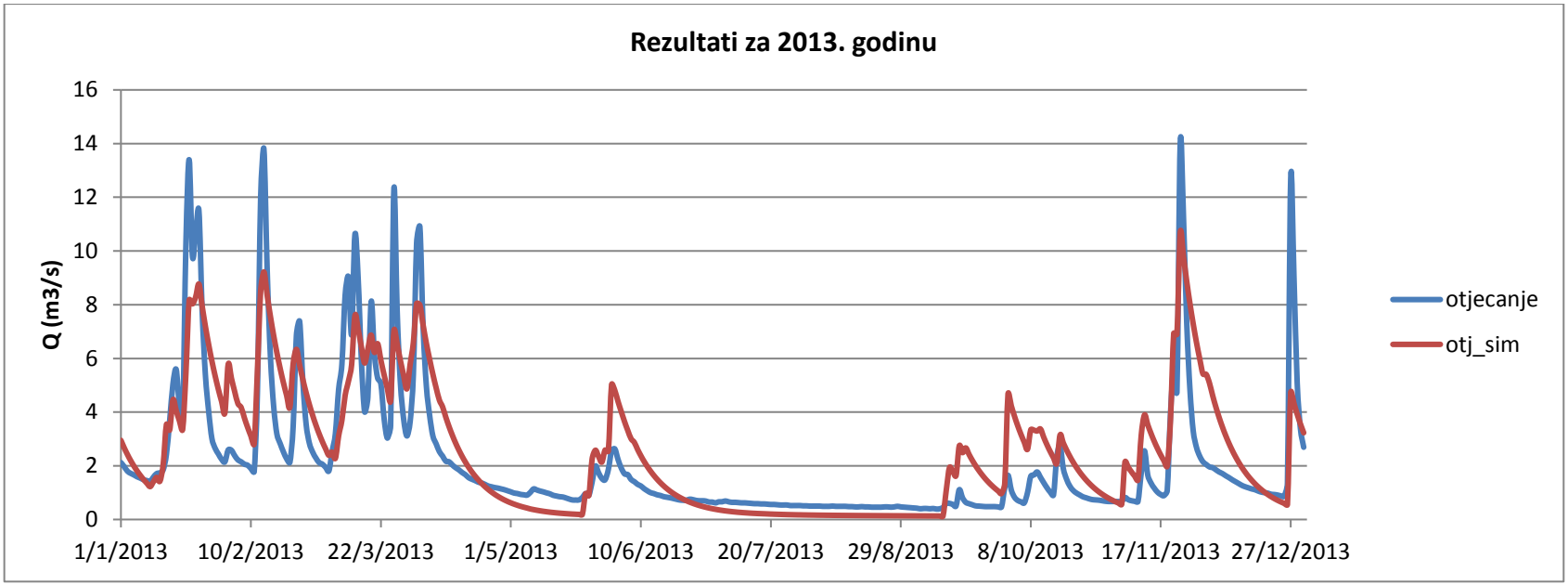
Slika 23. Rezultati modela za 2005. godinu



Slika 24. Rezultati modela za 2010. godinu



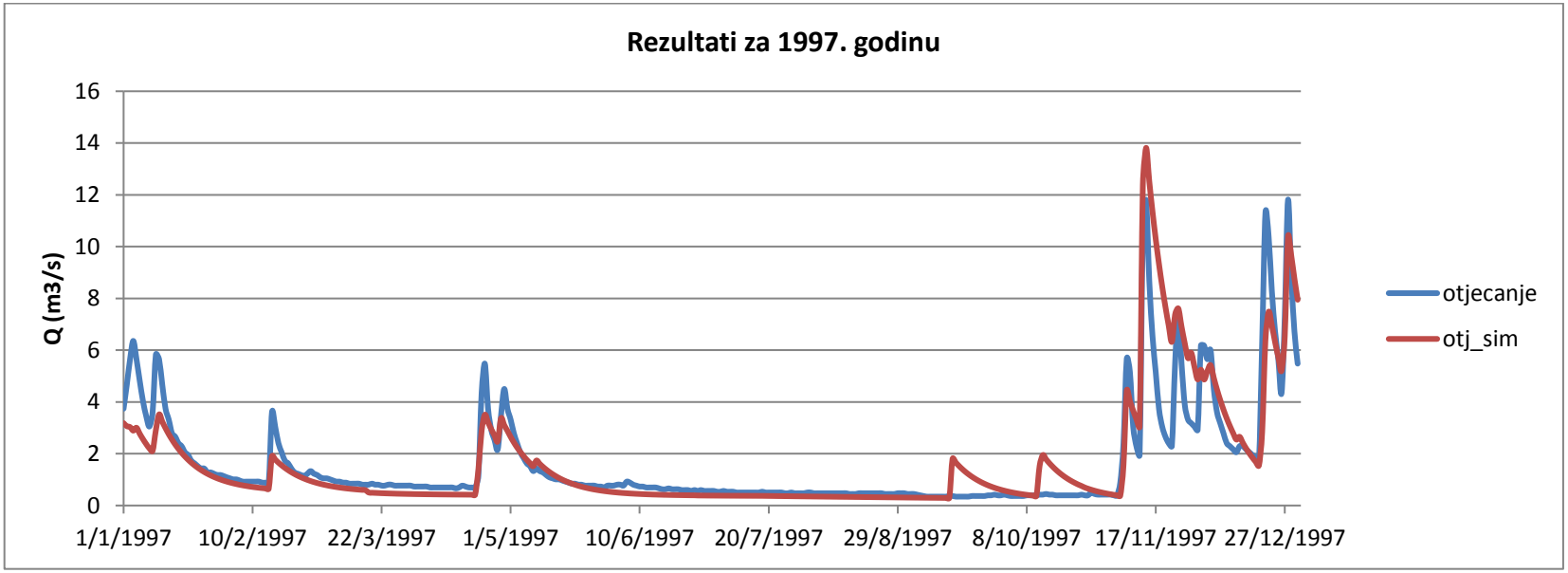
Slika 25. Rezultati modela za 2012. godinu



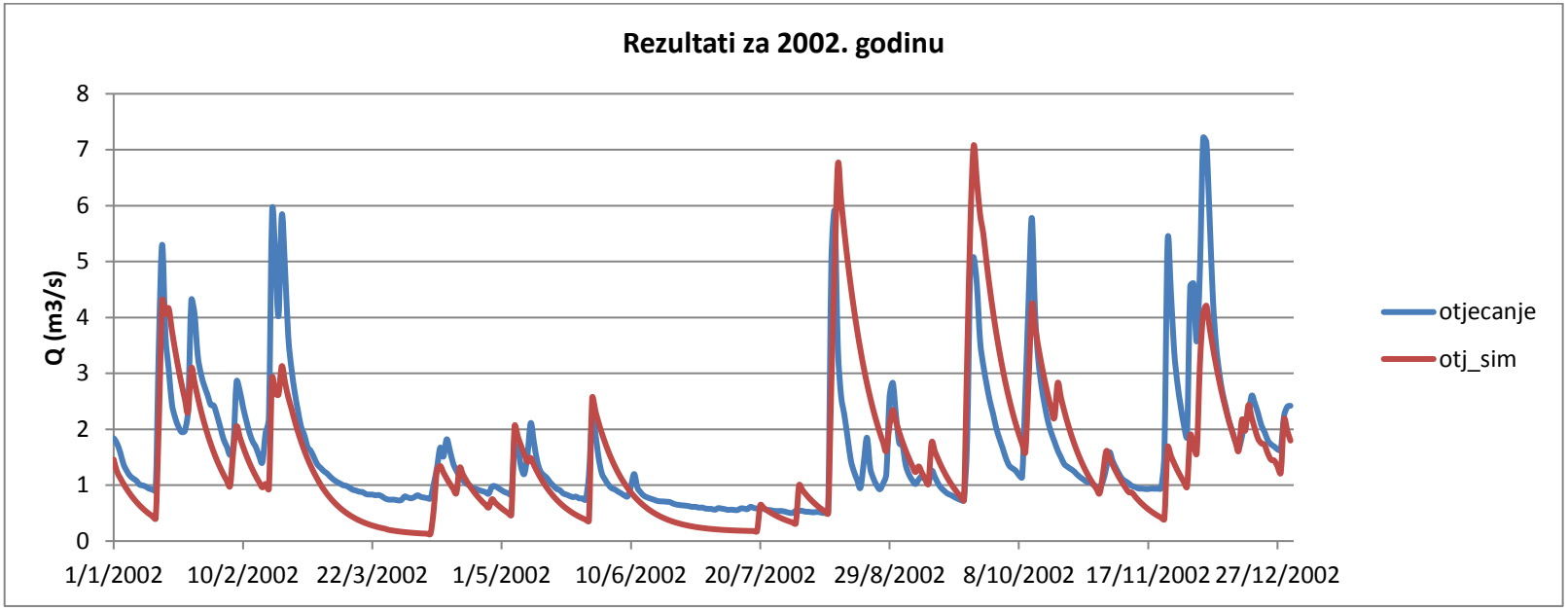
Slika 26. Rezultati modela za 2013. godinu

5. VERIFIKACIJA MODELA

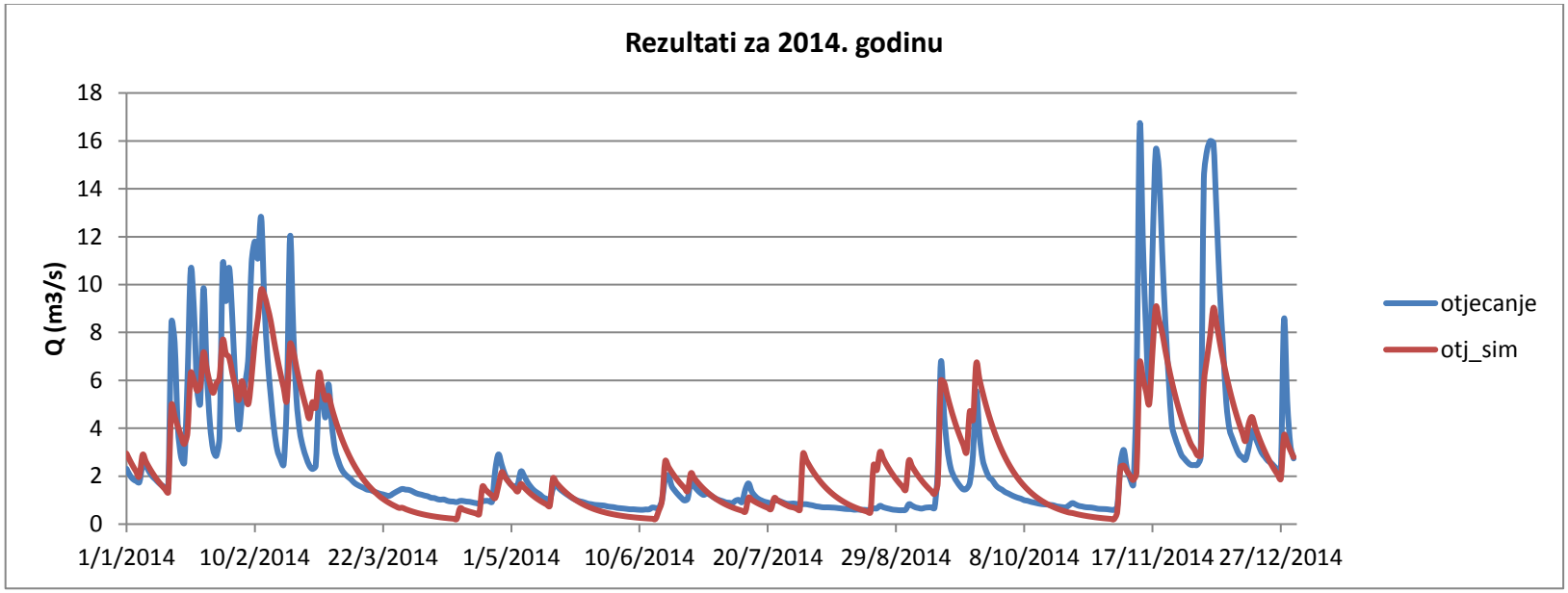
Za verifikaciju, odnosno provjeru ponašanja modela, odabrane su godine: 1997, 2002 i 2014.
Verifikacija modela prikazana je na slikama 27 - 29 i ona je dokaz prihvatljivosti modela za korištenje.



Slika 27. Rezultati modela za 1997. godinu



Slika 28. Rezultati modela za 2002. godinu



Slika 29. Rezultati modela za 2014. godinu

6. ANALIZA REZULTATA

U prethodna dva poglavlja prikazani su rezultati modela, odnosno uspoređuje se simulirano otjecanje sa stvarnim izmjerenim otjecanjem.

Za kalibraciju modela odabrani su izmjereni podaci i opažanja za 1995., 1996., 2000., 2001., 2005., 2010., 2012. i 2013. godinu, a onda se vršila verifikacija modela na 1997., 2002., i 2014. godini. U nekim godinama unutar pojedinih vremenskih intervala uočena su veća odstupanja od izmjerenih vrijednosti. Primjerice, za 1995. godinu (slika 24) primjećuje se podcjenjivanje otjecanja u ožujku i travnju. U 1996. godini (Slika 25) krajem kolovoza dolazi do precjenjivanja otjecanja. Dok u 2012. godini (Slika 29) u veljači i ožujku uočava se pojava otjecanja nekoliko dana ranije od izmjerenih vrijednosti.

Pogreške modela javljaju se iz nekoliko razloga. Podaci o oborinama uzeti su sa postaje Dugopolje, a o protocima sa izvora Žrnovnice. Metodom Palmera uzimaju se podaci o oborinama sa postaje Dugopolje i izračunava se efektivna oborina. Pomoću efektivne oborine (količina oborine koja otječe) dobiva se hidrogram otjecanja. Naglasak je na tome da se simulirano otjecanje dobilo koristeći podatke o oborinama sa postaje Dugopolje i onda se uspoređivalo sa izmjerenim otjecanjima na izvoru Žrnovnice. Upravo iz toga razloga može doći do odstupanja u rezultatima zbog nejednolike vremenske i prostorne raspodjele oborina na slivu te stoga oborine izmjerene u Dugopolju ne predstavljaju stvarne količine vode koje prihranjuju vodonosnik. Pogreške mogu nastati i zbog: neujednačene zastupljenosti vegetacije (vegetacija će biti zastupljenija u proljetnom nego u zimskom razdoblju) , promjene kapaciteta tla (obzirom da je krški teren heterogen i promjenjiv tokom vremena teško je odrediti kapacitet tla na svakoj dionici rijeke te se usvaja jedan kapacitet za cijelu dužinu promatranog toka) i slično.
Koristeći metodu Palmera usvajaju se i neke pretpostavke. Naime, Palmer kaže da se oborina koja dospije u tlo prvo troši na evapotranspiraciji. Zatim se popunjavaju zalihe vode u tlu procjeđivanjem, a višak oborine otječe u podzemlje. Upravo iz te pretpostavke dolazi do podcjenjivanja otjecanja u ljetnim mjesecima, jer se zbog velikih temperatura zalihe vode u tlu troše na evapotranspiraciju. Zbog velike evapotranspiracije ljeti, Palmer bi nam svojim proračunom mogao pokazati da u tom razdoblju nema otjecanja u podzemlje. Drugim riječima, kapacitet tla u ljetnim i zimskim mjesecima nije isti zbog različitog vegetacijskog pokrova.
Procjenu parametra direktnog otjecanja (k_2) koristili smo metodom najmanjeg kvadrata kako bi minimarizirali pogrešku. Međutim, iako zadovoljavajuće aproksimira, teoretski nije dokazano da je to najbolja metoda za ovakav model. Primjena drugih kriterija bi vjerojatno dovela do različitog rezultata.

7. ZAKLJUČAK

Osnovni cilj ovog rada je bio provjeriti mogućnost korištenja zadanog parametarskog modela za simulaciju otjecanja iz krškog izvora Žrnovnice.

Uzimajući u obzir sve argumente i nedostatke ovakvog modela te činjenicu da je krš vrlo kompleksan i neistražen teren koji je uvjetovan vremenskom i prostornom promjenjivošću hidroloških i hidrogeoloških karakteristika, može se zaključiti da ovaj model dovoljno dobro procjenjuje trenutno otjecanje. Odnosno, model je dovoljno pouzdan za procjenu budućeg otjecanja pri utvrđivanju bilance vode izvora Žrnovnice.

LITERATURA

[1] Urumović Kosta, Duić Željko i Hlevnjak Branko: Hidrogeološko značenje koeficijenta recesije na primjeru istarskih izvora, Zagreb: 2009.

[2] National Climatic Data Center, Climate of 2013 - April U.S Palmer Drought Indices URL: http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/prelim/drought/palmer.html

[3] Ranko Žugaj: Hidrologija za agreokologe, Agronomski fakultet Zagreb: 2009.

[4] Branisavljević Nemanja i Prodanović Dušan: Kalibracija matematičkih modela vodovodnih sistema primenom genetskog algoritma,. Univerzitet u Beogradu: 2008.

[5] Damir Jukić: Autorizirana predavanja iz kolegija Hidrologija krša. Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu: 2015.

[6] Vesna Denić - Jukić: Autorizirana predavanja iz kolegija Inženjerska hidrologija. Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu: 2015.

[7] Pandžić Krešo: Bilanca vode na istočnom primorju Jadrana, Republički hidrometeorološki zavod SRH, Zagreb: 1985.

[8] Damir Jukić i Vesna Denić - Jukić: Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall - runoff model, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu: 2009.

[9] Sanja Kapelj - Janislav Kapelj - Mirjana Švonja (2011): Hidrogeološka obilježja sliva Jadra i Žrnovnice

[10] Pandžić K. - Vuković I. (1999): Vertical gradients of evapotranspiration over Lika and Gorski Kotar region. Croatian Waters 28, 203–216.

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematska hidrogeološka karta slivnog područja izvora Jadra i Žrnovnice 9
Slika 2. rijeka Žrnovnica 9
Slika 3. Jednadžba bilance vode na granici tlo – zrak prema Palmeru 10
Slika 4. Shematski prikaz komponenti vodne ravnoteže 11
Slika 5. Prikaz Palmer-ovih komponenata bilance vode u milimetrima za svaku godinu 16
Slika 6. Recesijsko razdoblje za 1997. godinu 19
Slika 7. Recesijsko razdoblje za 2000. godinu 19
Slika 8. Recesijsko razdoblje za 2001. godinu 20
Slika 9. Recesijsko razdoblje za 2003. godinu 20
Slika 10. Recesijsko razdoblje za 2008. godinu 21
Slika 11. Podjela otjecanja na bazno i direktno za razdoblje 1995.-1996. 23
Slika 12(a). Rezultat simulacije za 1995.godinu za odabir k_2 = 7,36 26
Slika 12(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 1995. godinu 26
Slika 13(a). Rezultat simulacije za 1996.godinu za odabir k_2 = 11,02 27
Slika 13(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 1996. godinu 27
Slika 14(a). Rezultat simulacije za 2001.godinu za odabir k_2 = 10,96 28
Slika 14(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 2001. godinu 28
Slika 15(a). Rezultat simulacije za 2005.godinu za odabir k_2 = 13,73 29
Slika 15(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 2005. godinu 29
Slika 16(a). Rezultat simulacije za 2010.godinu za odabir k_2 = 7,56 30
Slika 16(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 2010. godinu 30
Slika 17(a). Rezultat simulacije za 2012.godinu za odabir k_2 = 21,23 31
Slika 17(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 2012. godinu 31
Slika 18(a). Rezultat simulacije za 2013.godinu za odabir k_2 = 5,58 32
Slika 18(b). Pogreška u odnosu na parametar k_2 za 2013. godinu 32
Slika 19. Suma svih pogrešaka za odabrani k_2 33
Slika 20. Rezultati modela za 1995. godinu 34
Slika 21. Rezultati modela za 1996. godinu 35
Slika 22. Rezultati modela za 2001. godinu 36
Slika 23. Rezultati modela za 2005. godinu 37
Slika 24. Rezultati modela za 2010. godinu 38
Slika 25. Rezultati modela za 2012. godinu 39

Slika 26. Rezultati modela za 2013. godinu 40
Slika 27. Rezultati modela za 1997. godinu 41
Slika 28. Rezultati modela za 2002. godinu 42
Slika 29. Rezultati modela za 2014. godinu 43

POPIS TABLICA

Tablica 1. Izračun Palmerove metoda za jedan mjesec..... 15
Tablica 2. Prikaz uvjeta ravnoteže i koeficijenata otjecanja za razdoblje 1995.-2014. 15