

# Bilanca vode i modeliranje otjecanja krškog izvora Wasseralmquelle (Austrija)

---

Planjanin, Damira

Master's thesis / Diplomski rad

2015

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:451128>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-14**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Damira Planjanin**

**Split, 2015**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Damira Planjanin**

**Bilanca vode i modeliranje otjecanja krškog izvora  
Wasseralmquelle (Austrija)**

**Diplomski rad**

**Split, 2015**

## **Bilanca vode i modeliranje otjecanja krškog izvora Wasseralmquelle (Austrija)**

### ***Sažetak:***

Ovaj rad će opisati metode za modeliranje otjecanja te jednadžbu bilance vode za krški izvor Wasseralmquelle (Austrija). Rad će pokušati pomoću metoda dobiti simulirana rješenja što sličnija stvarnim mjerenim podacima, čime bi se te iste metode pokazale prihvatljive za modeliranje budućeg otjecanja. U svrhu obrane ove teze rad će detaljno opisati konceptualni model korišten u Austriji i u Hrvatskoj (Jednostavna konceptualna metoda, Palmer-ova metoda) te će se koristiti alati poput Excel-a te FORTRAN-a.

### ***Ključne riječi:***

Bilanca vode, otjecanje, krški izvor, Wasseralmquelle, konceptualni model, Palmer-ova metoda, linearni rezervoar

## **Water balance and runoff modeling of karst spring Wasseralmquelle (Austria)**

### ***Abstract:***

This paper will describe methods for runoff modeling and water balance equation for karst spring Wasseralmquelle (Austria). It will try, using a variety of methods, to get simulated solutions as accurate as actual measured data, which would have shown that the same methods are acceptable for modeling future runoff. For the purpose of defense of this thesis, paper will describe in detail the conceptual model used in Austria and Croatia (simple conceptual model, Palmer's method) and will use tools such as Excel and FORTRAN.

### ***Keywords:***

Water balance, runoff, karst spring, Wasseralmquelle, conceptual model, Palmer method, linearni rezervoar

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ: DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA

KANDIDAT: Damira Planjanin

BROJ IDEKSA: 449

KATEDRA: Katedra za hidrologiju

PREDMET: Hidrologija krša

### **ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Bilanca vode i modeliranje otjecanja krškog izvora Wasseralmquelle (Austrija)

Opis zadatka: Na osnovu dnevnih podataka o protoku vode na izvoru Wasseralmquelle, te podataka oborina s meterološke postaje Naßwald (Wasseralm) potrebno je izaditi jednostavni konceptualni groundwater balance (GB) model otjecanja iz izvora te odrediti optimalne vrijednosti parametara. Model će biti predložen od strane mentora na BOKU University (Wien, Austria). Simulirati dnevna otjecanja na izvoru primjenom tog modela te usporediti i komentirati rezultate simulacija. Također izraditi modificirati konceptualni model koji je korišten u radu: *Jukić D., Denić-Jukić V., 2009, Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall-runoff model*; te odrediti bilancu voda predmetnog krškog izvora. Simulirati dnevna otjecanja na izvoru primjenom ovog modela te usporediti i komentirati rezultate simulacija. Na kraju usporediti i komentirati rezultate simulacija dobivenih dvjema metodama.

U Splitu, 18.09.2015.

Voditelj diplomskog rada:

Prof. dr. sc. Damir Jukić

Predsjednik Povjerenstva za završne  
i diplomske ispite:

Prof. dr. sc. Ivica Boko

*Zahvaljujem se mom mentoru Prof. Dr. Sc. Damir-u Jukić-u na Fakultetu arhitekture, građevinarstva i geodezije (Split, Croatia).*

*Također se zahvaljujem mentoru Ao. Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. Hubert-u Holzmann-u na BOKU University (Wien, Austrija).*

*Rad posvećujem mojim roditeljima kojima sam najviše zahvalna na potpori, ljubavi i strpljenju.*

**Sadržaj:**

1.	OPĆI UVOD U KRŠ.....	1
1.1	PODRIJETLO I ZNAČENJE POJMA KRŠ .....	1
1.2	VRSTE KRŠA.....	3
1.3	PROCES OKRŠAVANJA .....	3
1.4	ULOGA TEKTONIKE U PROCESU OKRŠAVANJA .....	4
1.5	DUBINA OKRŠAVANJA .....	5
1.6	POROZNOST I OSNOVNA GEOMORFOLOŠKA OBILJEŽJA KRŠA .....	7
2.	BAZA PODATAKA IZVORA WASSERALM .....	8
2.1	KRŠKI IZVORI.....	8
2.2	IZVOR WASSERALM .....	8
2.3	BAZA PODATAKA .....	9
2.4	DNEVNE, MJESEČNE I GODIŠNJE VRIJEDNOSTI.....	10
2.5	EVAPOTRANSPIRACIJA .....	16
2.6	BILANCA (RAVNOTEŽA) VODE .....	17
3.	MODEL VODNE BILANCE (BOKU) .....	19
3.1	JEDNOSTAVAN (KONCEPTUALNI) MODEL.....	19
3.2	ULAZNI PODACI I PARAMETRI .....	20
3.3	KORACI IZRAČUNA .....	22
3.4	REZULTATI .....	26
4.	MODEL VODNE BILANCE (FGAG).....	40
4.1	MODIFICIRANA PALMEROVA METODA.....	40
4.2	ULAZNI PODACI I KORACI IZRAČUNA .....	41
4.3	HIDROLOŠKI MODEL OTJECANJA .....	44
4.4	REZULTATI .....	49
5.	USPOREDBA REZULTATA.....	58
6.	ZAKLJUČAK .....	60
7.	LITERATURA.....	61
	POPIS GRAFOVA .....	62
	POPIS SLIKA .....	63
	POPIS TABLICA .....	64

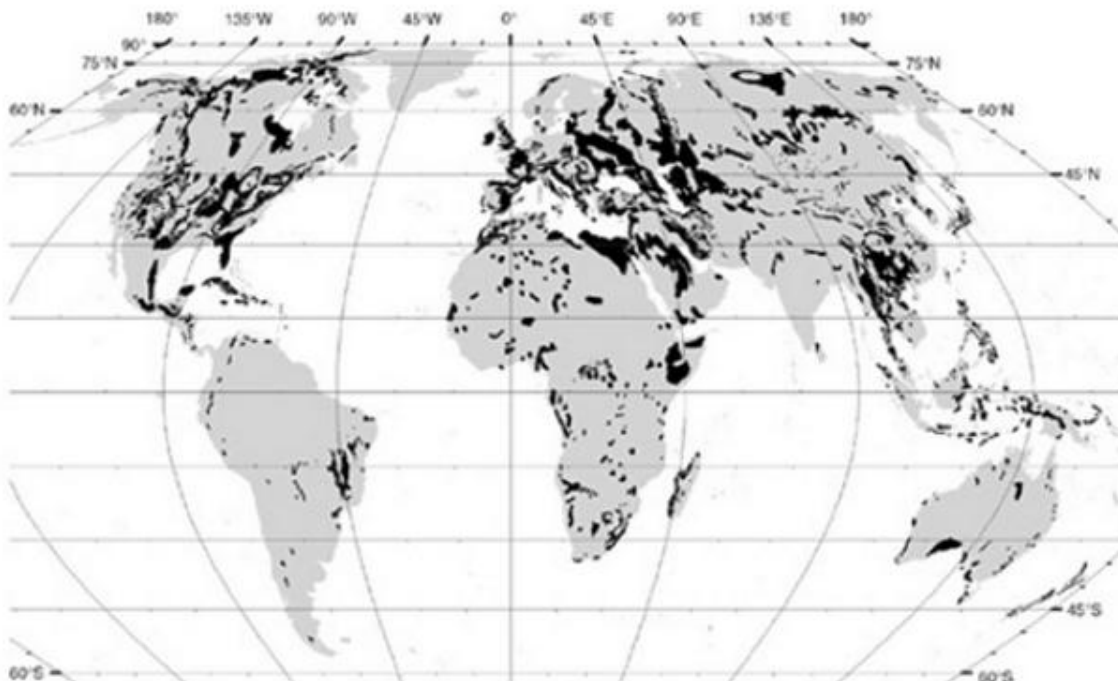
# 1. OPĆI UVOD U KRŠ

„Ključno je u karbonatnim terenima pretpostaviti da krš postoji, osim ako se ne dokaže suprotno.“ („*The prudent default situation in carbonate terrains is to assume karst exists unlessproved otherwise.*“) [1]

Derek Ford, Paul D. Williams

## 1.1 PODRIJETLO I ZNAČENJE POJMA KRŠ

Prema Petru T. Milanović-u pojam krš predstavlja terene sa složenim geološkim značajkama i posebnim hidrogeološkim karakteristikama [2]. Krški tereni se sastoje od topljivih stijena (vapnenaca, dolomita, gipsa, halita i konglomerata). Kao rezultat topljivosti stijena i raznih geoloških procesa koji djeluju tijekom geološkog vremena, velik broj fenomena, krajolika i velikih sustava podzemnih voda su formirani, koji daju jedinstvene, specifične karakteristike terena koji definiraju pojam krša. Krš, dakle, karakteriziraju škrabe, ponikve (vrtače), okna, polja, špilje, ponori, kaverne, estavele, izvori, vrulje, ponornice, suhe riječne doline, povremeno poplavljena polja, podzemni riječni sustavi, gole stijenske mase, krške zaravni. Velike površine krških terena su se razvile na karbonatnim stijenama (Slika 1) te otprilike 20-25% svjetske populacije ovisi u velikoj mjeri ili u cijelosti o podzemnoj vodi iz krških terena.



Slika 1: Globalna raspodjela karbonatnih stijena. (Karta sastavljen pomoću GIS-a)



Teško je dati vrlo kratku definiciju pojma krš, jer je krš rezultat brojnih procesa koji se odvijaju u različitim topljivim stijenama i pod različitim geološkim i klimatskim uvjetima. Kriva je pretpostavka da sustav podzemnih voda neće biti krški, ako krš nije očit na površini. Ova pretpostavka može dovesti do ozbiljnih pogrešaka, jer se cirkulacija krških podzemnih voda može razviti čak ako površina nije krški teren. Ako želimo pojasniti situaciju terena postoje dijagnostički testovi koji su dostupni.

Podrijetlo pojma krš može se pratiti natrag od zemljopisnog naziva sjeverozapadne regije Dinarskog krša (dio Slovenije, blizu granice s Italijom). Prije više od 700 godina, u Sloveniji su ljudi koristili staroslavensku riječ *kras*, a u rimsko doba talijani koriste riječ *carso* (Slika 2). Oba izraza su Indo-Europskog podrijetla. Potječu iz riječi *kar/karra/gara* koje u prijevodu znače kamen, a pronađene su u mnogim jezicima Europe i Bliskog Istoka. U Austro-Ugarskoj Monarhiji pojam krš je definiran germanizacijom riječi *kar* i *kras*. Veliki utjecaj na riječ krš, kao međunarodni znanstveni pojam, imale su geografske i geološke škole u Beču. Posebne geološke i hidrogeološke karakteristike krškog područja postale su poznate kao „krški fenomen“. Pojam krš je prihvaćen kao međunarodni izraz u svijetu. Cvijić je napisao prvu monografiju na temu „krškog fenomena“ [2].

Pojmovnik krških termina je sastavljen 1972. godine kao dio doprinosa UNESCO-a u Parizu. Svrha njegovog stvaranja je bila da pomogne i olakša studije karbonatnih stijena u mediteranskom bazenu i drugdje. Pojmovnik definira 227 krških pojmova na devet jezika: engleski, francuski, njemački, grčki, talijanski, španjolski, turski, ruski i jugoslavenski. Još jedan važan pojmovnik je Leksikon špilja i krških pojmova s posebnim osvrtom na zaštitu okoliša hidrogeologije krša („A Lexicon of Cave and Karst Terminology with Special Reference to Environmental Karst Hydrogeology“) koji je dostupan na internetu.



Slika 2: Podrijetlo pojma krš

## 1.2 VRSTE KRŠA

Krško područje može se podijeliti u vrste i podvrste sa zajedničkim karakteristikama. Različiti autori klasificiraju krš prema parametrima poput morfoloških značajki, strukturnih čimbenika, zemljopisnom položaju i taložnom okolišu karbonatnih stijena, iz čega slijedi niz drugih čimbenika. Ovisno o individualnim željama bilo koja od ovih krških klasifikacija može biti prihvatljiva ili neprihvatljiva, jer se nijedna od tih klasifikacija ne temelji na numeričkim vrijednostima ili na parametrima koji se mogu kvantificirati ili izraziti egzaktnim zakonima.

Mediterranski krški bazen je kolijevka krških studija. Jovan Cvijić je napravio doista izvanredan doprinos vezan za krški fenomen. On je postavio temelje moderne ideje o krškoj geomorfologiji u svom izlaganju iz 1893. godine, *Das Karstphanomen*. Cvijić je iznio jednu od prvih klasifikacija krša 1926. godine koristeći morfološke značajke kao bazu te ga podijelio na: holokrš, merokrš i krš prijelaznog tipa [1] [2].

Klasifikacija krša koja se temelji na razlikama u geološkim značajkama, litološkim i strukturnim karakteristikama je vrlo važna s hidrogeološkog stajališta. Krške platforme i geosinklinalni krš su dvije različite vrste krša prema ovoj klasifikaciji.

Dvije vrste krša mogu se klasificirati prema razdoblju formiranja: paleokrš (fosilni krš) i nedavni krš. U praksi, klasificiramo krš prema njihovom položaju na: primorski i kontinentalni krš. Postoji još mnogo krških klasifikacija koje se mogu pronaći u literaturi koja se koristi u ovom radu i drugoj literaturi.

## 1.3 PROCES OKRŠAVANJA

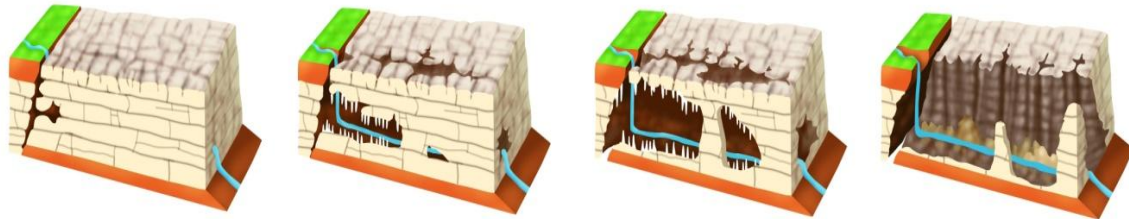
Definicija okršavanja označava puno geoloških procesa koji uništavaju topljive stijene, te na taj način formiraju jedinstvene morfološke značajke i posebne vrste poroznosti ili određeni hidrogeološki okoliš. Krš je postao sinonim za karbonatne stijene, uključujući sve njihove podvrste. Karbonatne stijene mogu biti i do nekoliko kilometara debele i mogu imati volumen od tisuću kubičnih kilometara. One sadrže 50% rezervi nafte i prirodnog plina, boksit, srebro, olovo, cink, zlato, dijamante te mnoge druge ekonomske depozite. Također sudjeluju u opskrbi poljoprivrednim vapnom, portland cementom, finim građevnim kamenom, te su glavni izvor agregata za autoceste u mnogim regijama itd. Karbonatne stijene težinski sadrže više od 50% karbonatnih minerala. Dva glavna minerala su vapnenac i dolomit.

Vapnenac je najzastupljeniji od svih karbonatnih stijena, a uglavnom se sastoji od minerala kalcita ili aragonita ( $CaCO_3$ , kalcijev karbonat). On se vrlo rijetko sastoji od čistog kalcita; često sadrži određen postotak gline, bitumenske tvari, magnezija, silicija, pijesaka i ostalih komponenti. Topljivost vapnenaca u procesu okršavanja se povećava s njegovom čistoćom.

Dolomit je gotovo jednako prisutan kao vapnenac. Dolomit je karbonatna stijena koja se sastoji od minerala dolomita, on je dvojni mineral karbonatnih soli kalcija i magnezija ( $CaMg(CO_3)_2$ ). On se sastoji od 30% CaO, 22% MgO i 48% CO<sub>2</sub>. Nema nedavne sedimentacije dolomita u morskoj vodi.

Evaporitne stijene (gips i halit) su najviše topljive stijene. Topljivost halita u vodi je 35% težinske mase, na 25°C, a povećava se na višim temperaturama. Proces okršavanja i nastali oblici su identični onima koji se inače nalaze u vapnencima i dolomitima.

Kemijsko otapanje stijena rezultira formiranjem kaverni i kanala (Slika 3), formacija koje također nastaju pod utjecajem erozivnog djelovanja vode. Proces otapanja u karbonatnim stijenama raste s porastom brzine protoka i turbulencija u vodi. Promjena iz laminarnog u turbulentni tok predstavlja početni faktor za stvaranje špilja.



Slika 3: Proces okršavanja

Proces okršavanja je uzrokovan kontaktom vode s topljivim i poroznim stijenama. Intenzivniji tektonskih procesi uvjetuju razvoj snažnijeg okršavanja i intenzivniju cirkulaciju vode. Bitan preduvjet za formiranje krških oblika je temperatura i količina oborina. Ostali faktori koji znatno utječu na proces okršavanja su kemijski sastav vode, brzina cirkulacije vode i općenito klimatski uvjeti.

Temperatura je vrlo važan faktor koji utječe na proces otapanja. Castany je utvrdio da 1 litra vode na 0°C može otopiti četiri do pet puta više vapnenca nego na 30°C i šest puta više od vode na 40°C [2]. Nakon detaljne istrage Corbel je zaključio da je proces okršavanja brži u područjima s hladnom klimom s većim sniježnim oborinama nego u područjima s toplom klimom [2]. Prema njemu, stopa erozije, uključujući i mehaničku i kemijsku, u niskim planinama s 1000 do 1600 mm oborine i s hladnom klimom je 160 mm na 1000 godina. U istom razdoblju u područjima s toplom klimom, erozija je 10 puta manja (samo 16 mm). U ravničarskim područjima s 300 do 500 mm oborine i s hladnom klimom, stopa erozije je 40 mm na 1000 godina, u usporedbi sa samo 4 mm u vrućim klimatskim područjima. Proces okršavanja je intenzivniji ako postoji debeli sloj humusa iznad karbonatne stijene. To je objašnjeno činjenicom da ovaj debeli sloj humusa pozitivno utječe na proizvodnju i akumulaciju  $CO_2$ , koji sudjeluje u fazi kemijskog procesa karbonatnih stijena.

Općenito govoreći, krški tereni su suhi i nepovoljni za ljudske životne uvjete, ali postoje neka područja s količinom oborina, u rasponu od 600-3000 mm ili čak 4000 mm godišnje (Crna Gora, jugozapadna Jugoslavija). To se čini nelogičnim na prvi pogled, ali se može objasniti izrazito brzom infiltracijom i značajnom perkolacijom vode, odnosno vrlo brzim okomitim kretanjem vode s površine, kroz zonu aeracije do razine podzemne vode. Topljivost i propusnost su jednako važni čimbenici procesa okršavanja. Osnovno svojstvo propusnosti u karbonatnoj stijenskoj masi je povezanost.

## 1.4 ULOGA TEKTONIKE U PROCESU OKRŠAVANJA

Okršavanje je proces u kojem voda prodire u propusne i topljive stijenske mase. Propusnost i topljivost su jednako važni čimbenici stijena. Elementarni faktor karbonatnih stijenskih masa s obzirom na faktor propusnosti je povezivanje.

Vapnenac i dolomit su vrlo krhke stijene, čak i više ako su slojevite i masivne. Bogati zajednički sustavi će nastati s intenzivnim tektonskim procesima. Povezani sustavi omogućavaju pristup vodi koja tada može migrirati u dublje dijelove gustih karbonatnih stijenskih masa. Kao rezultat tektonskih procesa, fragmentacija (rastresitost) masa predstavlja najvažniji faktor u procesu okršavanja. Može djelovati i horizontalno i vertikalno.

Povezani sustavi predstavljaju jednostavne tzv. *pull-apart* prekide u prethodno konsolidiranim stijenama. Najvažniji su oni koji su formirani vlačnim naprežanjem. Uobičajen rezultat vlačnih naprežanja je razdvajanje bloka. Najutjecajniji povezani sustavi unutar mreže sekundarne poroznosti su oni koji imaju najveće odvajanje i dubinu. Oni pružaju lakši pristup gravitacijske vode. Sustavi i površinske pukotine koje nastaju opuštanjem naprežanja također igraju važnu ulogu u procesu okršavanja. Zajedno, sustavi nastali opuštanjem naprežanja i površinske pukotine, stvaraju veliku mrežu otvora koji presreću površinske vode i prenose je na i kroz povezane sustave. Sustavi koji se protežu samo kroz samo jedan sloj stijene imaju vrlo ograničene učinke i manje su važni.

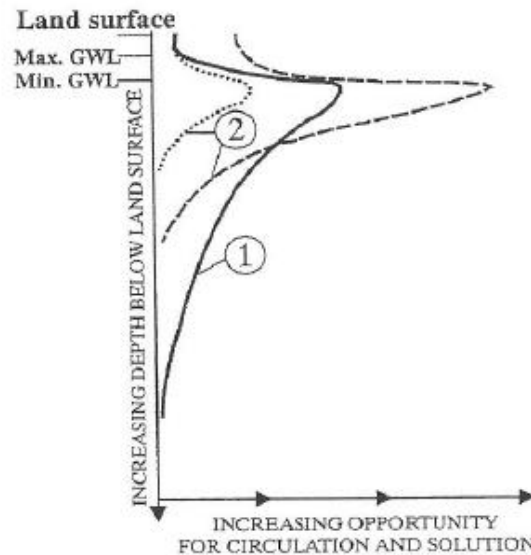
Gravitacija uzrokuje protok vode unutar svih tih sustava. Brzina i količina gravitacijske vode ovisi o veličini kanala i širini pukotina. Sokolov navodi eksperimente koji dokazuju da otvori širine samo 0.5 do 2.0  $\mu\text{m}$  sadrže slobodnu gravitacijsku vodu. Zone u kojima se dvije ili više pukotina spajaju ili sijeku su najviše podložne procesu okršavanja. Novi sustavi mogu nastati erozijom zbog otpuštanja tlaka koji se javlja kada je stijena uklonjena.

## 1.5 DUBINA OKRŠAVANJA

Dubina okršavanja je dubina na kojoj stijene prestaju biti izložene procesu okršavanja, a ta dubina može jako varirati. Eksperiment je napravljen bušenjem u Dinarskom području. Utvrđeno je da se dubina okršavanja nalazi na dubini od 2236 metara, odnosno 1600 m ispod srednje razine mora.

Nema jedinstvene i jasne podzemne granice koja predstavlja dubinu okršavanja. Zbog toga je definira prijelazna zona koja predstavlja površinu ispod koje više nema okršavanja (tzv. baza okršavanja). Prema Parizek-u dubina okršavanja varira ovisno o različitim: vrstama stijena, topografskom okruženju u dolinama, strukturama te o ostalim čimbenicima [2].

Istražujući stvaranje i rasprostranjenost krške poroznosti povezane s krškim izvorima, LeGrand i LaMoreaux su zaključili da se okršavanje smanjuje s dubinom (Slika 4) [2]. Puna linija predstavlja opće uvjete, a isprekidana i istočkana linija predstavljaju manje uobičajene, ali ne i neobične uvjete.

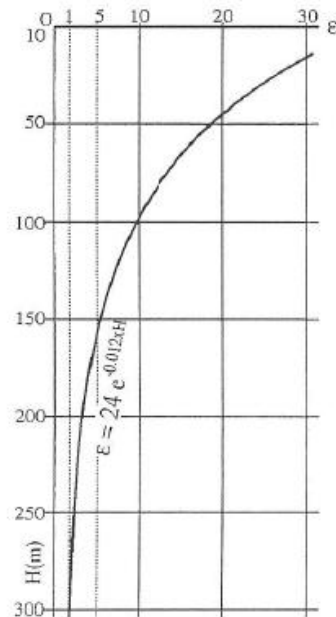


Slika 4: Shematski dijagram prikazuje stupanj do kojeg voda cirkulira i stijena se otapa na različitim dubinama ispod površine zemlje [2]

Možemo pretpostaviti da se okršavanje smanjuje s dubinom i da ga se može opisati eksponencijalnim zakonom (1), na temelju ispitivanja propusnosti u 146 bušotina u Dinarskom kršu u istočnoj Hercegovini:

$$\varepsilon = a * e^{-bH} \quad (1)$$

Gdje je:  $\varepsilon$  indeks okršavanja;  $H$  je dubina u metrima;  $e$  je prirodni logaritam;  $a$ ,  $b$  su koeficijenti.



Slika 5: Odnos između okršavanja i dubine na temelju ispitivanja propusnosti u 146 bušotina Dinarskog krša istočne Hercegovine

Iz grafa na Slici 5 možemo vidjeti da je okršenosť površinske zone od 0 do 10 m oko 30 puta veća nego na dubini od 300 m. Indeks okršavanja za dubinu od 300 m i više, ima

minimalnu vrijednost, blizu nule. Ako se proces okršavanja proteže do dubine od 300 do 500 m, i još dublje, nema značajnijih promjena u volumenu stijene. On je povezan s tektonskim zonama te je izražen u dvije dimenzije.

Vlahović je analizirao mnoge istraživačke bušotine u Nikšićkom Polju, Crna Gora. On je bio u mogućnosti dokazati da u zoni iznad najniže razine podzemne vode ima 3,3 puta više krških kanala i špilja nego u zoni ispod te razine [2].

## **1.6 POROZNOST I OSNOVNA GEOMORFOLOŠKA OBILJEŽJA KRŠA**

Poroznost krša čine sustavi šupljina, krški kanali i špilje raznih oblika, veličina i ispuna koji se mogu spojiti. Kao i druge poroznosti, i krška poroznost može biti primarna i sekundarna.

Primarna poroznost je formirana pri samom stvaranju sedimenta. Ovaj tip krške poroznosti nije čest. Krški vodonosnici koji imaju značajnu primarnu poroznost su povezani sa sedrenim masama (Antalya, Turska), te s nedavno nastalim grebenima vapnenca. Pojavljuje se u većoj količini u krškim vodonosnicima na Floridi (Biscayne vodonosnik). U području Miami-a, Florida, njegova dubina doseže oko 33 m. Pojavljuje se također na poluotoku Yucatán u Meksiku. Krški izvori tamo nastaju u 40 metara debelom vapnencu.

Sekundarna poroznost je poroznost koja se sastoji od šupljina, kaverna, krških kanala i špiljskih sedimenata. Predstavlja određenu vrstu krške poroznosti, zaobljenog ili okruglog oblika, u rasponu od mikrošupljina do šupljina veličine decimetra. Najčešće se veličine kreću između nekoliko milimetara i 2 cm. Šupljine su dijelom povezane, djelom izolirane ili isključene. Veće šupljine su često ispunjene špiljskim naslagama ilovače. Ponekad su u potpunosti ispunjeni kalcitom. Puno je više zastupljena nego primarna poroznost.

Broj i dimenzije pora se povećavaju postupno s vremenom, posebno s obzirom na topljivost stijena i fizičko djelovanje vode. Dakle, poroznost karbonatnih stijena po jedinici površine se povećava u vremenu. Veličina i broj pora, te način povezivanja, su od primarne važnosti za definiranje stijenske poroznosti. Postojanje šupljina u stijeni podrazumijeva njihovu poroznost. Voda može teći kroz pore ako su one povezane i ako su njihove dimenzije takve da omogućavaju vodi prevladavanje adhezijske i molekularne sile.

Milanović tvrdi da krš možemo definirati kao teren s prepoznatljivom hidrologijom i morfologijom (kršim oblicima) koji su kombinacija topljivosti stijena i dobro razvijene sekundarne poroznosti [2]. Slabo razvijen krš topljivih stijena ima izuzetno visoku primarnu poroznost (~ 30-50%). Ako topljive stijene imaju neznatnu primarnu poroznost (<1%), one imaju veliku sekundarnu poroznost te se smatraju izvrsnim kršom.

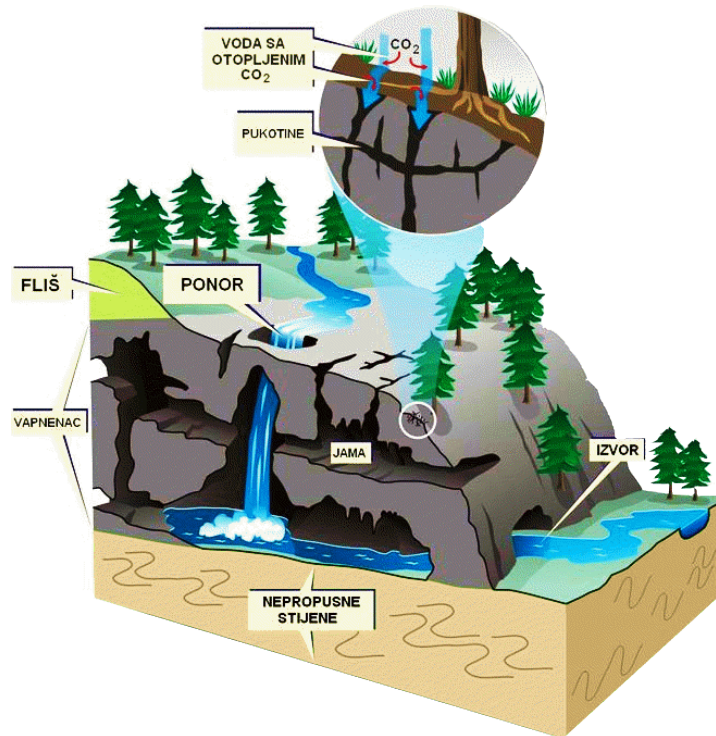
Najbolji rezultat okršavanja je specifična morfologija koja čini krške regije prilično jedinstvenim. Ti krški oblici posljedica su procesa otapanja vodom topljivih karbonatnih stijena. Potpuno razumijevanje tih oblika je moguće uz rješavanje niza hidrogeoloških i geotehničkih problema.

Najreprezentativniji morfološki oblici povezani posebno s krškim regijama su škrape, ponikve, suhe doline, okna, špilje, polja, i krške ravnice koje su opisane u mnogim različitim literaturama od kojih su se neke koristile u ovom radu.



## 2. BAZA PODATAKA IZVORA WASSERALM

### 2.1 KRŠKI IZVORI



Slika 6: Krški izvor

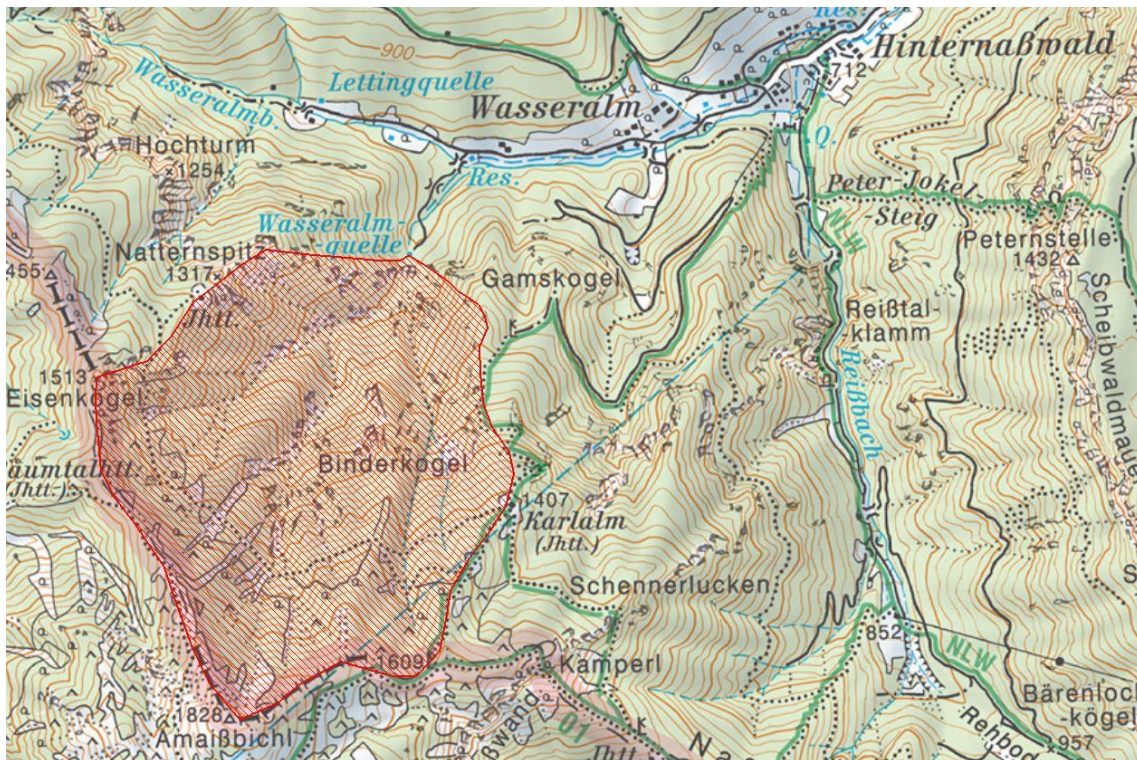
Krški izvori ili vrela (Slika 6) se mogu naći na mnogim mjestima unutar krških područja. Većina važnih izvora se nalazi duž oboda krških polja, riječnih dolina i na obali. Bili trajni ili privremeni, glavna karakteristika izvora je izravna ovisnost njihovog otjecanja o oborinama. Karakteristike krških izvora ovise o brojnim čimbenicima kao što su: slivno područje, smanjen kapacitet vodonosnika, ukupna efektivna poroznost, geološki sastav, i drugi slični čimbenici. Površina slivnog područja i relativni, aktivni volumen vodonosnika imaju dominantnu ulogu za neki krški izvor. Krški izvori imaju veliku varijaciju minimalnog i maksimalnog kapaciteta. Većina velikih krških vrela imaju oblik obrnutog sifona, tzv. sifonalni izvori.

### 2.2 IZVOR WASSERALM

Izvor Wasseralm je jedan od tri vrlo važna izvora pitke vode (*The Fuchs Pass Spring, Kaiserbrunn and Wasseralm Spring*), čija se voda isporučuje u austrijski glavni grad Beč (Wien) preko Prvog bečkog planinskog cjevovoda (*I. Wiener Hochquellenwasserleitung*). Nalazi se u krškom masivu *Schneealpe*, u Donjoj Austriji (Slika 7).

Prema austrijskom časopisu „Austrian Journal of Earth Sciences“ ovaj izvor predstavlja jasan dvokomponentni slučaj s relativno starim rezervoarom vode (prosječno

vrijeme zadržavanja je oko 26 godina) i kratkoročnom komponentom vode (oborina, otopljeni snijeg), koja doseže izvor kroz „brze“ kanale [3].



Slika 7: Karta sliva Wasseralm izvora

„Austrian Journal of Earth Sciences“ nudi podatke o istraživanom području koji će biti spomenuti u nastavku. Uglavnom dolomitno slivno područje *Wasseralmquelle-a* (na nadmorskoj visini od 802 m) nalazi se u sjeveroistočnom dijelu krškog masiva *Schneetalpe*, oko 100 km jugozapadno od Beča, u sjevernom dijelu vapnenačkih Alpa. Najviša točka u slivnom području ima visinu od 1828 m, što ukazuje da je krški vapnenački vodonosnik, koji je istaknut s nepropusnim škriljavcem i pješčenjakom, ima debljinu od oko 1000 m. Srednja godišnja količina oborina u ovom području je 1058 mm, dok je prosječan gubitak isparavanja 374 mm. Slivno područje, koji mjeri 6,7 km<sup>2</sup> prema „Austrian Journal of Earth Sciences“, dominira dijelom krškog masiva *Schneetalpe* i strmim, uskim dolinama, s malo vegetacije. Prosječno otjecanje iz *Wasseralmquelle-a* je oko 200 l/s, s minimumom zimi ispod 100 l/s i maksimumom ljeti od više od 1000 l/s („dolomitski“ izvor) [3].

## 2.3 BAZA PODATAKA

Podaci koji su dostupni za početak ovog rada su podaci oborine, temperature i otjecanja. Izvor podataka temperature je ERA-Privremeni projekt (računske vrijednosti meteoroloških modela). Podaci oborine (HD Donja Austrija) i otjecanja (Municipal Department 31, Donja Austrija) su dostupni na internetu za javnost na službenoj stranici Federalnog ministarstva poljoprivrede, šumarstva, okoliša i vodnog gospodarstva (eHYD).



Prvi korak bio je provjeriti postojeću bazu podataka i generirati novi *Excel sheet* s odgovarajućim komponentama: P (oborina), T (temperatura) i Q (otjecanje) za razdoblje preklapanja. Vremenski period preklapanja je od 01.01.1995. do 31.12.2012. tj. 18 godina (postoje podaci za oborinu od 01.01.1975.-31.12.2012., za temperaturu od 01.01.1979.-31.12.2014, za otjecanje od 01.01.1995.-30.12.2012.).

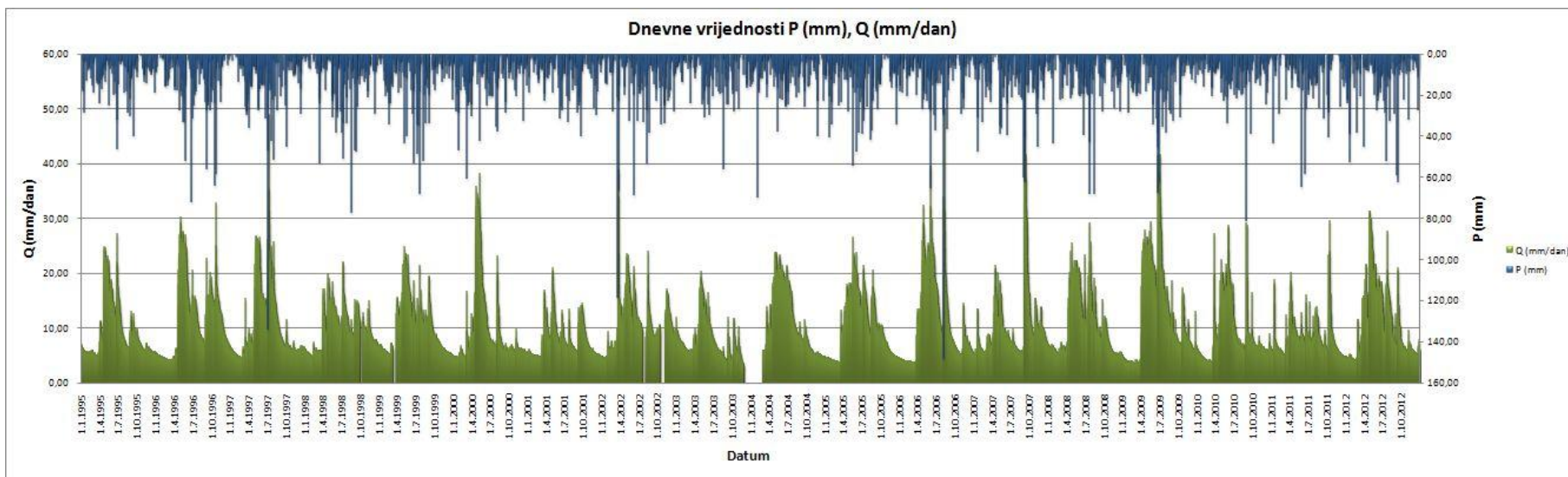
Prije nego što smo mogli izračunati mjesečne podatke bilo je potrebno napraviti neka ažuriranja podataka. Ažuriranje podataka oborine postignuto je tako da smo vrijednosti koje nedostaju nadopunili koristeći linearnu interpolaciju.

Dane su četiri dnevne vrijednosti temperature za svaki dan (za 6:00h, 12:00h, 18:00h i 24:00h), tako da smo prvo izračunali dnevne vrijednosti temperature. Budući da su podaci temperature dati za nadmorsku visinu od 590 m.n.m. (metara nad morem) bilo je potrebno napraviti izračun vrijednosti temperature za odgovarajuću visinu. Maksimalna visina sliva s geografske karte je 1600 m.n.m., a minimalna je 900 m.n.m. Prema tim vrijednostima prosječna nadmorska visina je 1250 m.n.m. te su za tu visinu izračunate nove vrijednosti temperature, također, koristeći linearnu interpolaciju.

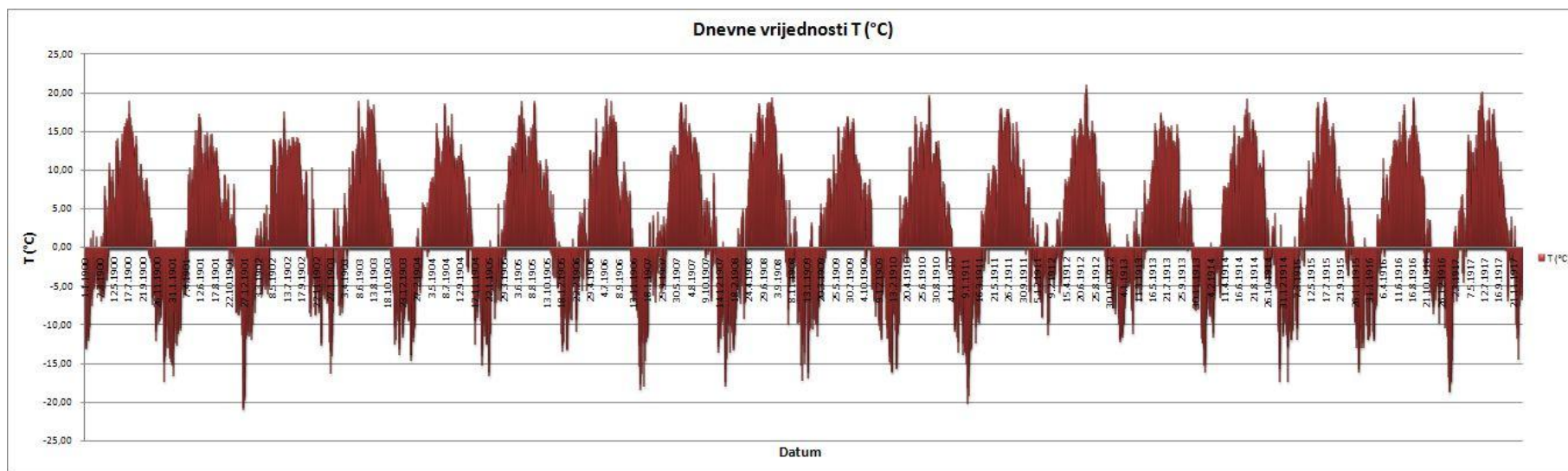
Podaci otjecanja su dobiveni s određenim vrijednostima koje nedostaju. Gdje nedostaje manje od 10 dana podataka, koristi se linearna interpolacija da bi se dobili podaci koji nedostaju. Gdje nedostaje više od 10 dana linearna interpolacija nije najbolje rješenje, te se za taj mjesec uzima srednja vrijednost tog mjeseca svih godina (npr. ako nedostaje mjesec Listopad, uzimamo srednju vrijednost svih Listopada u našem vremenskom periodu). Ostala ažuriranja za podatke otjecanja su pretvaranje apsolutnog otjecanja (l/s) u specifično otjecanje (mm/dan) za prvu metodu, imajući u vidu da se slivna površina procjenjuje na 2,08 km<sup>2</sup>, što je manje od površine navedene u austrijskom časopisu „Austrian Journal of Earth Sciences“ (l/s=0,0864\*2,08mm/dan).

## 2.4 DNEVNE, MJESEČNE I GODIŠNJE VRIJEDNOSTI

Ovo potpoglavlje sadrži tablice i grafove koji predstavljaju dnevne, mjesečne i godišnje podatke dobivene pomoću podataka za razdoblje od 18 godina (1995-2012). Zamijenjene vrijednosti koje nedostaju te su označene žutom bojom u tablicama, mogu se vidjeti na Grafu 1 koji pokazuje dnevne vrijednosti otjecanje i oborina. Na Grafu 2 prikazane su dnevne vrijednosti temperature dobivene za srednju nadmorsku visinu slivnog područja. Tablica 1 i Graf 3 prikazuju mjesečne vrijednosti oborina s minimalnim, maksimalnim te srednjim vrijednostima. Mjesečne vrijednosti temperature s minimalnim, maksimalnim te srednjim vrijednostima prikazane su u Tablici 2 i na Grafu 4. Prosječne vrijednosti mjesečnog otjecanja, koje se koriste kao zamjena gdje nedostaje više od 10 dana podataka, prikazani su na dnu Tablice 4, zajedno s minimalnim i maksimalnim vrijednostima, a grafički su prikazane na Grafu 5. Godišnje vrijednosti oborine, temperature i otjecanja su prikazani u istoj tablici i na istom grafu (Tablica 4 i Graf 6), kako bi lakše mogli uočiti povezanost, npr. vidimo da nema suhog perioda jer linija oborina ne pada ispod linije temperature. Na Grafu 7 su prikazane vrijednosti godišnje oborine i otjecanja te je napravljena linearna regresija između tih podataka. Linearna regresija opisuje vezu između varijabli za koje važi da promjena vrijednosti jedne približno odgovara jednakoj linearnoj promjeni druge varijable. U ovom slučaju povećanje oborine će uzrokovati jednako linearno povećanje otjecanja.



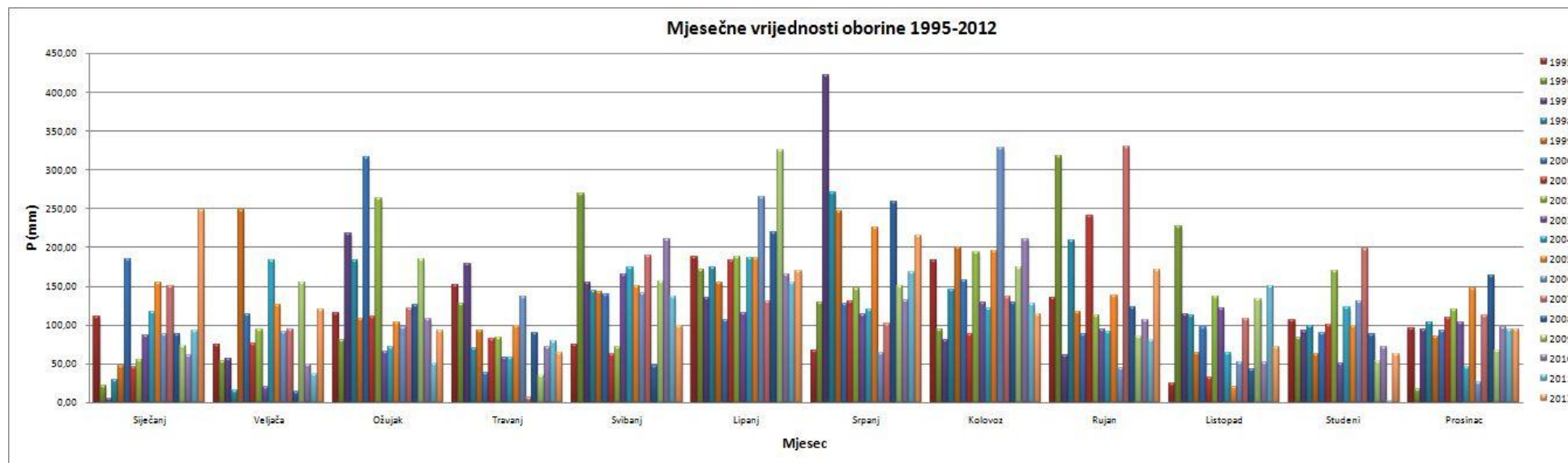
Graf 1: Dnevne vrijednosti oborine i otjecanja



Graf 2: Dnevne vrijednosti temperature

MJESEČNE VRIJEDNOSTI OBORINE P (mm)															
Godina/Mjesec	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Listopad	Studeni	Prosinac	MIN	MAX	SR. VRIJEDNOST
1995	111,40	73,80	116,00	151,00	74,60	187,20	66,30	183,90	134,90	23,90	105,9	96,10	23,90	187,20	110,42
1996	22,20	53,60	80,00	127,60	270,10	171,70	129,40	93,70	317,60	227,80	83,40	17,00	17,00	317,60	132,84
1997	4,90	57,00	218,30	178,30	154,80	134,90	422,10	80,90	60,70	114,40	93,30	94,40	4,90	422,10	134,50
1998	29,70	15,80	182,60	70,10	144,60	173,60	270,30	144,90	209,70	112,20	98,50	103,40	15,80	270,30	129,62
1999	47,70	248,20	108,00	92,60	143,10	155,20	246,10	199,30	116,40	64,10	63,10	85,30	47,70	248,20	130,76
2000	184,60	113,60	315,70	38,50	139,80	106,30	126,80	158,40	87,50	97,90	88,90	92,70	38,50	315,70	129,23
2001	46,20	76,10	110,65	81,40	62,50	183,90	130,90	87,50	241,40	32,80	100,80	109,60	32,80	241,40	105,31
2002	54,60	94,00	263,10	83,90	71,30	188,50	146,90	194,40	112,50	136,60	169,60	120,10	54,60	263,10	136,29
2003	86,00	20,20	66,00	58,50	164,80	115,90	113,10	129,20	94,60	120,80	50,90	102,90	20,20	164,80	93,58
2004	117,00	182,60	70,80	58,20	174,60	187,10	119,70	121,40	91,50	63,60	123,60	45,10	45,10	187,10	112,93
2005	153,90	126,40	103,30	99,20	150,50	185,70	225,10	195,70	137,90	20,40	99,30	146,40	20,40	225,10	136,98
2006	88,20	91,85	96,70	136,10	141,50	264,80	64,20	328,85	45,00	52,20	130,20	25,70	25,70	328,85	122,11
2007	149,90	94,80	121,90	6,50	188,80	130,00	101,30	136,60	330,20	107,70	197,90	112,45	6,50	330,20	139,84
2008	88,50	14,40	125,30	90,30	47,20	219,00	258,20	129,40	123,50	42,80	87,40	164,05	14,40	258,20	115,84
2009	73,40	154,20	185,50	34,80	155,90	326,20	149,80	174,60	84,40	133,80	52,70	67,00	34,80	326,20	132,69
2010	60,70	49,30	108,30	71,30	211,30	165,80	131,50	210,60	105,90	51,50	71,20	96,80	49,30	211,30	111,18
2011	93,30	36,60	50,90	79,70	136,40	155,20	168,00	127,10	80,10	150,20	0,30	94,90	0,30	168,00	97,73
2012	248,30	119,70	93,10	63,50	98,90	170,20	215,20	114,10	171,00	71,00	63,00	94,80	63,00	248,30	126,90
MIN	4,90	14,40	50,90	6,50	47,20	106,30	64,20	80,90	45,00	20,40	0,30	17,00	0,30	164,80	93,58
MAX	248,30	248,20	315,70	178,30	270,10	326,20	422,10	328,85	330,20	227,80	197,90	164,05	63,00	422,10	139,84
SR. VRIJEDNOST	92,25	90,12	134,23	84,53	140,59	178,96	171,38	156,14	141,38	90,21	93,33	92,71	28,61	261,87	122,15

Tablica 1: Mjesečne vrijednosti oborine

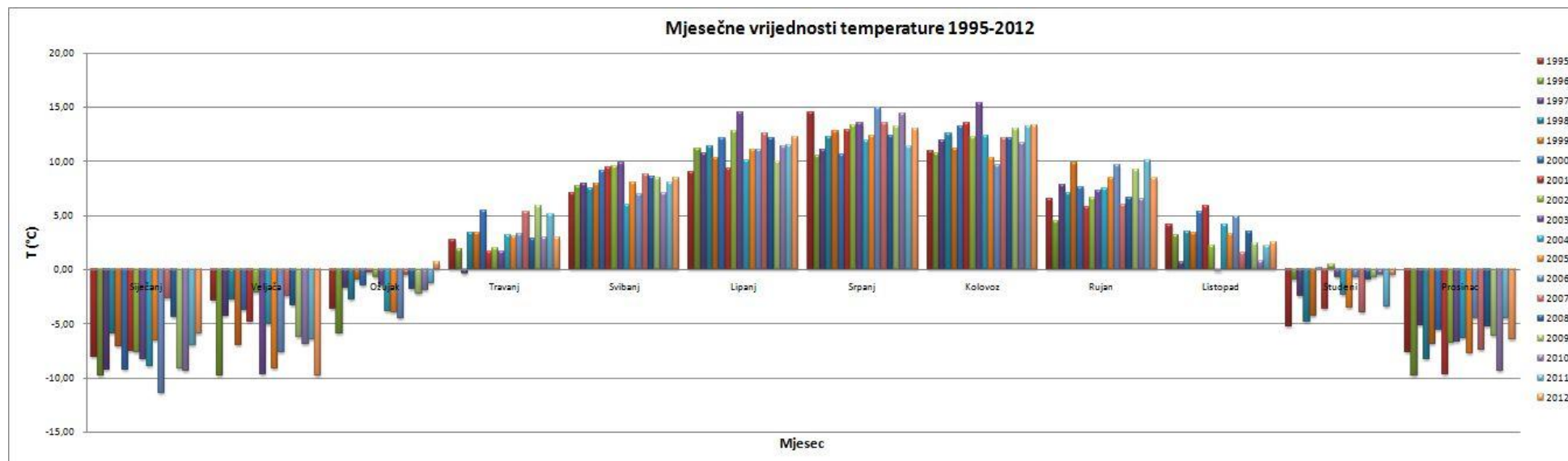


Graf 3: Mjesečne vrijednosti oborine



MJESEČNE VRIJEDNOSTI TEMPERATURE T (°C)															
Godina/Mjesec	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Listopad	Studeni	Prosinac	MIN	MAX	SR. VRIJEDNOST
1995	-8,03	-2,89	-3,64	2,76	7,04	9,00	14,50	10,95	6,49	4,18	-5,27	-7,61	-8,03	14,50	2,29
1996	-9,79	-9,73	-5,94	1,87	7,69	11,20	10,49	10,79	4,49	3,22	-0,94	-9,78	-9,79	11,20	1,13
1997	-9,25	-4,29	-1,72	-0,40	7,91	10,75	11,02	11,95	7,86	0,68	-2,39	-5,15	-9,25	11,95	2,25
1998	-5,92	-2,72	-2,75	3,43	7,52	11,40	12,23	12,56	7,09	3,49	-4,86	-8,32	-8,32	12,56	2,76
1999	-7,07	-6,96	-0,95	3,45	7,98	10,30	12,84	11,15	9,83	3,36	-4,26	-6,87	-7,07	12,84	2,73
2000	-9,23	-3,71	-1,51	5,46	9,10	12,11	10,66	13,21	7,58	5,33	0,06	-5,51	-9,23	13,21	3,63
2001	-7,49	-4,82	-0,31	1,64	9,48	9,36	12,88	13,54	5,79	5,87	-3,60	-9,64	-9,64	13,54	2,73
2002	-7,59	-2,14	-0,74	2,01	9,56	12,83	13,32	12,25	6,61	2,25	0,47	-6,72	-7,59	13,32	3,51
2003	-8,30	-9,65	-1,44	1,66	9,83	14,47	13,57	15,43	7,32	-0,16	-0,74	-6,60	-9,65	15,43	2,95
2004	-8,95	-5,03	-3,86	3,22	5,94	10,06	11,93	12,41	7,49	4,13	-2,33	-6,36	-8,95	12,41	2,39
2005	-6,58	-9,15	-3,94	3,02	8,01	11,10	12,41	10,31	8,51	3,32	-3,53	-7,78	-9,15	12,41	2,14
2006	-11,37	-7,67	-4,53	3,25	6,98	11,05	14,97	9,71	9,70	4,86	-0,76	-4,45	-11,37	14,97	2,65
2007	-2,70	-2,49	-0,51	5,36	8,77	12,56	13,53	12,09	5,95	1,61	-3,91	-7,41	-7,41	13,53	3,57
2008	-4,38	-3,31	-1,75	2,85	8,57	12,10	12,36	12,14	6,68	3,47	-0,91	-5,26	-5,26	12,36	3,55
2009	-9,14	-6,21	-2,17	5,84	8,52	9,99	13,23	13,05	9,23	2,38	-0,76	-6,13	-9,14	13,23	3,15
2010	-9,31	-6,91	-1,85	2,95	7,03	11,37	14,40	11,72	6,49	0,80	-0,49	-9,30	-9,31	14,40	2,24
2011	-6,96	-6,48	-1,28	5,14	8,01	11,54	11,39	13,25	10,04	2,17	-3,45	-4,50	-6,96	13,25	3,24
2012	-5,86	-9,80	0,75	2,96	8,42	12,23	13,04	13,36	8,45	2,49	-0,52	-6,40	-9,80	13,36	3,26
MIN	-11,37	-9,80	-5,94	-0,40	5,94	9,00	10,49	9,71	4,49	-0,16	-5,27	-9,78	-11,37	11,20	1,13
MAX	-2,70	-2,14	0,75	5,84	9,83	14,47	14,97	15,43	10,04	5,87	0,47	-4,45	-5,26	15,43	3,63
SR. VRIJEDNOST	-7,66	-5,77	-2,12	3,14	8,13	11,30	12,71	12,21	7,53	2,97	-2,12	-6,88	-8,66	13,25	2,79

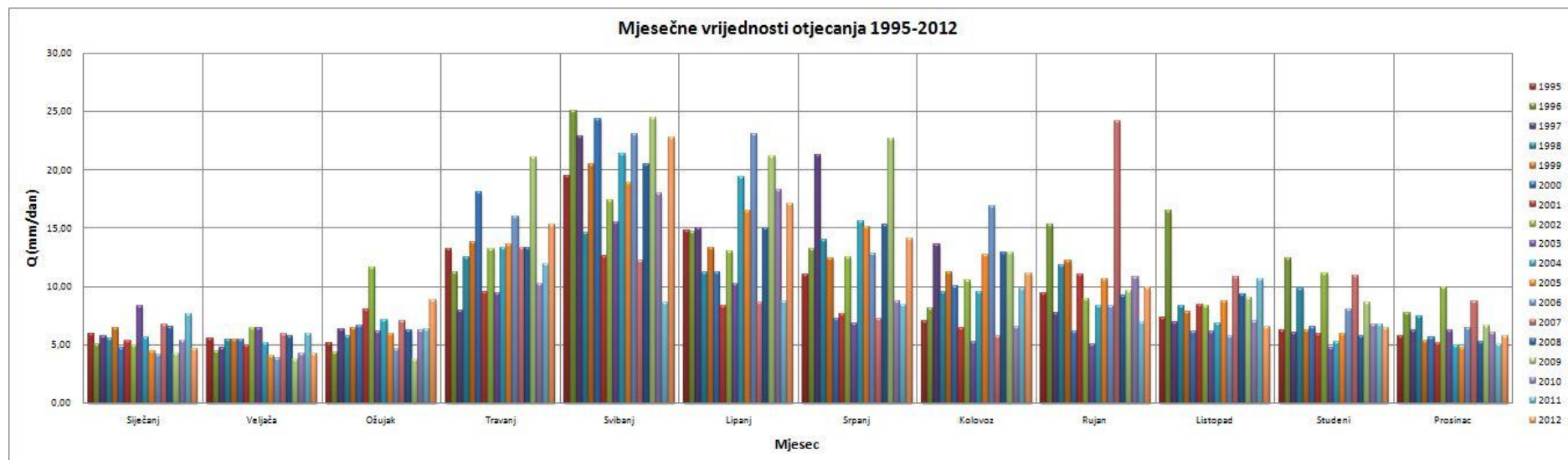
Tablica 2: Mjesečne vrijednosti temperature



Graf 4: Mjesečne vrijednosti temperature

MJESEČNE VRIJEDNOSTI OTJECANJA Q (mm/dan)															
Godina/Mjesec	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Listopad	Studeni	Prosinac	MIN	MAX	SR. VRIJEDNOST
1995	5,81	5,57	5,13	13,16	19,52	14,77	11,00	7,03	9,42	7,34	6,26	5,72	5,13	19,52	9,23
1996	5,05	4,48	4,31	11,19	25,01	14,67	13,21	8,09	15,28	16,53	12,43	7,76	4,31	25,01	11,50
1997	5,73	4,76	6,35	7,89	22,90	15,04	21,24	13,57	7,69	6,97	6,07	6,22	4,76	22,90	10,37
1998	5,54	5,44	5,71	12,47	14,58	11,25	13,96	9,47	11,78	8,37	9,82	7,39	5,44	14,58	9,65
1999	6,41	5,44	6,47	13,82	20,51	13,28	12,37	11,16	12,20	7,87	6,24	5,35	5,35	20,51	10,10
2000	4,75	5,39	6,59	18,10	24,31	11,21	7,21	10,03	6,17	6,09	6,53	5,66	4,75	24,31	9,34
2001	5,38	4,93	7,98	9,48	12,63	8,33	7,65	6,42	11,02	8,39	5,90	5,10	4,93	12,63	7,77
2002	4,97	6,43	11,61	13,25	17,41	12,96	12,55	10,54	8,92	8,37	11,14	9,93	4,97	17,41	10,67
2003	8,32	6,43	6,13	9,44	15,44	10,24	6,82	5,23	5,09	6,10	4,72	6,28	4,72	15,44	7,52
2004	5,64	5,09	7,17	13,33	21,42	19,42	15,55	9,55	8,35	6,83	5,27	4,94	4,94	21,42	10,21
2005	4,44	4,03	5,92	13,64	18,91	16,53	15,05	12,66	10,63	8,67	5,90	4,77	4,03	18,91	10,10
2006	4,19	3,89	4,66	16,03	23,09	23,04	12,80	16,86	8,31	5,78	8,00	6,44	3,89	23,09	11,09
2007	6,68	5,89	7,06	13,27	12,16	8,63	7,27	5,74	24,15	10,81	10,96	8,76	5,74	24,15	10,12
2008	6,56	5,69	6,23	13,27	20,49	15,04	15,29	12,87	9,18	9,30	5,74	5,26	5,26	20,49	10,41
2009	4,26	3,78	3,78	21,04	24,40	21,17	22,65	12,86	9,62	9,05	8,59	6,61	3,78	24,40	12,32
2010	5,38	4,20	6,23	10,21	17,94	18,33	8,69	6,56	10,77	7,01	6,72	6,08	4,20	18,33	9,01
2011	7,67	5,97	6,28	11,91	8,59	8,77	8,46	9,77	6,95	10,57	6,71	5,01	5,01	11,91	8,05
2012	4,65	4,22	8,83	15,26	22,75	17,05	14,07	11,16	9,94	6,57	6,45	5,71	4,22	22,75	10,55
MIN	4,19	3,78	3,78	7,89	8,59	8,33	6,82	5,23	5,09	5,78	4,72	4,77	3,78	11,91	7,52
MAX	8,32	6,43	11,61	21,04	25,01	23,04	22,65	16,86	24,15	16,53	12,43	9,93	5,74	25,01	12,32
SR. VRIJEDNOST	5,64	5,09	6,47	13,15	19,00	14,43	12,55	9,94	10,30	8,37	7,35	6,28	4,75	19,88	9,89

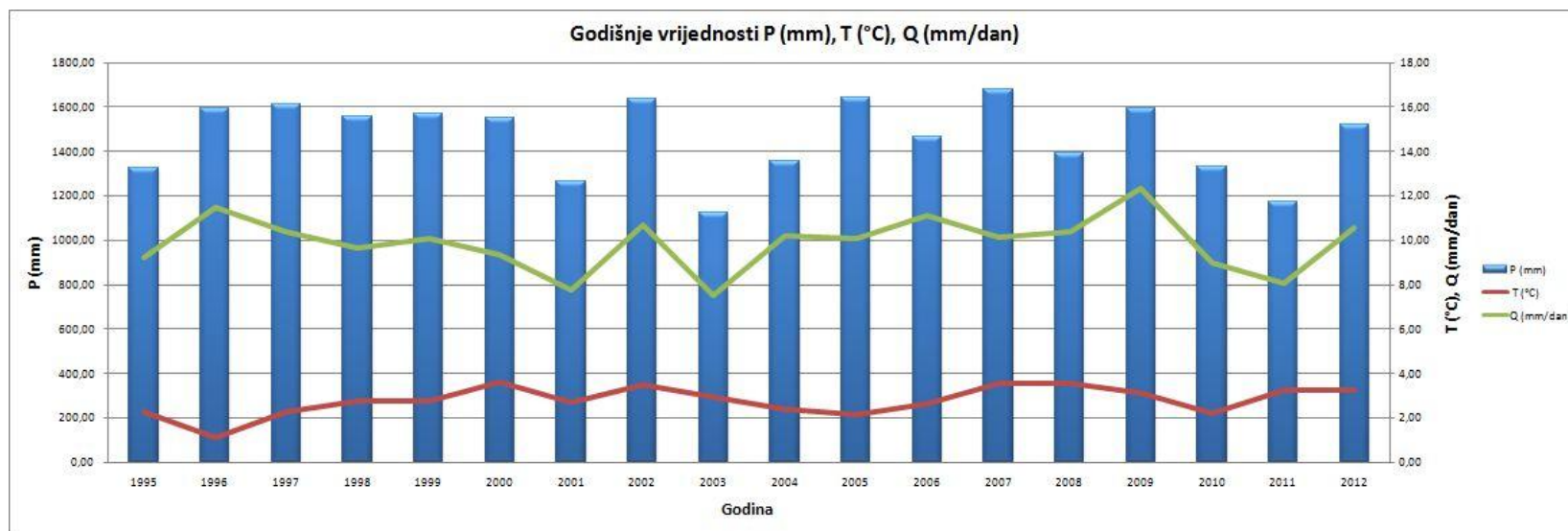
Tablica 3: Mjesečne vrijednosti otjecanja



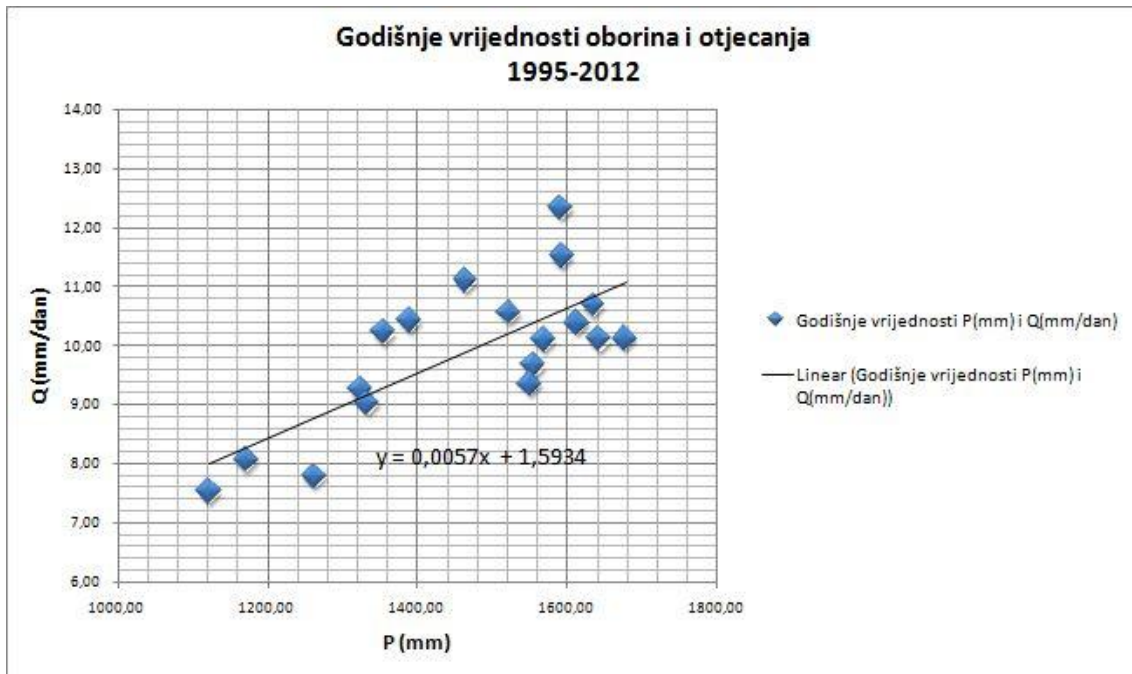
Graf 5: Mjesečne vrijednosti otjecanja

GODIŠNJE VRIJEDNOSTI			
Godina	P (mm)	T (°C)	Q (mm/dan)
1995	1325,00	2,29	9,23
1996	1594,10	1,13	11,50
1997	1614,00	2,25	10,37
1998	1555,40	2,76	9,65
1999	1569,10	2,73	10,10
2000	1550,70	3,63	9,34
2001	1263,75	2,73	7,77
2002	1635,50	3,51	10,67
2003	1122,90	2,95	7,52
2004	1355,20	2,39	10,21
2005	1643,80	2,14	10,10
2006	1465,30	2,65	11,09
2007	1678,05	3,57	10,12
2008	1390,05	3,55	10,41
2009	1592,30	3,15	12,32
2010	1334,20	2,24	9,01
2011	1172,70	3,24	8,05
2012	1522,80	3,26	10,55
MIN	1122,90	1,13	7,52
MAX	1678,05	3,63	12,32
SR.VRIJEDNOST	1465,83	2,79	9,89

Tablica 4: Godišnje vrijednosti oborine, temperature i otjecanja



Graf 6: Godišnje vrijednosti oborine, temperature i otjecanja



Graf 7: Linearna regresija godišnjih vrijednosti oborina i otjecanja

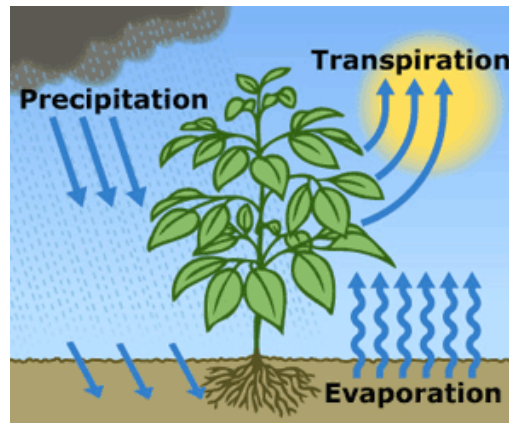
## 2.5 EVAPOTRANSPIRACIJA

Oborine su izvor sve vode koje se javlja u procesu evapotranspiracije. Evapotranspiracija je zbroj evaporacije (isparavanja) s terena, vodnih tijela, pa čak i s površine oceana te transpiracije kroz biljke. Također je možemo definirati kao gubitak vode u atmosferu (Slika 8).

Evaporacija je proces kojim voda isparava u zrak (mijenja se iz tekućine u plin). To je primarni način isparavanja vode. Istraživanja su pokazala da oceani, mora, jezera i rijeke pružaju gotovo 90 posto vlage u atmosferi putem isparavanja, a preostalih 10 posto pridonosi transpiracija biljaka.

Transpiracija predstavlja kretanje vode kroz biljku (od korijena do malih pora na donjoj strani lišća) i gubitak vode preko pare kroz lišće, ali i iz stabljike i cvjetova. Evapotranspiracija je vrlo važan dio ciklusa vode, a element (kao što je drvo) koji doprinosi evapotranspiraciji zovemo evapotranspirator.





Slika 8: Proces evapotranspiracije

Potencijalna evapotranspiracija predstavlja maksimalan iznos evapotranspiracije koji bi se ostvario u uvjetima dovoljne količine vlage (vlaga nije ograničena). Podaci potencijalne evapotranspiracije su dobiveni u FORTRAN-u. FORTRAN je proceduralni, imperativni programski jezik koji je bio razvijen tijekom 50-ih godina dvadesetog stoljeća, i koristi se većinom u znanstvene svrhe. Ime FORTRAN dobiveno je skraćivanjem engleske složenice *Formula Translation*. Ovaj programski jezik je posebno prilagođen brojčanom i znanstvenom računanju. Korištena je Thornthwait-ova formula (2) za procjenu potencijalne evapotranspiracije (ET ili ETP). Ova formula se temelji uglavnom na temperaturi uz prilagodbu za broj sati dnevnog svjetla.

$$ET = 16N_m \left( \frac{10\bar{T}_m}{I} \right)^a \quad (2)$$

Gdje je:  $ET$  procijenjena potencijalna evapotranspiracija,  $N_m$  je mjesečni faktor prilagodbe vezan za vrijeme dnevnog svjetla,  $T_m$  je srednja mjesečna temperatura,  $I$  je godišnji indeks topline dobiven preko formule:  $I = \sum i_m = \sum \left( \frac{T_m}{5} \right)^{1,5}$  for  $m = 1, \dots, 12$ ;  $i$

$$a = 6,7 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,7 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,8 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49.$$

## 2.6 BILANCA (RAVNOTEŽA) VODE

Ciklus vode, također poznat kao hidrološki ciklus ili H<sub>2</sub>O ciklus (Slika 9), opisuje kontinuirano kretanje vode na, iznad i ispod površine zemlje. Glavni procesi hidrološkog ciklusa su:

- Evaporacija
- Kondenzacija
- Oborine
- Podzemna voda
- Transpiracija
- Otjecanje
- Snijeg.





Slika 9: Ciklus vode (preuzeto sa stranice U.S. Geological Survey)

Jednadžba bilance vode (3) se koristi za opisivanje toka vode u hidrološkom ciklusu. Ona opisuje kretanje vode kao zatvoreni sustav gdje voda prelazi iz jednog u drugi dio. Opća jednadžba bilance vode je:

$$Q = P - ET \pm \Delta S \quad (3)$$

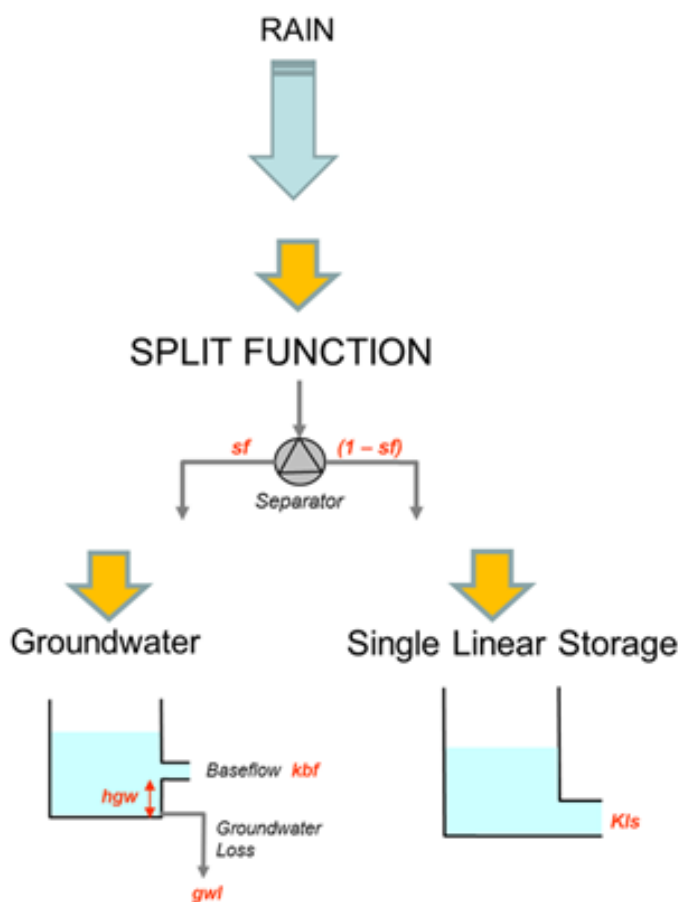
Gdje je,  $Q$  otjecanje,  $P$  je oborina,  $ET$  je evapotranspiracija i  $\Delta S$  je promjena kapaciteta. U prvoj metodi rezultati će se pokazati s i bez baznog toka, kako bi se vidjelo na koji način kapacitet utječe na konačne rezultate.

### 3. MODEL VODNE BILANCE (BOKU)

#### 3.1 JEDNOSTAVAN (KONCEPTUALNI) MODEL

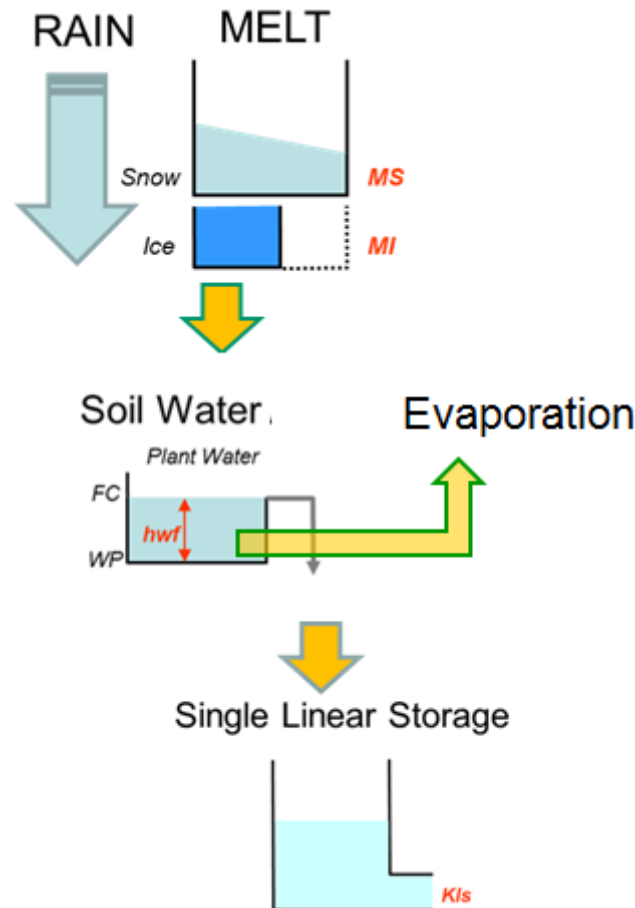
Provedba jednostavnih determinističkih hidroloških modela se vrši pomoću bilance vode uz klimatske promjene. Klimatske promjene se mogu pojaviti uzrokovane ovim promjenama: porastom temperature, smjenom oborina, korištenjem zemljišta i zagađenjem zraka. Promjene količine oborina i temperature zraka mogu uzrokovati mali poremećaj u bilanci vode. Oborine-otjecanje (*rainfall-runoff*) modeli uzimaju u obzir mnoge procese koji bi trebali biti uključeni s mnogo parametara. Ti parametri opisuju karakteristike sliva na tom određenom mjestu. To zahtijeva puno podataka na raspolaganju, što nije uvijek moguće (najčešće nije moguće). To je razlog zašto je lakše pojednostaviti model fokusirajući se samo na najrelevantnije procese. I istog razloga u ovom radu je korišten jednostavan model.

Većina modela dijeli oborinu na vodu koja ide u zemlju (podzemnu vodu) i vodu koja otječe (otjecanje) (Slika 10), ali jednostavni model čini sve još jednostavnijim.



Slika 10: Prikaz jednostavnog procesa koji se koristi na BOKU (Universität für Bodenkultur Wien, Austrija) Model uzima u obzir prethodnu oborinu, otopljeni snijeg i dijeli ih na sporo (podzemne vode) i brzo (linearno skladištenje) otjecanje [4]

Jednostavan model opisuje oborinu i otopljeni snijeg kao jednu vodu koja ide u tlo (skladištenje), od koje dio ispari, a ako je skladište tla za pohranu puno, ostvaruje se višak koji čini jednostavnu linearnu pohranu. Ova jednostavna računaska metoda uzima sljedeće komponente u obzir: akumulirani i otopljeni snijeg, potencijalnu evapotranspiraciju, kapacitet tla za pohranu vode i stvarnu evapotranspiraciju, linearnu memoriju i bazno otjecanje [4] [5].



Slika 11: Dijelovi jednostavnog modela [5]

### 3.2 ULAZNI PODACI I PARAMETRI

Ulazni podaci za jednostavni model bilance vode su:

- Oborina  $P$  (mm/dan)
- Evapotranspiracija  $ET$  (mm/dan)
- Temperatura  $T$  ( $^{\circ}C$ )
- Otjecanje  $Q$  (mm/dan).

Te se četiri glavne komponente (oborina, evapotranspiracija, temperatura i otjecanje) uz parametre koriste za izračunavanje bilance vode. Koristimo 10 parametara koji su prikazani u Tablici 5 i Tablici 6 s definiranim vrijednostima koje su najbolje odabrani izbor za naše ulazne podatke.

Lista parametara:			Lista parametara:		
	<b>Snijeg:</b>			<b>Snijeg:</b>	
1	Day-Degree-Factor (mm°C-1 d-1):	3,00	1	Day-Degree-Factor (mm°C-1 d-1):	4,00
2	Initial Snow water equivalent (mm):	20,00	2	Initial Snow water equivalent (mm):	30,00
	<b>Transpiracija:</b>			<b>Transpiracija:</b>	
3	Max. root storage (mm):	30,00	3	Max. root storage (mm):	40,00
4	Reduction factor:	0,50	4	Reduction factor:	0,50
5	Initial water content (mm):	20,00	5	Initial water content (mm):	40,00
	<b>Linearno skladištenje:</b>			<b>Linearno skladištenje:</b>	
6	Recession (storage) constant:	27,00	6	Recession (storage) constant:	60,00
7	Initial water content (mm):	25	7	Initial water content (mm):	60
8	Initial discharge (mm/d):	0,93	8	Initial discharge (mm/d):	1,00
9	Base flow (mm):	1,50	9	Base flow (mm):	0,00
10	Area factor:	2,50	10	Area factor:	4,00

Tablica 5: Popis parametara s baznim tokom      Tablica 6: Popis parametara bez baznog toka

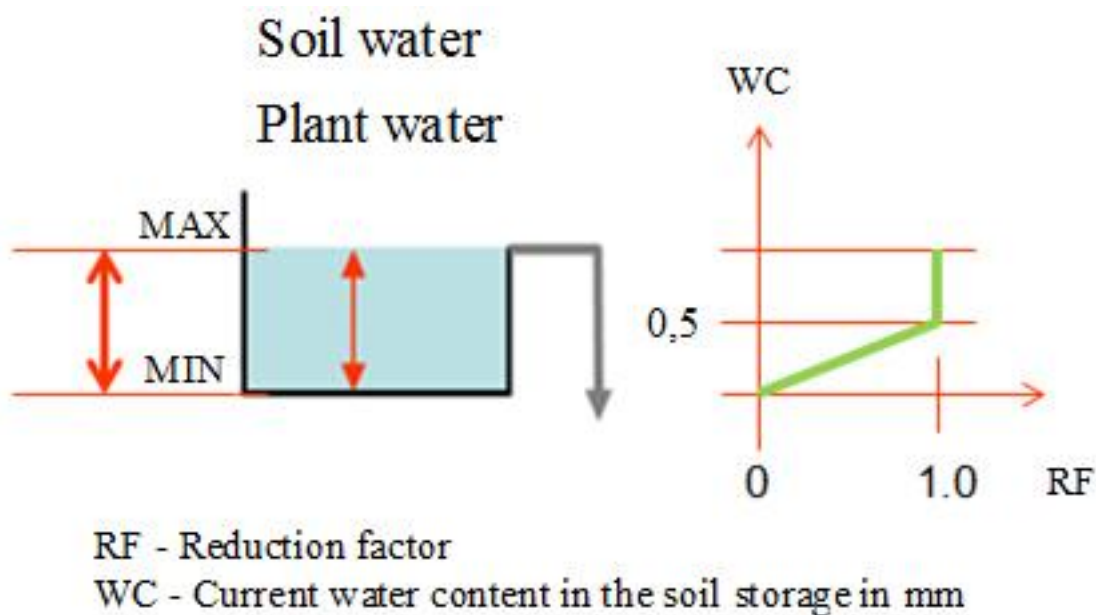
Day-Degree Factor (DDF) je količina otopljenog snijega koja se javlja samo kada je dnevna temperatura veća od 0°C. Izražava se u milimetrima vodnog ekvivalenta po stupnju dnevno (mm vodnog ekvivalenta °C<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>). Ovaj parametar može varirati zbog različitih karakteristika energetskih bilanci poput brzine vjetera i osjetljivog toplinskog toka. Lokalni razmjer vrijednosti ovog parametra iznosi od 1 do 10 mm vodnog ekvivalenta °C<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>. Pomorska mjesta, s većim brzinama vjetera i višom relativnom vlagom, imaju veću vrijednost ovog faktora zbog latentne topline kondenzacije i osjetljivog prijenosa topline. U suhim, kontinentalnim krajevima, s visokom radijacijom gdje se otopljeni snijeg javlja kroz sublimaciju, nalazimo nisku vrijednost faktora, jer sublimacija troši velike količine energije, što znači manje energije je raspoloživo za otapanje. Smanjenjem ovog parametara, vidimo da se vrijednosti MELT-a, Met. Input-a, qMelt-a, Root storage-a i Exceedance-a također smanjuju, a SWE i ETA su u porastu. Povećanje ovog parametra ima obrnuti učinak.

Snow Water Equivalent (SWE) je česta mjera količine vode sadržane u snijegu. Može se smatrati da je to zapravo dubina vode koja bi teoretski nastala ako se taj snijeg odmah otopi. Snow Water Equivalent je proizvod dubine snijega i gustoće snijega. Initial (početni) Snow Water Equivalent je vrijednost ovog parametra na početku našeg vremenskog razdoblja. Smanjenjem ovog parametra, vidimo da se SWE, Root storage i Exceedance također smanjuju, a povećanjem se povećavaju.

Root storage (RS) je količina vode koja se nalazi u tlu, to je zapravo kapacitet tla. Ako je taj prostor pun (više oborine od slobodnog kapaciteta tla) voda će prijeći u jednostavno linearno skladištenje, a rezultat toga je otjecanje (Q). Maximum Root storage je maksimalni kapacitet vode koje tlo može primiti. Smanjenjem tog parametra, Root storage i ETA se također smanjuju, a Exceedance se povećava. Povećanje parametra ima obrnuti učinak.

Reduction factor (faktor redukcije) je bitan parametar u numeričkom modeliranju oborine koja uzrokuje otjecanje. To je hidrološki faktor koji određuje postotak nepropusne površine, a određuje se prema dijagramu na Slici 12. Smanjenje ili povećanje ovog parametra ne uzrokuje značajne promjene za ostale vrijednosti.

$ETA=RF*ETP$	Ako je	$0,5SW > WC > SW$	tada je	$ETA = ET (ETP)$
	Ako je	$0 < WC < 0,5SW$	tada je	$RF = 2*WC / SW$
	Ako je	$WC > SW$	tada se	javlja otjecanje.



Slika 12: Faktor redukcije [5]

Smanjenje oba Initial Water Content parametara (početnih sadržaja vode), vidimo da se Root storage, Exceedance i ETA također smanjuju, a povećanje uzrokuje povećanje istih vrijednosti.

Recession constant (konstanta recesije) je konstanta koja se koristi za smanjenje dnevne vrijednosti otjecanja. Smanjenje ili povećanje ovog parametar ne mijenja druge vrijednosti.

Smanjenje Initial discharge parametra (početnog otjecanja) ne uzrokuje značajne promjene drugih vrijednosti.

Base flow (bazni tok) je tok koji nije otjecanje, a posljedica je procjednih voda koje iz tla dolaze polako tijekom vremena u kanale. To je primarni izvor tekuće vode u potoku ili rijeci tijekom suhog vremena, ali ne smijemo ga zamijeniti s tokom podzemnih voda. Smanjenje ovog parametra nema značajne promjene za druge vrijednosti, ali značajno uzrokuje smanjenje vrijednosti na grafu. Povećanje parametra ima obrnuti učinak.

### 3.3 KORACI IZRAČUNA

Vremensko razdoblje od 18 godina je podijeljeno u dva dijela, jedan od 01.01.1995. do 31.12.2004., a drugi od 01.01.2005. do 31.12.2012. Razlog za to je da bi utvrdili najbolje vrijednosti parametara pomoću kalibracijskog (prvog) dijela te ih primijenili na validacijski (drugi) dio i tako provjerili točnost parametara. Tablica 7 prikazuju proračun dobivanja rezultata jednostavnog modela napravljen u Excel-u.





Prvi korak je izračunavanje akumuliranog i otopljenog snijega. To su članovi čije je računanje opisano u nastavku sa svim potrebnim formulama:

- 1)  $P_{eff}$  je efektivna oborina ili vlažna kiša koja se javlja samo kada je temperatura  $T > 0^{\circ}\text{C}$ . Ako je temperatura  $T < 0^{\circ}\text{C}$  tada je  $P_{eff} = 0$ , tj. nema efektivne oborine, a ako je  $T > 0^{\circ}\text{C}$  tada je  $P_{eff} = P$ . Excel formula je:

$$P_{eff} = IF(T < 0; 0; P) \quad (4)$$

- 2) MELT je potencijalni (mogući) otopljeni snijeg koji je izračunat *day degree* metodom. Ako je temperatura  $T > 0^{\circ}\text{C}$  tada postoji MELT vrijednost koja je produkt temperature (T) i day degree faktora (DDF). Ako je temperatura  $T < 0^{\circ}\text{C}$  MELT ne postoji.

$$MELT = IF(T \geq 0; DDF \cdot T; 0) \quad (5)$$

- 3) SWE (snow water equivalent) je snijeg čiji je ekvivalent voda. SWE+ je korekcija SWE na pozitivne vrijednosti. Excel formule su:

$$SWE = IF(T < 0; Initial\ SWE + P; Initial\ SWE - MELT) \rightarrow \text{for the first value} \quad (6)$$

$$SWE_n = IF[T < 0; SWE_{n-1} + P_n; IF(SWE_{n-1} - MELT_n < 0; 0; SWE_{n-1} - MELT_n)] \quad (7)$$

$$SWE+ = IF(SWE < 0; 0; SWE) \quad (8)$$

- 4) Met. Input je ulazna meteorološka vrijednost. To je suma efektivne oborine i potencijalno otopljenog snijega. Ako nema potencijalno otopljenog snijega ova vrijednost će biti jednaka vrijednosti efektivne oborine.

$$Met.\ Input = IF(SWE+ > 0; P_{eff} + MELT; P_{eff}) \quad (9)$$

- 5)  $qMelt$  je otjecanje otopljenog snijega. To je razlika meteorološkog ulaza i efektivne oborine.

$$qMelt = Met.\ Input - P_{eff} \quad (10)$$

Drugi korak je izračun kapaciteta tla i stvarne evapotranspiracije. Ovo su objašnjenja ovih članova i njihove formule:

- 1) Kapacitet tla (Root storage) je stvarni sadržaj vode u tlu (ulaz čini Met. Input, a izlaz stvarna evapotranspiracija i višak, tj ETA i Exceedance). Excel formule su:

$$Root\ storage = Initial\ water\ content + Met.\ Input \rightarrow \text{for the first value} \quad (11)$$

$$Root\ storage_n = Root\ storage_{n-1} + Met.\ Input_n - Exceedance_{n-1} - ETA_{n-1} \quad (12)$$

- 2) ETA je stvarna evapotranspiracija. Stvarna evapotranspiracija je iznos isparavanja za stvarne (realne) uvjete vlažnosti. Ona je pod snažnim utjecajem trenutne vlažnosti tla (Root storage - RS).

$$ETA = IF \left( RS > maxRS \cdot Redcution\ factor; ET; \frac{ET \cdot 2 \cdot RS}{maxRS} \right) \quad (13)$$

- 3) Exceedance je višak koji otječe iz kapaciteta tla prema jednostavnom linearnom skladištu. Linearna memorija pretvara ulazni impuls (oborinu) u reakciju (otjecanje). Ova komponenta postoji samo kada je kapacitet tla veći od maksimalnog kapaciteta tla (kad je Root storage veći od maksimalnog Root storage-a).

$$Exceedance = IF(RS > maxRS; RS - maxRS; 0) \quad (14)$$

Konačni i najvažniji korak je izračun otjecanja (Q). Za ovaj dio ulazni podaci su oborina (P), otjecanje otopljenog snijega (qMelt), stvarna evapotranspiracija (ETA), višak (Exceedance) i otjecanje iz linearnog skladišta ( $Q_{lin, stor}$ ). U ovom koraku faktor površine se koristi za korekciju izračunatog otjecanja. Taj faktor nam pokazuje ako smo napravili grešku s pretpostavljenom površinom slivnog područja. Pretpostavljena površina slivnog područja za računanje otjecanja u našem radu je 2,08 km<sup>2</sup>, kao što je već spomenuto. Možemo vidjeti u Tablicama 7 i 8 da je faktor površine za prvi primjer 2,5, a za drugi (gdje ne postoji bazni tok) je 4,0. To znači da je pretpostavljena površina slivnog područja premala i da je podatak koji se nalazi u „Austrian Journal of Earth Sciences“ (površina slivnog područja 6,7 km<sup>2</sup>) točniji.

- 1)  $Q_{lin, stor}$  je otjecanje iz linearnog skladišta.

$$Q_{lin,stor} = Initial\ Q \cdot e^{-1/RC} + Exceedance(1 - e^{-1/RC}) \quad (15)$$

- 2)  $Q_{total}$  je ukupno otjecanje koje se javlja (plus bazni tok, ako takav postoji).

$$Q_{total} = Q_{lin,stor} + Base\ flow \quad (16)$$

- 3)  $Q_{obs}$  je promatrano otjecanje koje su dali ulazni podaci, tj. ovo su mjereni (stvarni) podaci.
- 4)  $Q_{comp, corr}$  je izračunato ukupno otjecanje s korekcijom faktora površine koje se uspoređuje s stvarnim (mjerenim) podacima, tj. simulirani podaci otjecanja.

$$Q_{comp,corr} = Q_{total} \cdot Area\ factor \quad (17)$$



### 3.4 REZULTATI

Ulazni podaci za jednostavni model su:

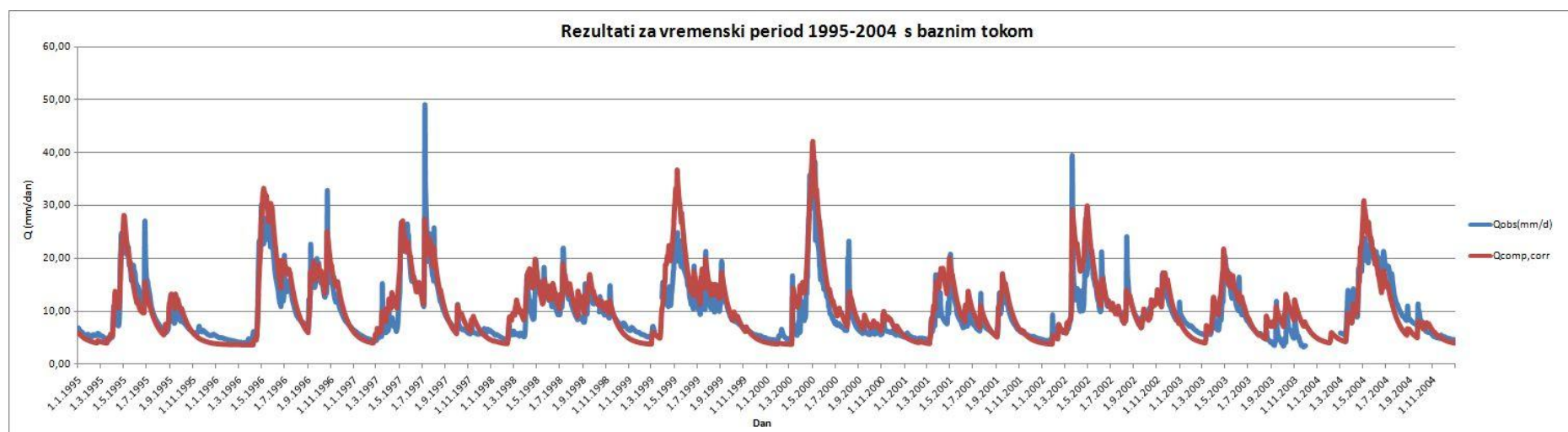
- Oborina (P)
- Otjecanje otopljenog snijega ( $q_{\text{Melt}}$ )
- Stvarna evapotranspiracija (ETA)
- Višak, istjecanje (Exceedance)
- Otjecanje iz linearnog skladišta ( $Q_{\text{lin, stor}}$ ).

Ti ulazni podaci nam daju rezultate prikazane na Grafovima 8-11. Parametri iz liste parametara se biraju prema korelaciji između  $Q_{\text{obs}}$  i  $Q_{\text{comp, corr}}$ , prema sumi  $Q_{\text{obs}}$  i  $Q_{\text{comp, corr}}$ , i prema podudaranju grafova tih dviju vrijednosti otjecanja. Kao što je već prije spomenuto, vremenski period je podijeljena u dva dijela (1995-2004, 2005-2012), a oba su primjera napravljena s baznim tokom i bez njega. Prvi dio, 1995-2004, predstavlja kalibracijski dio. Parametri su odabrani prema najboljim rezultatima za kalibracijski dio. Nakon toga, isti su parametri korišteni za drugi dio, 2004-2012, tzv. validacijski dio. Tada je zaključeno da su parametri dobro odabrani pošto je i validacijski dio imao veliku korelaciju te podudaranje grafova. Korelacija za sva četiri primjera nije manja od 0,85, što znači da je korelacija dobra. Kao što možemo vidjeti u Tablicama 8-11 sume  $Q_{\text{obs}}$  i  $Q_{\text{comp, corr}}$  su prilično jednake. Te tablice pokazuju, osim sume  $Q_{\text{obs}}$  i  $Q_{\text{comp, corr}}$ , korelacije između tih dviju vrijednosti.

Kalibracijski rezultati:

	Q <sub>lin.stor</sub>	Q <sub>total</sub>	Q <sub>obs(mm/d)</sub>	Q <sub>comp,corr</sub>		
SUM=	10012,15	15491,65	34367,63	38729,13	CORREL=	0,88

Tablica 8: Podaci otjecanja za razdoblje 1995-2004 s baznim tokom



Graf 8: Rezultati za vremenski period 1995-2004 s baznim tokom

	Qlin.stor	Qtotal	Qobs(mm/d)	Qcomp,corr		
SUM=	9865,89	9865,89	34367,63	39463,55		CORREL= 0,85

Tablica 9: Podaci otjecanja za razdoblje 1995-2004 bez baznog toka



Graf 9: Rezultati za vremenski period 1995-2004 bez baznog toka

Validacijski rezultati:

	Qlin.stor	Qtot, bf	Qobs(mm/d)	Qcomp,corr		
SUM=	9547,70	15027,20	35856,15	37568,00	CORREL=	0,87

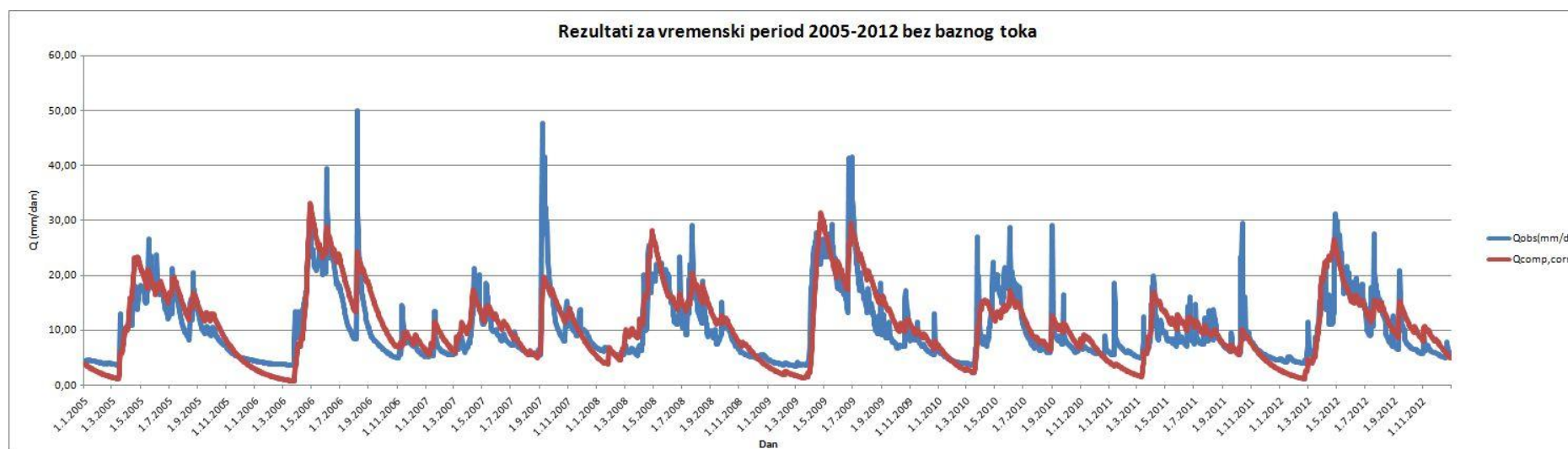
Tablica 10: Podaci otjecanja za razdoblje 2005-2012 s baznim tokom



Graf 10: Rezultati za vremenski period 2005-2012 s baznim tokom

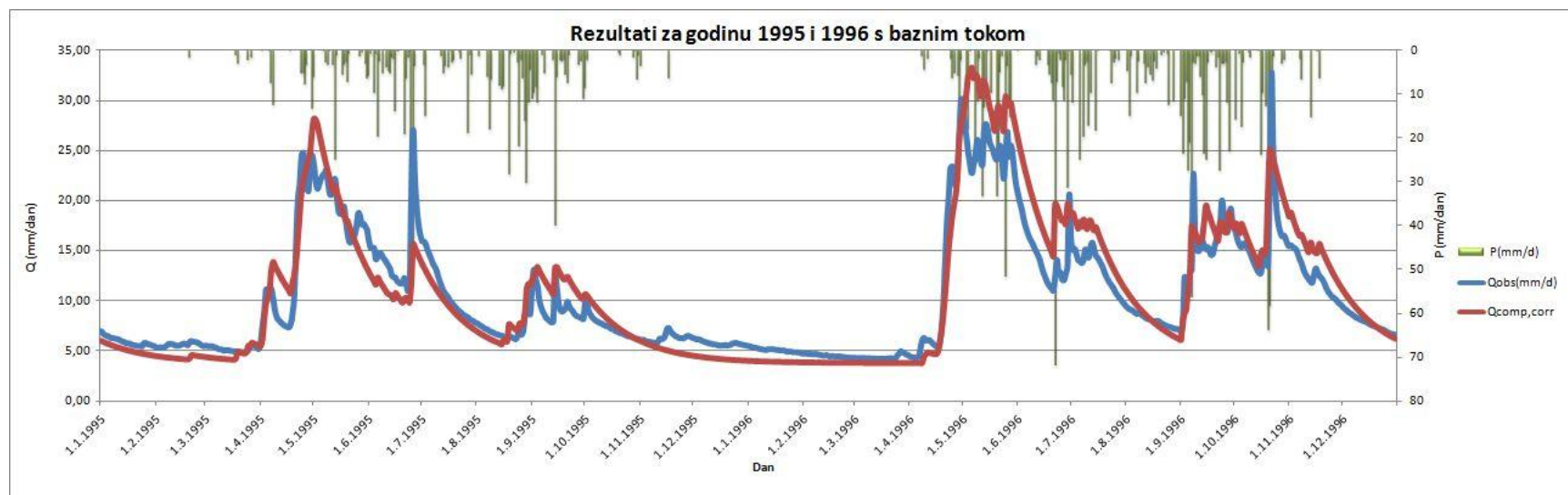
	Q <sub>lin.stor</sub>	Q <sub>tot, bf</sub>	Q <sub>obs(mm/d)</sub>	Q <sub>comp,corr</sub>		
SUM=	9412,26	9412,26	35856,15	37649,04	CORREL=	0,86

Tablica 11: Podaci otjecanja za razdoblje 2005-2012 bez baznog toka

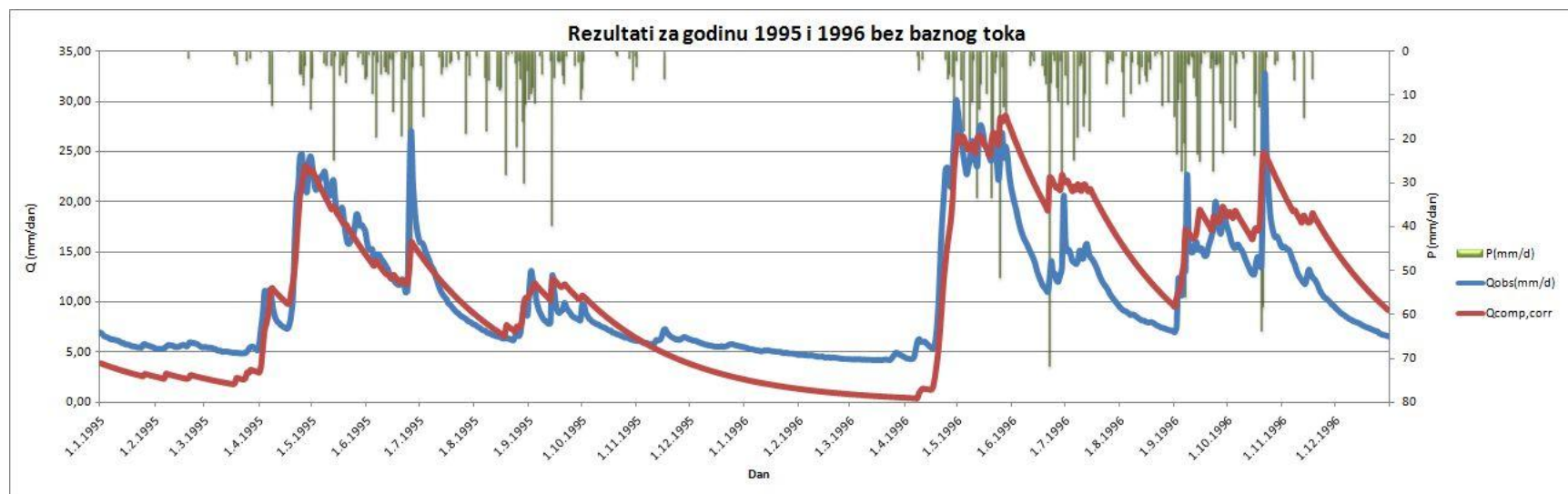


Graf 11: Rezultati za vremenski period 2005-2012 bez baznog toka

Radi bolje usporedbe Grafovi 12-29 prikazuju rezultate s vremenskim periodom od dvije godine, a sadrže  $Q_{obs}$  i  $Q_{comp, corr}$ , te podatke oborine.

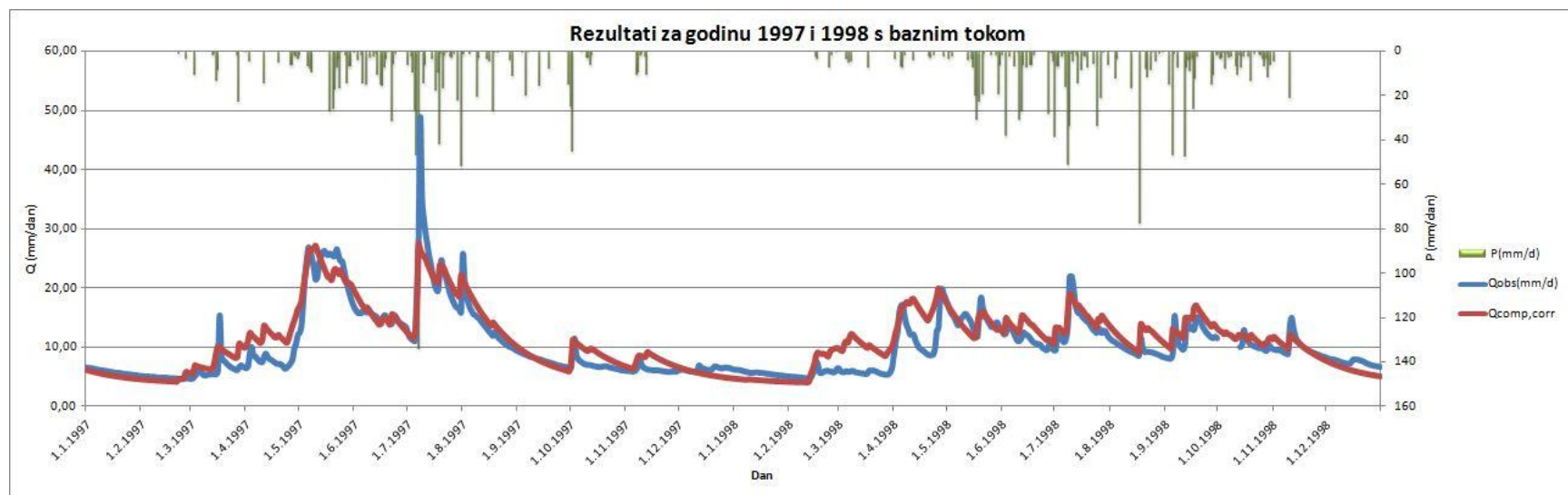


Graf 12: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1995. i 1996. s baznim tokom

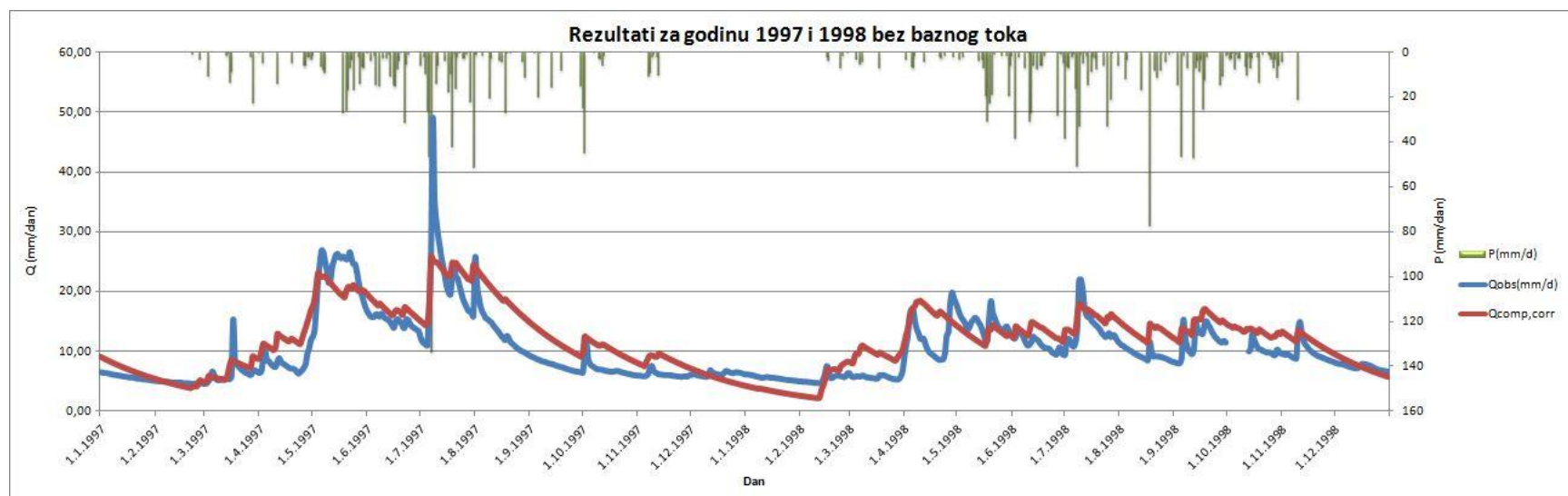


Graf 13: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1995. i 1996. bez baznog toka





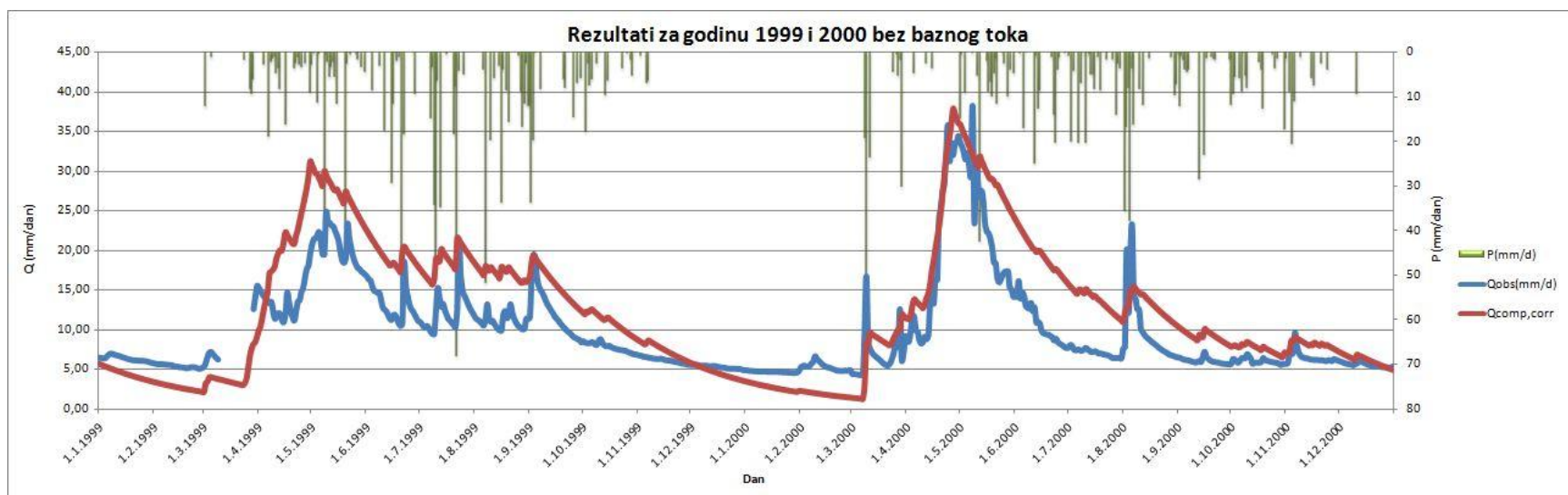
Graf 14: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1997. i 1998. s baznim tokom



Graf 15: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1997. i 1998. bez baznog toka

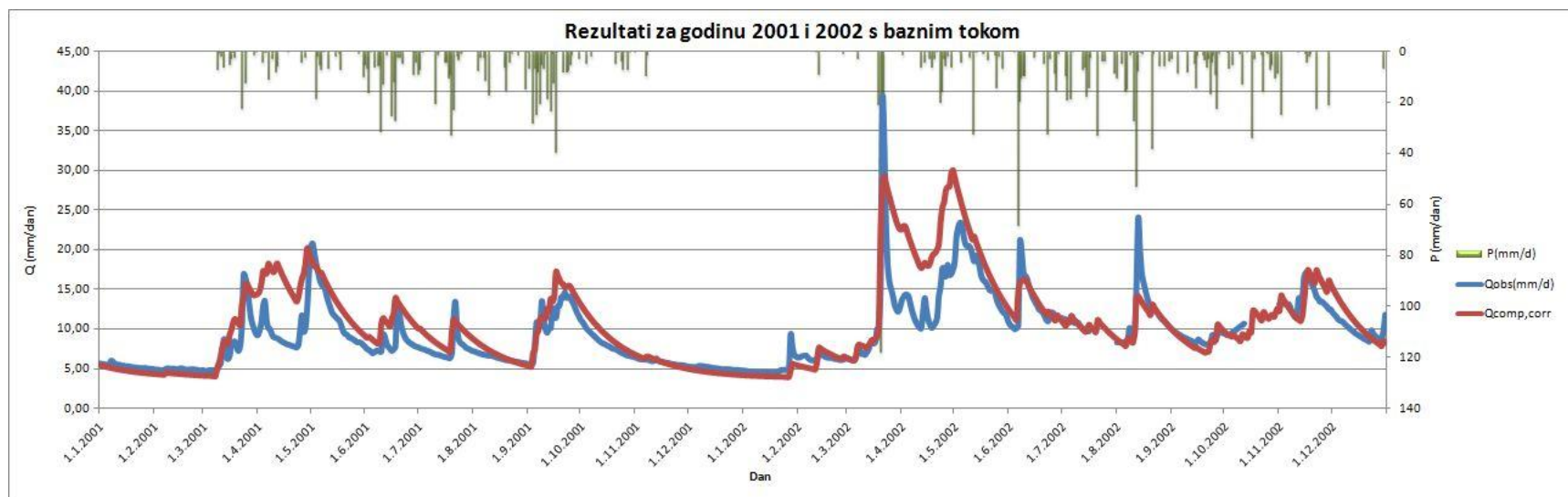


Graf 16: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1999. i 2000. s baznim tokom

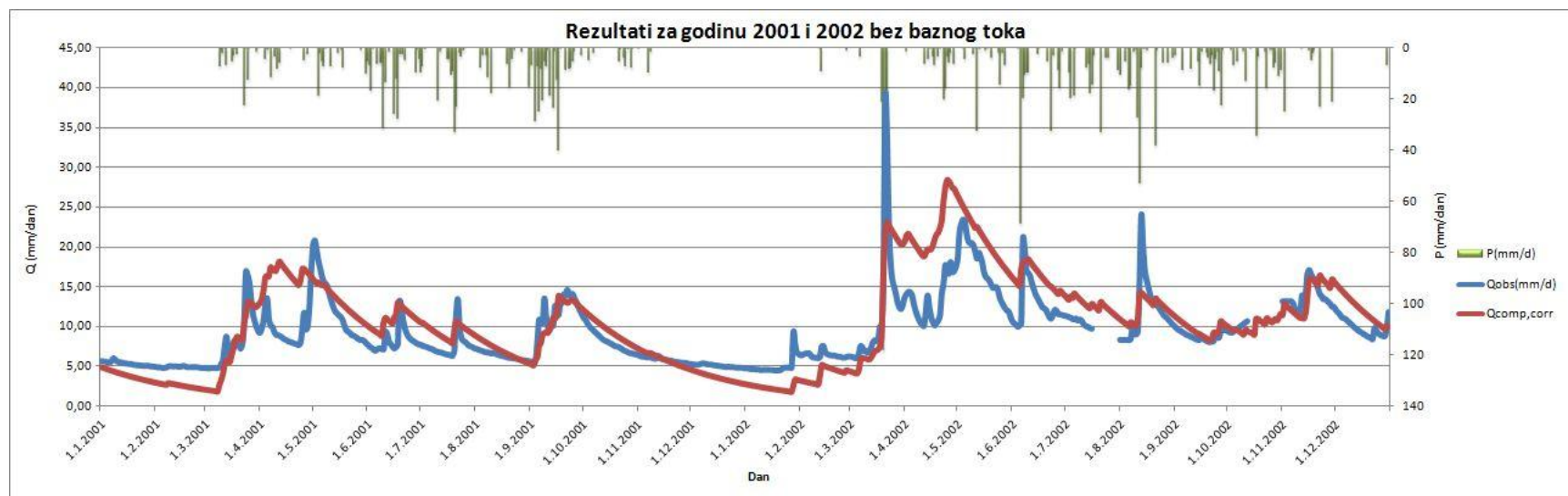


Graf 17: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1999. i 2000. bez baznog toka

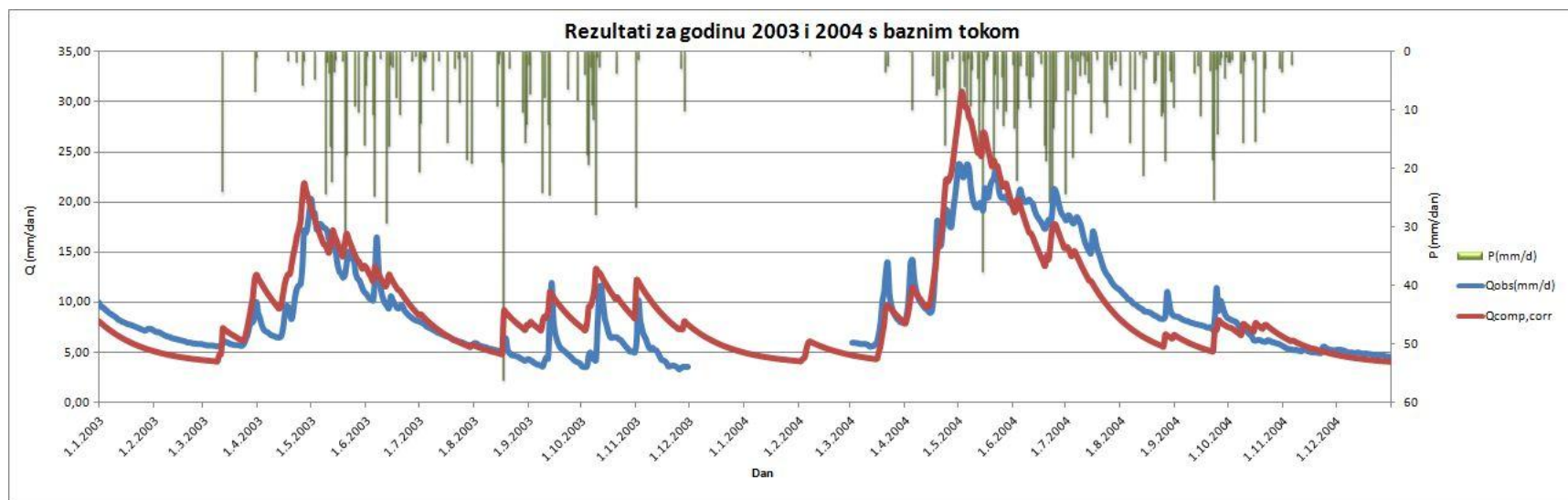




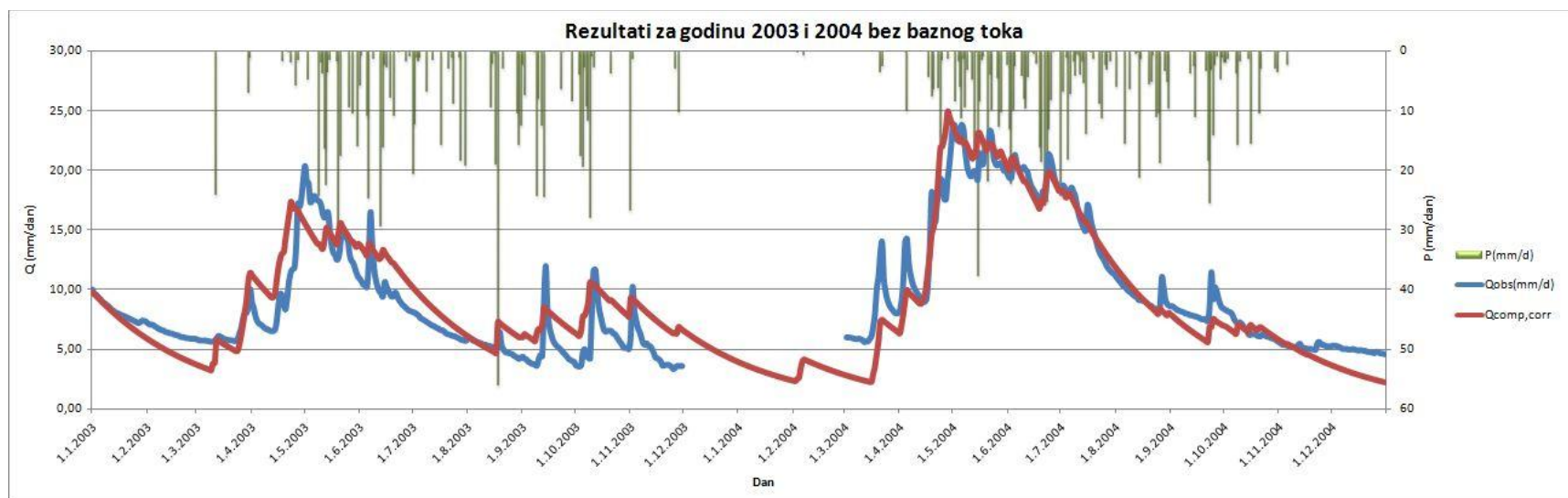
Graf 18: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2001. i 2002. s baznim tokom



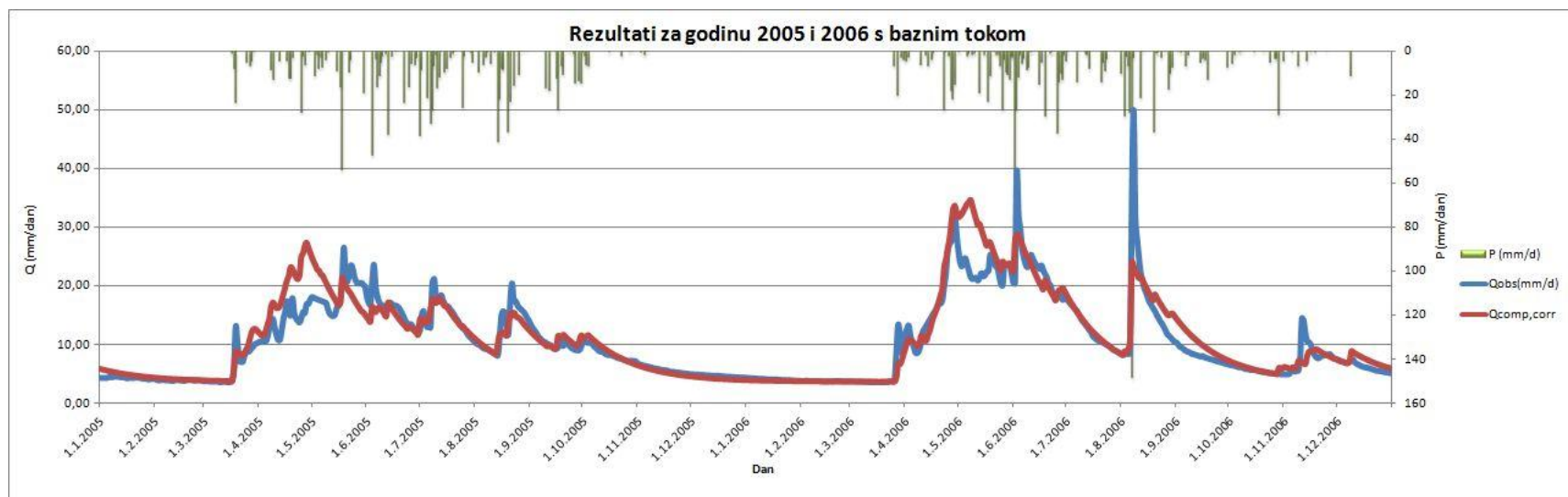
Graf 19: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2001. i 2002. bez baznog toka



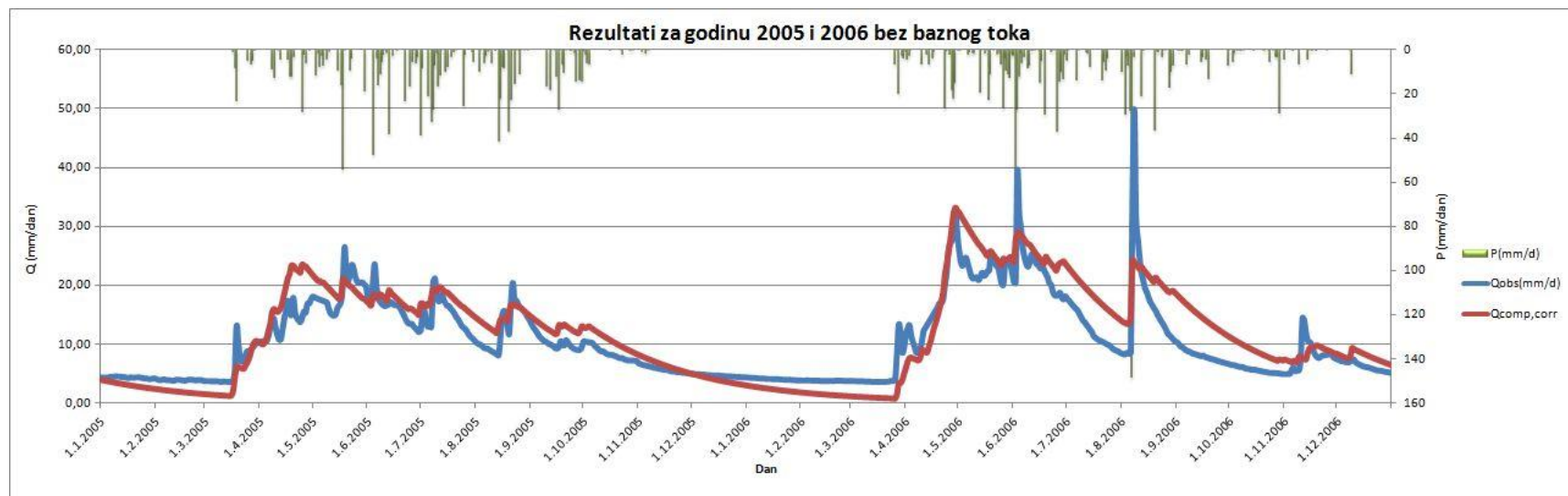
Graf 20: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2003. i 2004. s baznim tokom



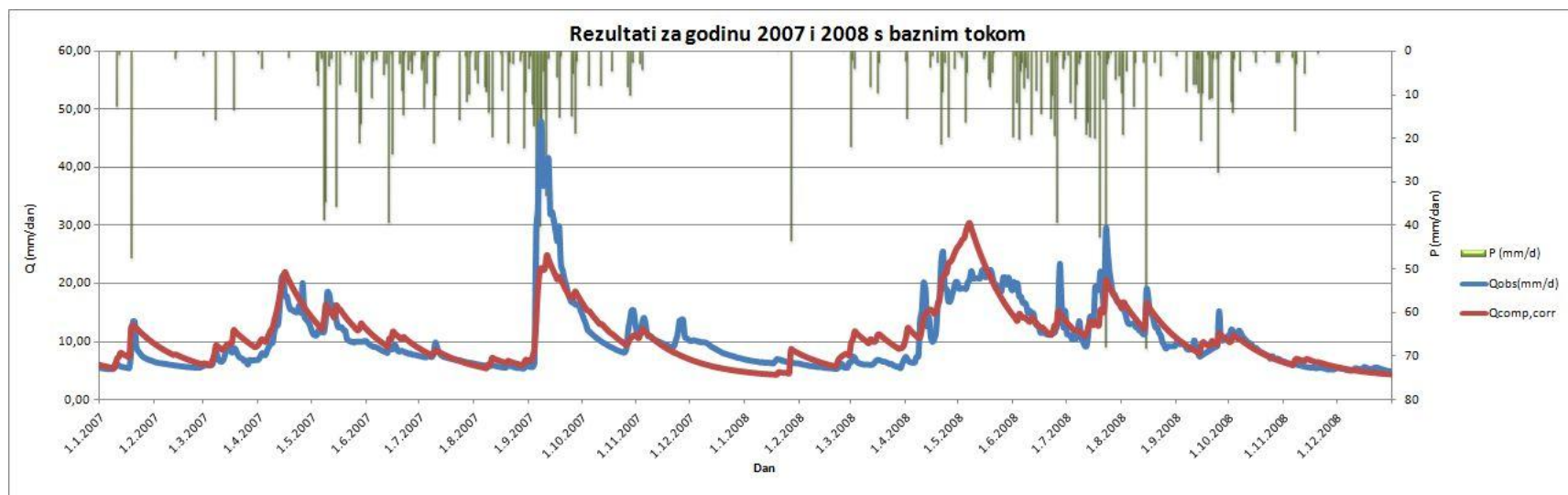
Graf 21: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2003. i 2004. bez baznog toka



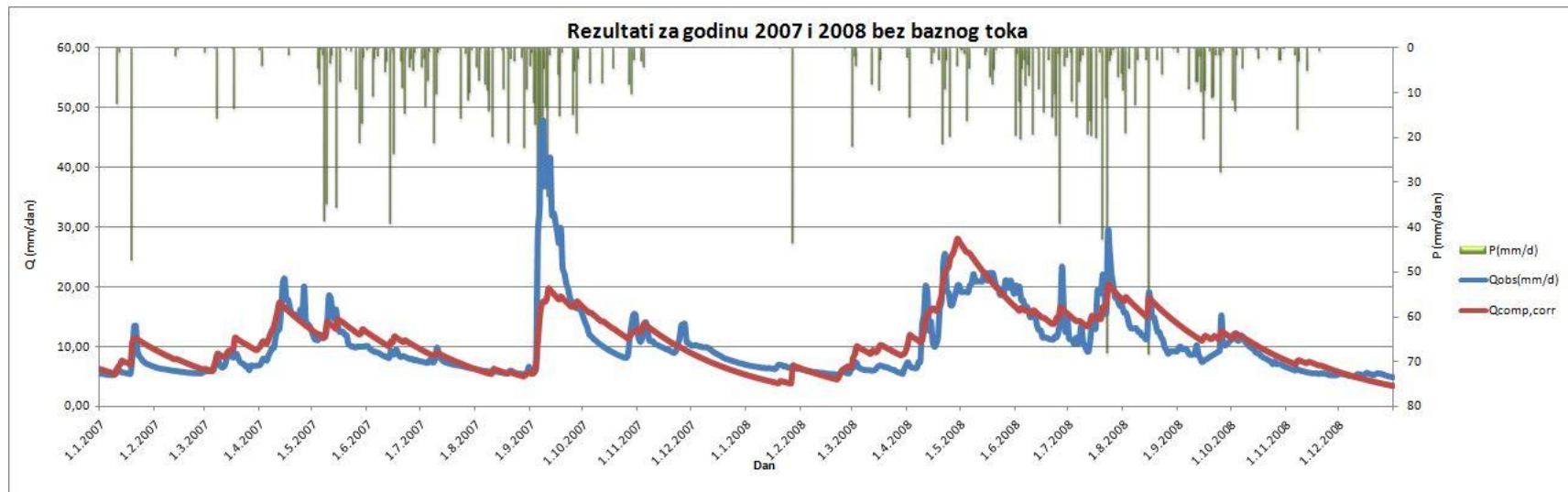
Graf 22: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2005. i 2006. s baznim tokom



Graf 23: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2005. i 2006. bez baznog toka

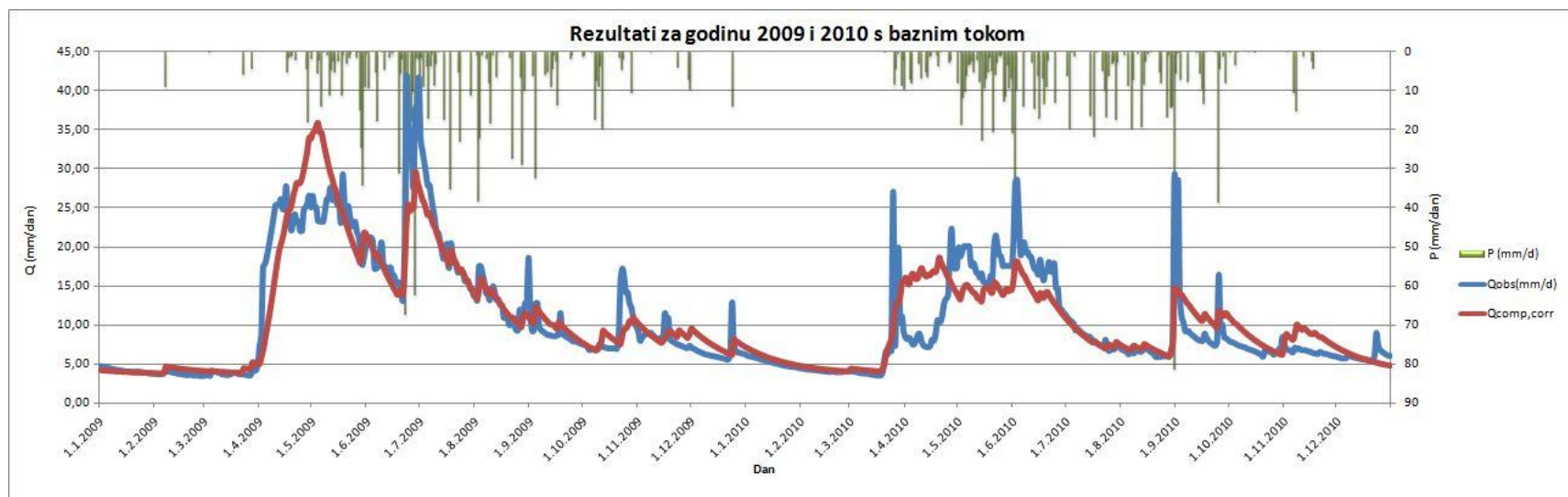


Graf 24: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2007. i 2008. s baznim tokom

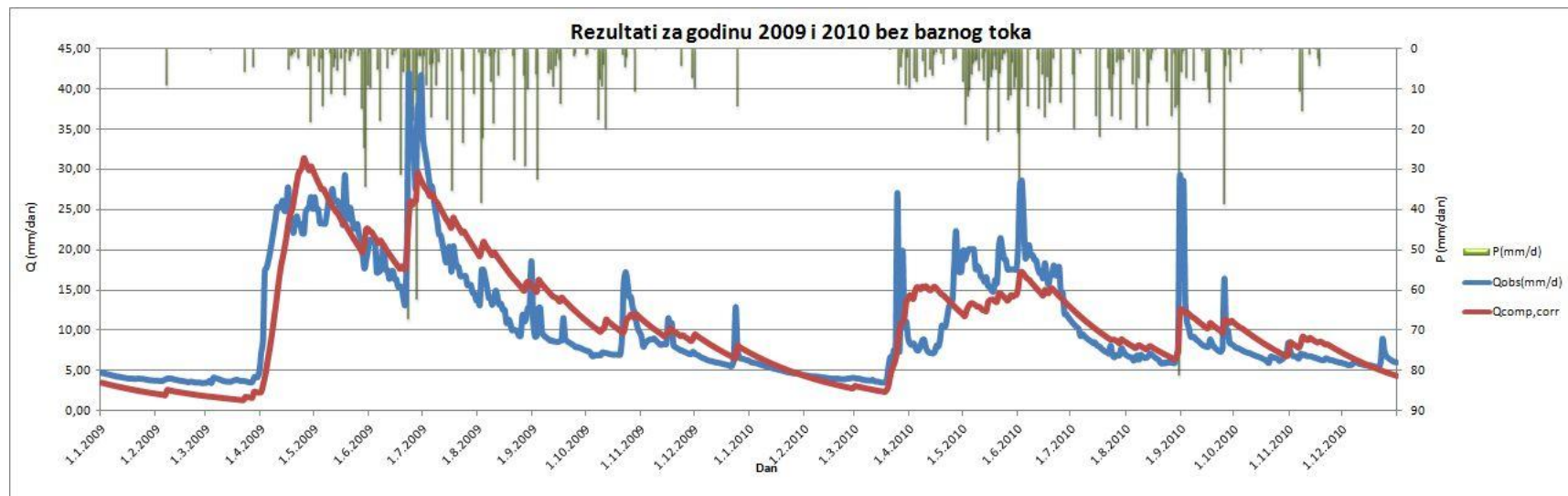


Graf 25: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2007. i 2008. bez baznog toka





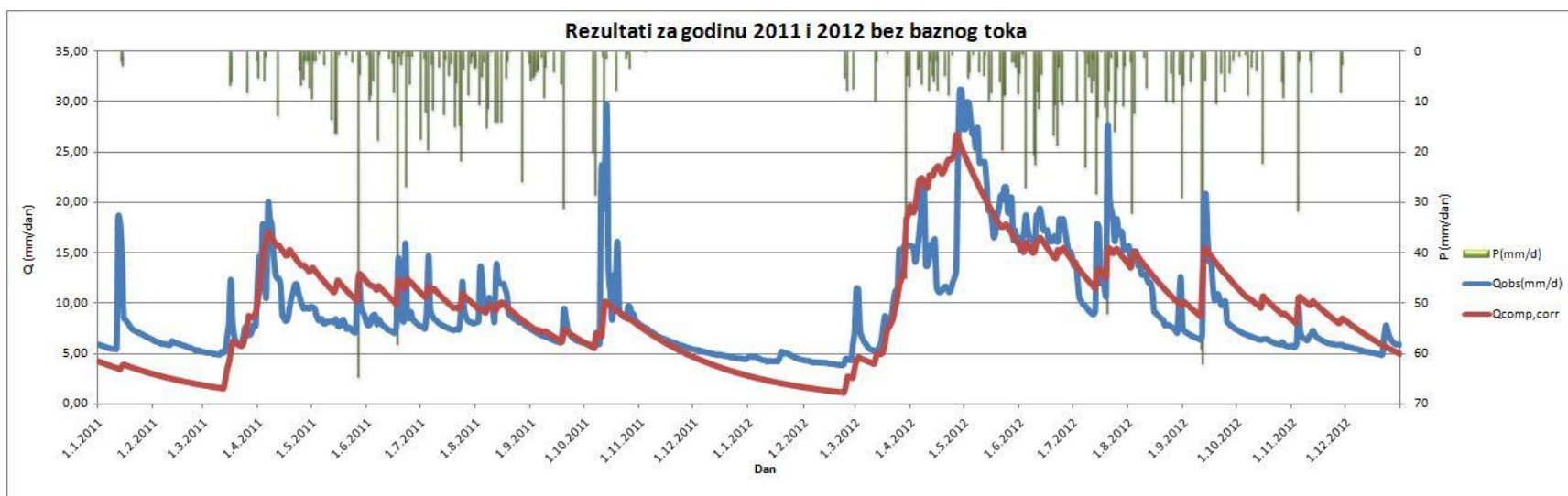
Graf 26: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2009. i 2010. s baznim tokom



Graf 27: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2009. i 2010. bez baznog toka



Graf 28: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2011. i 2012. s baznim tokom



Graf 29: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2011. i 2012. bez baznog toka



## 4. MODEL VODNE BILANCE (FGAG)

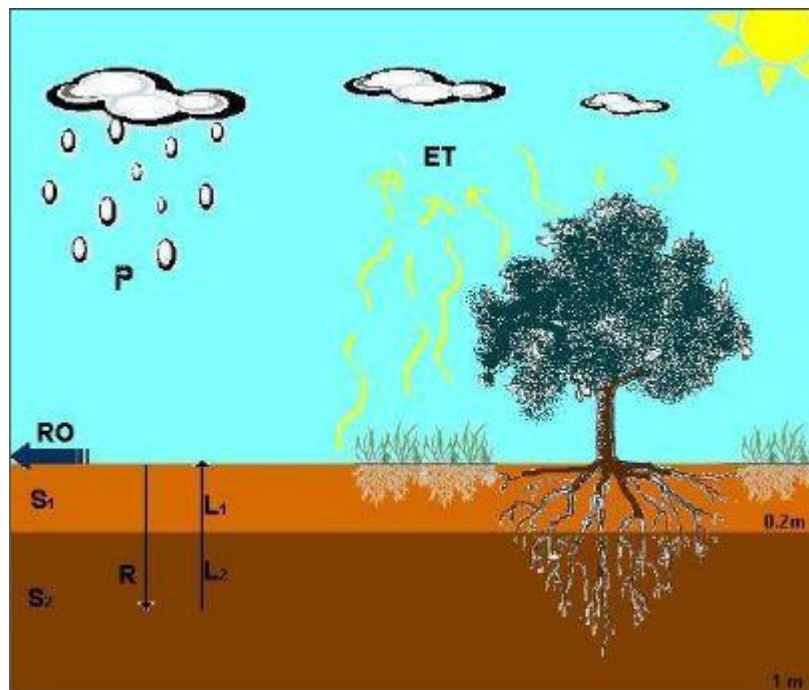
### 4.1 MODIFICIRANA PALMEROVA METODA

Kao što smo naglasili, određivanje bilance vode predstavlja zahtjevan i složen zadatak, što je posebno izraženo kada se radi o krškim i neistraženim područjima. Palmer-ova metoda (Palmer, 1965) je izvorno izvedena za nekrška područja, ali je njena primjena u području krša dala zadovoljavajuće rezultate [7] [8]. Palmer je ovom metodom dao složeniji i prirodnim uvjetima bliži postupak određivanja količine raspoložive vode na određenoj lokaciji. Jednadžba bilance vode na granici tlo-zrak prema Palmer-u je:

$$P + L = ET + R + RO \quad (18)$$

Gdje su oznake početna slova engleskih naziva za termine iz jednadžbe:  $P$  je količina oborine (*Precipitation*),  $L$  je gubitak vode iz tla (*Loss*),  $ET$  je stvarna evapotranspiracija (*Evapotranspiration*),  $R$  je procjeđivanje (*Recharge*), i  $RO$  je površinsko otjecanje (*Runoff*).

Metoda se zasniva na nekoliko pretpostavki i sastoji se od nekoliko faza. Glavna ideja metode (Slika 13) je da se oborina ( $P$ ), koja dopiye u tlo, prvo troši na evapotranspiraciju ( $ET$ ), zatim na procjeđivanje vode kroz tlo ( $R$ ) (popunjavanje zaliha vode u tlu), a višak na otjecanje ( $RO$ ). Takva situacija karakteristična je za zimski dio godine. Ukoliko bezoborinsko razdoblje potraje dulje, što je karakteristično za ljetne mjesec, zaliha vode u tlu se troši na evapotranspiraciju ( $ET$ ), a otjecanja ( $RO$ ) nema. Sve komponente vodne ravnoteže izražene su u milimetrima.



Slika 13: Shematski prikaz komponenti Palmer-ove vodne ravnoteže

U Palmer-ovoj jednadžbi bilance vode (18) oborina (P) je jedina poznata veličina. Uz pomoć podataka o sadržaju vode u tlu (S), i podataka o potencijalnoj evapotranspiraciji (PE), nizom matematičkih koraka dolazi se do ostalih nepoznanica.

Potencijalna evapotranspiracija (PE) se može dobiti na više načina koji se mogu naći u literaturi. U Palmer-ovoj metodi se najčešće koristi jedna od jednostavnijih formula koju je dao Eagleman (1967), a koja se zasniva na podacima temperature, tlaka vodene pare i relativne vlage zraka. Kako su nama dostupni samo podaci temperature, koristit ćemo Thornthwait-ovu formulu (2), tj. uzet ćemo podatke potencijalne evapotranspiracije izračunate u FORTRAN-u u prethodnoj metodi.

Kako je Palmer-ova metoda napravljena za područja gdje nema utjecaja snijega, modifikacija metode je potrebna jer naše promatrano slivno područje ima velike i česte količine snijega. Potrebna modifikacije je napravljena umetanjem dijela akumuliranog i otopljenog snijega iz prethodne metode, a biti će prikazana u nastavku. Najbitnija promjena koja se javlja zbog ove modifikacije je što naši izmjereni podaci oborine više neće biti podaci oborine iz Palmer-ove jednadžbe bilance vode. Tu oborinu će zamijeniti Met.Input (vrijednost meteorološkog ulaza), tj. suma oborine koja se nije pretvorila u snijeg i otopljenog snijega, dakle dijela oborine i snijega koji može stvoriti otjecanje.

## 4.2 ULAZNI PODACI I KORACI IZRAČUNA

Ulazni podaci za modificiranu Palmer-ovu bilancu vode su:

- Oborina P (mm/dan)
- Evapotranspiracija PE (mm/dan)
- Temperatura T (°C)
- Otjecanje Q (m<sup>3</sup>/dan)

Te se četiri glavne komponente (oborina, evapotranspiracija, temperatura i otjecanje) uz parametre koriste za izračunavanje bilance vode. Za dio akumuliranog i otopljenog snijega koriste se isti parametri kao i za prethodnu metodu (Day-degree Faktor, i Početni SWE). Njihovo objašnjenje nalazi se u Potpoglavlju 3.2. Ostali parametri koji se javljaju su početni sadržaj vode za gornji (S<sub>1</sub>) i donji sloj (S<sub>2</sub>), te maksimalni kapaciteti gornjeg (S<sub>max1</sub>), donjeg sloja (S<sub>max2</sub>) i tla ukupno (S<sub>max</sub>=S<sub>max1</sub>+ S<sub>max2</sub>). Maksimalni kapacitet tla se mora utvrditi mjerenjem, a ovisi o vrsti i dubini tla.

Vremensko razdoblje od 18 godina je, kao i u prvoj metodi, podijeljeno u dva dijela, jedan od 01.01.1995. do 31.12.2004., a drugi od 01.01.2005. do 31.12.2012. Najbolje vrijednosti parametara utvrdili smo pomoću kalibracijskog (prvog) dijela te ih primijenili na validacijski (drugi) dio. Tablica 12 prikazuje tablicu iz Excel-a koja prikazuje izračun rezultata modificiranom Palmer-ovom metodom.

PALMER: P + L = ET + R + RO				Parametri:				Početni sadržaj vode u tlu (S):										Ulazni podaci				
oborina + dovod iz dubine tla = evapotranspiracija + procjeđivanje + oštećanje.				S: Sadržaj (Day-Degree Faktor (mm/°C 1 d-1): 3,00 Početni SWE (Snow water equivalent) (mm): 20,00				Gornji sloj: 30,00 Donji sloj (do 100 cm) S2: 50,00 Maksimalni kapacitet tla Smax: 80,00 Smax1: 30,00 Smax2: 50,00										Parametri Ulazni rezultati				
Datum	Den	P (mm)	PE (mm/d)	T (°C)	Peff	MELT	Akumulirani i otopljeni snijeg		Met.input	q/Melt	Promjena sadržaja vode u tlu		Sadržaj vode u tlu			Gubitak vode iz tla (L=L1+L2):			Porcijedivanje (R) i oštećanje (RO)		Sterva evapotranspiracije (E)	
							SWE	SWE+			ΔS1	ΔS2	S1	S2	S	L1	L2	L	R	RO	ET	
1.1.1995	1	1,3	0	-5,45	0	0,00	21,30	21,30	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.1.1995	2	2,8	0	-7,14	0	0,00	24,10	24,10	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3.1.1995	3	3,4	0	-8,82	0	0,00	27,50	27,50	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4.1.1995	4	1,9	0	-11,66	0	0,00	29,40	29,40	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5.1.1995	5	0,3	0	-13,07	0	0,00	29,70	29,70	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6.1.1995	6	0	0	-11,56	0	0,00	29,70	29,70	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7.1.1995	7	0	0	-11,21	0	0,00	29,70	29,70	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8.1.1995	8	0	0	-12,70	0	0,00	29,70	29,70	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9.1.1995	9	1,5	0	-15,18	0	0,00	31,20	31,20	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10.1.1995	10	17,2	0	-7,14	0	0,00	48,40	48,40	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11.1.1995	11	18,1	0	-6,99	0	0,00	66,50	66,50	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12.1.1995	12	28,4	0	-7,31	0	0,00	94,90	94,90	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13.1.1995	13	3,8	0	-8,77	0	0,00	98,70	98,70	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14.1.1995	14	0	0	-11,49	0	0,00	98,70	98,70	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15.1.1995	15	0	0	-11,16	0	0,00	98,70	98,70	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16.1.1995	16	0	0	-7,84	0	0,00	98,70	98,70	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17.1.1995	17	0	0	-10,41	0	0,00	98,70	98,70	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18.1.1995	18	0	0	-11,11	0	0,00	98,70	98,70	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19.1.1995	19	0,9	0	-11,67	0	0,00	99,60	99,60	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20.1.1995	20	0	0	-10,25	0	0,00	99,60	99,60	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21.1.1995	21	0	0	-8,70	0	0,00	99,60	99,60	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22.1.1995	22	0	0	-7,14	0	0,00	99,60	99,60	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23.1.1995	23	0	0	-3,5	0	0,00	99,60	99,60	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24.1.1995	24	3,8	0	-3,4	0	0,00	103,40	103,40	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25.1.1995	25	13,2	0	-4,07	0	0,00	116,60	116,60	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26.1.1995	26	0	0	1,09	0	3,27	113,33	113,33	3,27	3,27	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	3,27	0,00
27.1.1995	27	2,5	0	-3,81	0	0,00	115,83	115,83	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28.1.1995	28	0	0	-6,65	0	0,00	115,83	115,83	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29.1.1995	29	2,3	0	-4,10	0	0,00	118,13	118,13	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30.1.1995	30	8,2	0	-2,48	0	0,00	126,33	126,33	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31.1.1995	31	1,8	0	-6,19	0	0,00	128,13	128,13	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1.2.1995	1	0	0	-7,54	0	0,00	128,13	128,13	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2.2.1995	2	0	0	-4,76	0	0,00	128,13	128,13	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3.2.1995	3	0	0	-5,01	0	0,00	128,13	128,13	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4.2.1995	4	6,4	0	-5,74	0	0,00	134,53	134,53	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5.2.1995	5	7,5	0	-2,35	0	0,00	142,03	142,03	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6.2.1995	6	3,7	0	-1,21	0	0,00	145,73	145,73	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7.2.1995	7	0	0	2,05	0	6,15	139,58	139,58	6,15	6,15	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	6,15	0,00	0,00
8.2.1995	8	0	0	-0,16	0	0,00	139,58	139,58	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9.2.1995	9	3,1	0	-2,24	0	0,00	142,68	142,68	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10.2.1995	10	0	0	-5,55	0	0,00	142,68	142,68	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11.2.1995	11	0	0	-5,96	0	0,00	142,68	142,68	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12.2.1995	12	8,2	0	-4,51	0	0,00	142,88	142,88	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13.2.1995	13	0	0	-2,38	0	0,00	142,88	142,88	0,00	0,00	0,00	0,00	30,00	50,00	80,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tablica 12: Izračun Palmer-ove metode

Prvi korak je izračun akumuliranog i otopljenog snijega da bi dobili Met.Input, koji u nastavku predstavlja ulazni podatak umjesto količine oborine ( $P=Met.Input$ ). Ovaj dio je isti kao i u prethodnoj metodi gdje je i detaljno objašnjen.

Drugi korak je izračun gubitka vode iz tla (21). Palmer je pretpostavio da se tlo dostupno biljkama može podijeliti na dva dijela, gornji (površinski dio do oko 20 cm) i donji (potpovršinski dio do 100 cm), pa ćemo tako imati i gubitak iz površinskog (19) i potpovršinskog dijela (20) Ukoliko je stvarna evapotranspiracija veća od količine oborinske vode, trošit će se voda iz zalihe u tlu (ako je ima) što se naziva gubitkom vode iz tla (L). Gubitak nema ako je potencijalna evapotranspiracija manja od količine oborinske vode. Gubici se računaju za svaki sloj posebno, i na kraju se zbrajaju.

$$L_1 = IF(AND(S_1 \geq PE - P; PE - P \geq 0); PE - P; IF(AND(S_1 < PE - P; PE - P > 0); S_1; IF(S_1 = 0; 0; IF(PE - P < 0; 0; FALSE)))) \quad (19)$$

$$L_2 = IF((PE - P - L_1) \cdot (S_2/S_{max}) \leq 0; 0; IF(AND((PE - P - L_1) \cdot (S_2/S_{max}) > 0; (PE - P - L_1) \cdot (S_2/S_{max}) \leq S_2); (PE - P - L_1) \cdot (S_2/S_{max}); IF((PE - P - L_1) \cdot (S_2/S_{max}) > S_2; S_2; FALSE))) \quad (20)$$

$$L = L_1 + L_2 \quad (21)$$

Sljedeći korak je računanje procjeđivanja (22) i otjecanja (23). Ove vrijednosti također ovise o odnosu oborine (P), potencijalne evapotranspiracije (ET) i o količini vode u tlu (S). Procjeđivanje se odvija kada je količina oborine veća od potencijalne evapotranspiracije i kada zalihe vode u tlu nisu popunjene. Ukoliko je tlo zasićeno vodom, umjesto procjeđivanja, doći će do otjecanja.

$$R = IF(P - PE \leq 0; 0; IF(AND(P - PE \leq S_{max} - S; P - PE > 0); P - PE; IF(P - PE > S_{max} - S; S_{max} - S; FALSE))) \quad (22)$$

$$RO = IF(P - PE \leq 0; 0; IF(AND(P - PE \leq S_{max} - S; P - PE > 0); 0; IF(P - PE > S_{max} - S; P - PE - R; FALSE))) \quad (23)$$

Stvarna evapotranspiracija (24) može biti jednaka ili manja od potencijalne (PE), a osim što ovisi o temperaturi zraka, ovisi i o količini oborine.

$$ET = IF(P - PE \geq 0; PE; IF(P - PE < 0; P + L; FALSE)) \quad (24)$$

Posljednji korak da bi dobili sve komponente Palmer-ove vodne bilance je računanje sadržaja vode u tlu (S), tj. promjene sadržaja vode u tlu nakon jednog vremenskog koraka

( $\Delta S$ ). Da bi mogli koristiti ovu metodu potrebno je poznavati sadržaj vode u tlu na početku razdoblja za koji se hidrološki proračun vrši. Naše promatrano razdoblje počine u zimskom periodu, pa je moguće pretpostaviti početni sadržaj vode koji je jednak maksimalnom kapacitetu tla. To je moguće uz pretpostavku da se tlo u potpunosti zasitilo nakon zimskog perioda s dugotrajnim kišama. Važno je još naglasiti da se prvo puni površinski sloj, ali se iz njega voda također prvo troši na evapotranspiraciju. Potpovršinski sloj se puni oborinskom vodom tek kada je prvi sloj popunjen, a prazni tek kada ispari sva voda iz prvog sloja. Ove vrijednosti se dobivaju na sljedeći način:

$$\Delta S_{1n} = IF(AND(R_{n-1} = 0; L_{n-1} = 0); 0; IF(L_{n-1} > 0; -L_{1n-1}; IF(AND(R_{n-1} > 0; R_{n-1} \leq S_{max1} - S_{1n-1}); R_{n-1}; IF(R_{n-1} > S_{max1} - S_{1n-1}; S_{max1} - S_{1n-1}; FALSE)))) (25)$$

$$\Delta S_{2n} = IF(AND(R_{n-1} = 0; L_{n-1} = 0); 0; IF(L_{n-1} > 0; -L_{2n-1}; IF(AND(R_{n-1} > 0; R_{n-1} \leq S_{max1} - S_{1n-1}); 0; IF(R_{n-1} > S_{max1} - S_{1n-1}; R_{n-1} - \Delta S_{1n}; FALSE)))) (26)$$

$$S_{1n} = S_{1n-1} + \Delta S_{1n} \quad (27)$$

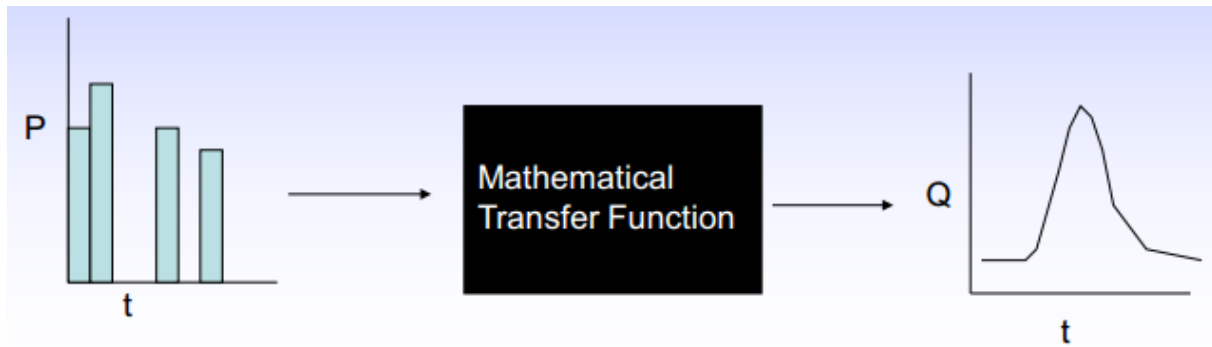
$$S_{2n} = S_{2n-1} + \Delta S_{2n} \quad (28)$$

$$S_n = S_{1n} + S_{2n} \quad (29)$$

Gdje je:  $\Delta S_{1n}$  promjena sadržaja vode za površinski sloj,  $\Delta S_{2n}$  je promjena sadržaja vode za potpovršinski sloj,  $S_{1n}$  je sadržaj vode u n-tom koraku za površinski sloj,  $S_{2n}$  je sadržaj vode u n-tom koraku za potpovršinski sloj,  $S_n$  je ukupni sadržaj vode u tlu u n-tom koraku.

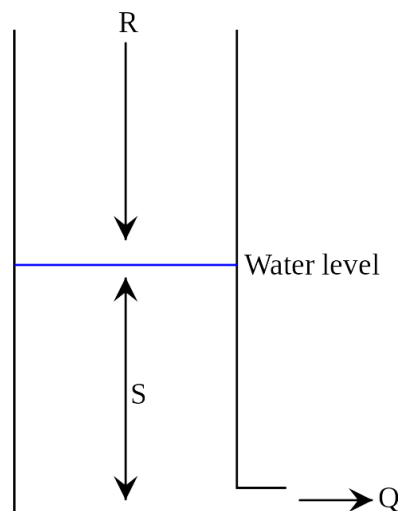
### 4.3 HIDROLOŠKI MODEL OTJECANJA

Hidrološki modeli su pojednostavljeni prikazi stvarne hidrologije, tj. stvarnog prirodnog stanja. Postoje fizikalni i teorijski (matematički modeli). Matematički modeli imaju najširu primjenu, te predstavljaju skup matematičkih izraza i jednažbi da bi postigli simulacije prirodnog sustava [7].



Slika 14: Transformacija oborine u otjecanje

Model otjecanja (*runoff model*) je matematički model koji opisuje odnose oborina-otjecanje (*rainfall-runoff*) slivnog područja. Točnije, on transformira efektivnu oborinu u hidrogram otjecanja. Drugim riječima, model računski pretvara oborinu u otjecanje. Konceptualni modeli [9] su zasnovani na fizikalnim procesima unutar sliva, pri čemu se parametri vrlo rijetko dobiju direktnim mjerenjem već se procjenjuju putem kalibracije preko ulaznih i izlaznih vrijednosti modela. Poznati model otjecanja je metoda linearnog rezervoara, ali u praksi ima ograničenu primjenjivost.



Slika 15: Linearni rezervoar

Metoda linearnog rezervoara (Linear Reservoir Method) koristit će se u ovom radu da bi se izvršila transformacija efektivne oborine u hidrogram otjecanja. Metoda je zasnovana na pretpostavci da se vodonosnik aproksimativno ponaša kao rezervoar u kojem je volumenska zapremina ( $S$ ) u linearnoj vezi sa otjecanjem ( $Q$ ). Hidrologija linearnog rezervoara (Slika 15) regulirana je s dvije jednačbe, jednačbom protoka (30) i jednačbom kontinuiteta (31).



$$Q = K \cdot S \quad (30)$$

Gdje je:  $Q$  protok koji se ispušta iz rezervoara,  $K$  je koeficijent zapremine vodonosnika, a  $S$  je volumenska zapremina

$$R = Q + \frac{dS}{dT} \quad (31)$$

Gdje je:  $R$  protok koji ulazi u rezervoar ili "recharge",  $dS$  je diferencijal od  $S$ , a  $dT$  je diferencijal od  $T$ .

Kombinacijom jednadžbi (30) i (31) dobivamo diferencijalnu jednadžbu (32):

$$Q_{(t+\Delta t)} = Q_{(t)} \cdot e^{-\alpha \Delta t} + R_{(t+\Delta t)} \cdot (1 - e^{-\alpha \Delta t}) \quad (32)$$

U ovoj metodi otjecanje je podijeljeno na baznu i direktnu komponentu (sporo i brzo otjecanje) što je prikazano na Grafu 30. Određen je volumen baznog i direktnog dijela tj. izračunata je površina ispod grafa. Preko vrijednosti volumena dobili smo vrijednosti parametra ( $\Theta$  i  $(1-\Theta)$ ), koje u nastavku koristimo pri izračunu simuliranog baznog i direktnog otjecanja. Parametri se množe s vrijednosti  $R$  (u našem slučaju to je  $RO$  dobiven iz Palmer-ove metode).

$$V = V_b + V_d$$

$$71243051,43 = 43289812,8 + 27953238,63$$

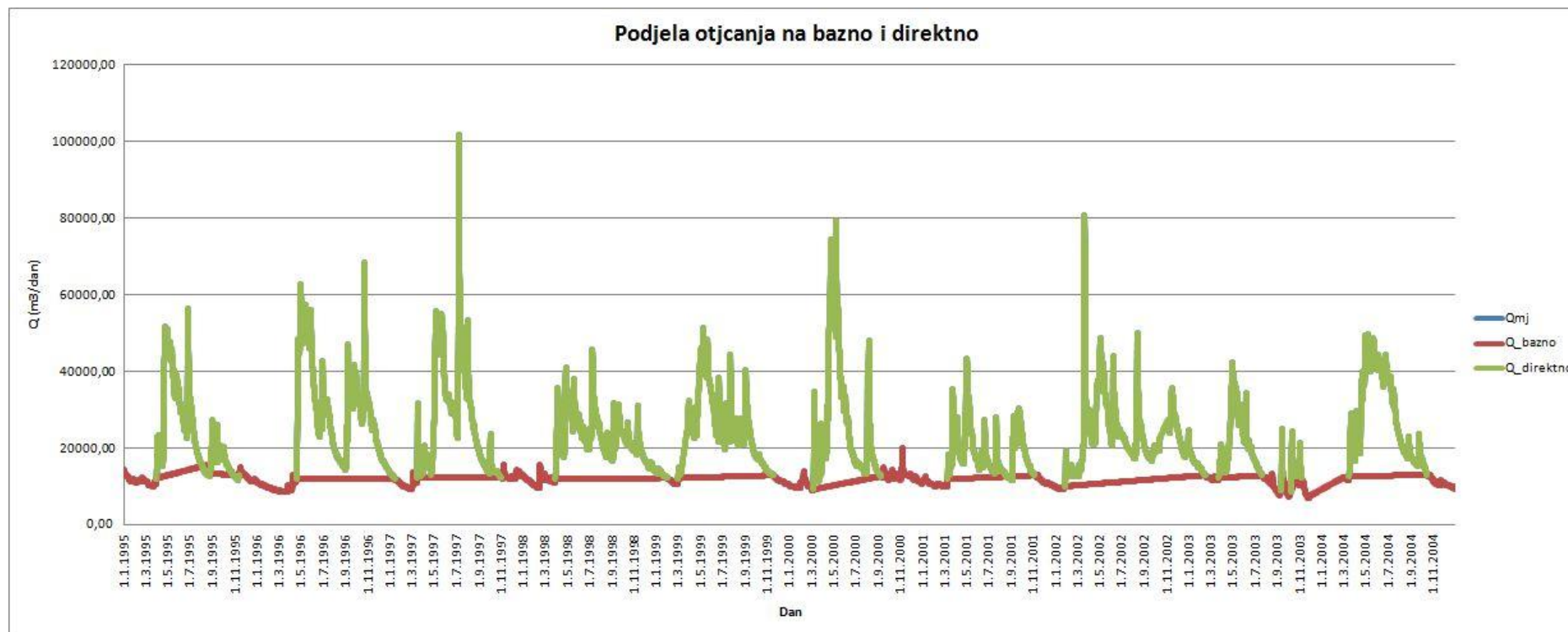
$$V = V_b + V_d \quad /V$$

$$1 = \theta + (1 - \theta)$$

$$1 = 0,61 + 0,39$$

Parametri  $\alpha$  bazno i  $\alpha$  direktno su odabrani prema najboljoj korelaciji. To su koeficijenti recesijskog dijela hidrograma za bazno i direktno otjecanje. Početni protok je također određen prema podudaranju grafova simuliranih i stvarnih podataka.

Simulirano bazno i direktno otjecanje smo odredili pomoću jednadžbe (32), uzimajući u obzir da je za bazno otjecanje ulazna komponenta  $R$  zapravo  $R \cdot \Theta$ , a za direktno  $R \cdot (1-\Theta)$ . Suma rezultata dobivenih za bazno i direktno otjecanje daje nam simulirane rezultate otjecanje koje uspoređujemo sa stvarnim podacima. Bitno je naglasiti da smo u ovom hidrološkom modelu sve komponente prebacili u  $m^3/dan$ , te da pri usporedbi uzimamo podatke otjecanja, a ne podatke otjecanje po slivnom površini kao u prethodnoj metodi. Izračun je prikazan u Tablici 13 sa svim komponentama koje ulaze u model.



Graf 30: Podjela otjecanja na bazno i direktno otjecanje

$Q(t + \Delta t) = Q(t) \cdot e^{-\alpha \Delta t} + R(t + \Delta t)(1 - e^{-\alpha \Delta t})$											
						Početni protok	7000	m <sup>3</sup> /dan		Ulazni podaci	
						$\Delta t$	1	dan		Parametri	
						$\alpha$ bazno	0,005			Izlazni rezultati	
						$\alpha$ direktno	0,05				
Datum	R=RO RO (mm/dan)	m <sup>3</sup> /dan RO	$\Theta$ bazno 0,61	$\Theta$ direktno 0,39	t	m <sup>3</sup> /dan Q bazno	m <sup>3</sup> /dan Q direktno	m <sup>3</sup> /dan Q sim	l/s	m <sup>3</sup> /dan Q mj	Datum
1.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	1	6965,09	6592,35	13557,44	167,00	14428,8000	1.1.1995
2.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	2	6930,35	6208,44	13138,79	162,00	13996,8000	2.1.1995
3.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	3	6895,78	5846,89	12742,68	158,00	13651,2000	3.1.1995
4.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	4	6861,39	5506,40	12367,79	156,00	13478,4000	4.1.1995
5.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	5	6827,17	5185,73	12012,90	155,00	13392,0000	5.1.1995
6.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	6	6793,12	4883,73	11676,85	152,00	13132,8000	6.1.1995
7.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	7	6759,24	4599,33	11358,57	150,00	12960,0000	7.1.1995
8.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	8	6725,53	4331,48	11057,01	150,00	12960,0000	8.1.1995
9.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	9	6691,98	4079,24	10771,22	149,00	12873,6000	9.1.1995
10.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	10	6658,61	3841,68	10500,29	148,00	12787,2000	10.1.1995
11.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	11	6625,40	3617,96	10243,36	147,00	12700,8000	11.1.1995
12.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	12	6592,35	3407,27	9999,62	144,00	12441,6000	12.1.1995
13.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	13	6559,47	3208,84	9768,31	142,00	12268,8000	13.1.1995
14.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	14	6526,76	3021,97	9548,73	141,00	12182,4000	14.1.1995
15.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	15	6494,20	2845,99	9340,19	138,00	11923,2000	15.1.1995
16.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	16	6461,81	2680,25	9142,06	138,00	11923,2000	16.1.1995
17.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	17	6429,59	2524,16	8953,75	137,00	11836,8000	17.1.1995
18.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	18	6397,52	2377,17	8774,69	135,00	11664,0000	18.1.1995
19.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	19	6365,61	2238,73	8604,34	133,00	11491,2000	19.1.1995
20.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	20	6333,86	2108,36	8442,22	133,00	11491,2000	20.1.1995
21.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	21	6302,27	1985,58	8287,85	132,00	11404,8000	21.1.1995
22.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	22	6270,84	1869,95	8140,79	131,00	11318,4000	22.1.1995
23.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	23	6239,56	1761,05	8000,61	131,00	11318,4000	23.1.1995
24.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	24	6208,44	1658,49	7866,94	130,00	11232,0000	24.1.1995
25.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	25	6177,48	1561,91	7739,39	137,00	11836,8000	25.1.1995
26.1.1995	3,27	21909,00	13364,49	8544,51	26	6213,32	1968,55	8181,87	139,00	12009,6000	26.1.1995
27.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	27	6182,33	1853,91	8036,24	136,00	11750,4000	27.1.1995
28.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	28	6151,50	1745,94	7897,44	135,00	11664,0000	28.1.1995
29.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	29	6120,82	1644,27	7765,09	134,00	11577,6000	29.1.1995
30.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	30	6090,29	1548,51	7638,80	132,00	11404,8000	30.1.1995
31.1.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	31	6059,92	1458,33	7518,25	131,00	11318,4000	31.1.1995
1.2.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	32	6029,69	1373,41	7403,10	128,00	11059,2000	1.2.1995
2.2.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	33	5999,62	1293,43	7293,05	127,00	10972,8000	2.2.1995
3.2.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	34	5969,70	1216,10	7187,80	127,50	11016,0000	3.2.1995
4.2.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	35	5939,92	1147,17	7087,09	128,00	11059,2000	4.2.1995
5.2.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	36	5910,30	1080,36	6990,66	127,00	10972,8000	5.2.1995
6.2.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	37	5880,82	1017,45	6898,26	129,00	11145,6000	6.2.1995
7.2.1995	6,15	41205,00	25135,05	16069,95	38	5976,85	1894,04	7870,88	132,00	11404,8000	7.2.1995
8.2.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	39	5947,04	1783,74	7730,78	136,00	11750,4000	8.2.1995
9.2.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	40	5917,38	1679,86	7597,24	137,00	11836,8000	9.2.1995
10.2.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	41	5887,87	1582,03	7469,90	135,00	11664,0000	10.2.1995
11.2.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	42	5858,50	1489,90	7348,40	135,00	11664,0000	11.2.1995
12.2.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	43	5829,28	1403,14	7232,42	132,00	11404,8000	12.2.1995
13.2.1995	0,00	0,00	0,00	0,00	44	5800,21	1321,42	7121,63	132,00	11404,8000	13.2.1995

Tablica 13: Izračun hidrološkog modela

## 4.4 REZULTATI

Ulazni podaci za Palmer-ov metodu i hidrološki model su:

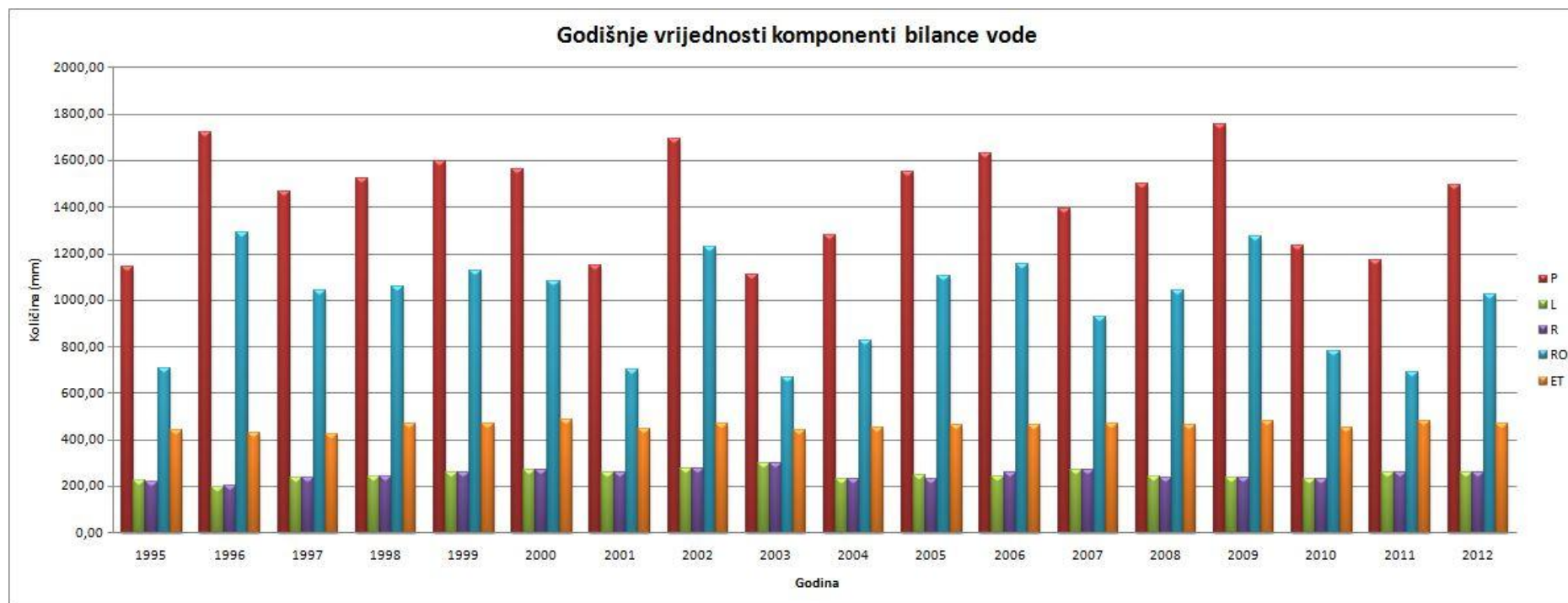
- Oborina (P, tj Met. Inp)
- Gubitak vode iz tla (L)
- Procjeđivanje (R)
- Otjecanje (RO)
- Stvarna evapotranspiracija (ET)

Prvo su prikazani rezultati Palmer-ove metode u Tablici 14 i na Grafu 31. Gore navedeni ulazni podaci nam daju rezultate prikazane na Grafovima 32 i 33. Parametri se biraju, kao i kod prve metode, prema korelaciji između  $Q_{mj}$  i  $Q_{sim}$ , prema jednakosti suma  $Q_{mj}$  i  $Q_{sim}$ , i prema podudaranju grafova tih dviju vrijednosti otjecanja. Kao što je već prije spomenuto, vremenski period je podijeljena u dva dijela (1995-2004, 2005-2012). Prvi dio, 1995-2004, predstavlja kalibracijski dio. Parametri su odabrani prema najboljim rezultatima za kalibracijski dio. Nakon toga, isti su parametri korišteni za drugi dio, 2004-2012, tzv. validacijski dio. Tada je zaključeno da su parametri dobro odabrani pošto je i validacijski dio imao veliku korelaciju te podudaranje grafova. Korelacija za ovaj model je 0,90 za kalibracijski dio, te 0,87 za validacijski dio (Tablica 15 i 16), što znači da je korelacija dobra. U Tablicama 15 i 16, osim vrijednosti korelacije, možemo vidjeti i vrijednosti suma  $Q_{mj}$  i  $Q_{sim}$  koje su prilično jednake.

P + L = ET + R + RO						
Godina	P	L	R	RO	ET	Kontrola
1995	1140,84	223,41	218,27	707,98	438,00	0,00
1996	1721,76	197,14	202,28	1288,33	428,29	0,00
1997	1466,64	237,92	237,92	1042,09	424,55	0,00
1998	1525,63	241,04	241,04	1056,01	469,62	0,00
1999	1596,17	261,93	261,93	1128,40	467,77	0,00
2000	1564,63	270,90	270,90	1080,15	484,48	0,00
2001	1150,10	259,51	259,51	701,66	448,44	0,00
2002	1692,84	274,40	274,40	1225,96	466,88	0,00
2003	1109,25	296,35	296,35	665,92	443,33	0,00
2004	1280,73	231,38	231,38	827,31	453,42	0,00
2005	1550,78	247,97	233,20	1100,98	464,59	0,00
2006	1633,29	244,67	259,45	1154,05	464,46	0,00
2007	1395,35	270,07	270,07	925,56	469,79	0,00
2008	1500,55	239,67	238,77	1038,83	462,62	0,00
2009	1758,20	236,56	237,46	1274,76	482,54	0,00
2010	1232,68	232,50	231,82	780,80	452,56	0,00
2011	1171,96	261,12	261,35	691,92	479,81	0,00
2012	1495,79	258,95	259,40	1025,94	469,40	0,00

Tablica 14: Godišnje vrijednosti komponenti Palmer-ove metode i kontrola



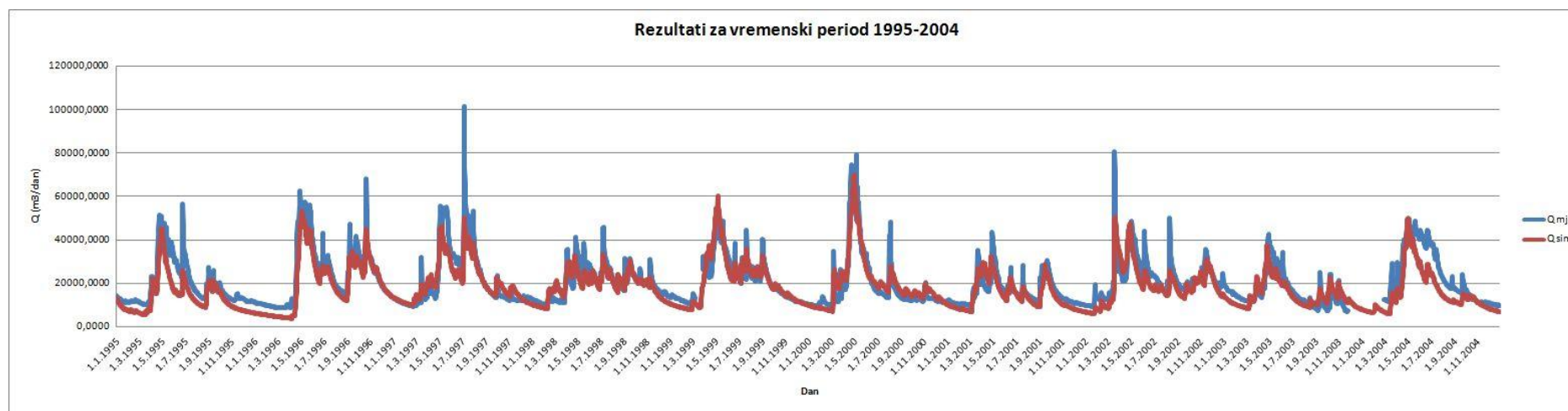


*Graf 31:* Godišnje vrijednosti komponenti Palmer-ove metode

Kalibracijski rezultati:

	Q bazno	Q direktno	Q sim	Q mj			
SUM=	39779776,42	25520046,47	65299822,89	71255013,51		CORREL=	0,90

Tablica 15: Podaci otjecanja za razdoblje 1995-2004



Graf 32: Rezultati za vremenski period 1995-2004



Validacijski rezultati:

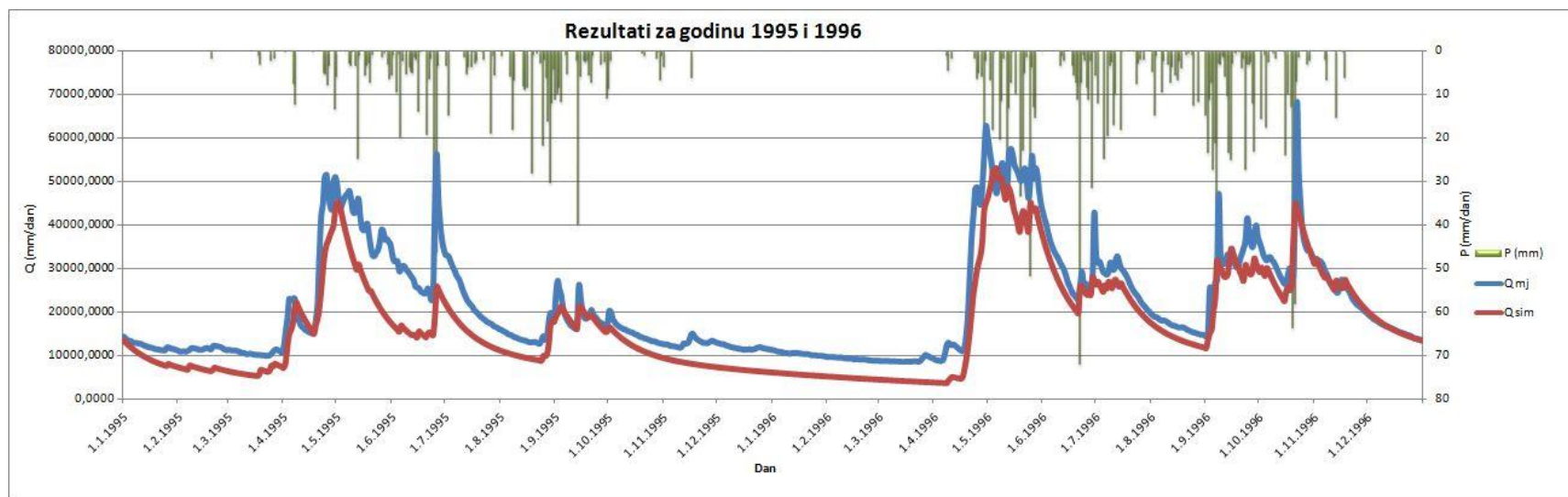
	Q bazno	Q direktno	Q sim	Q mj			
SUM=	32292811,63	20988447,97	53281259,60	62119164,29		CORREL=	0,87

Tablica 16: Podaci otjecanja za razdoblje 2005-2012

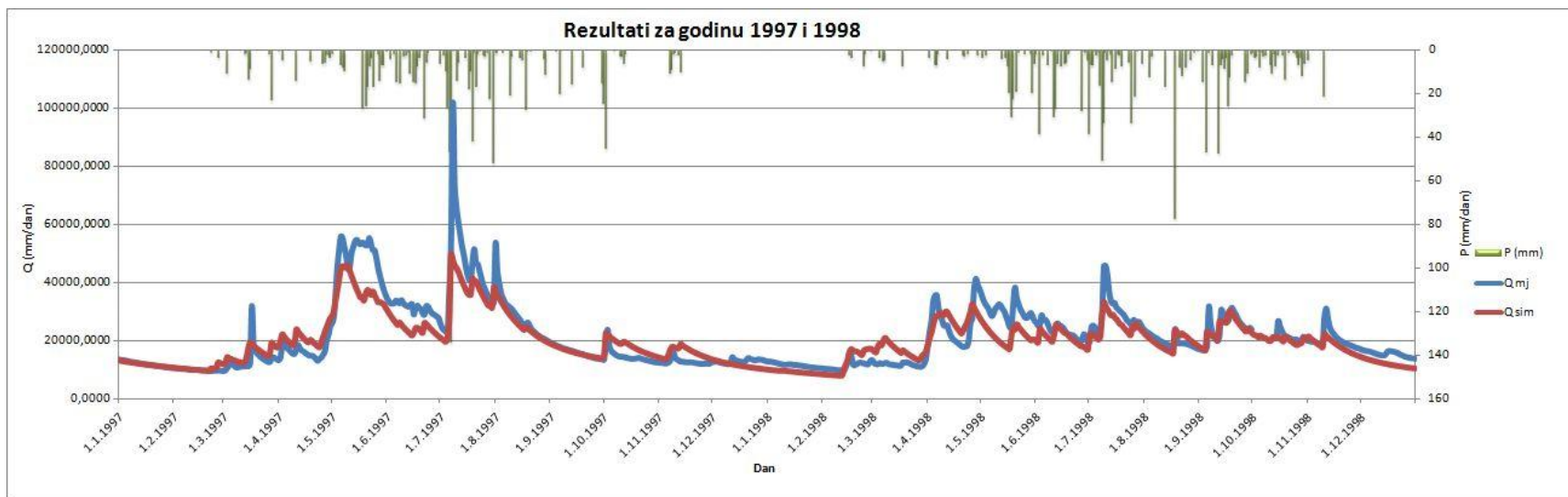


Graf 33: Rezultati za vremenski period 2005-2012

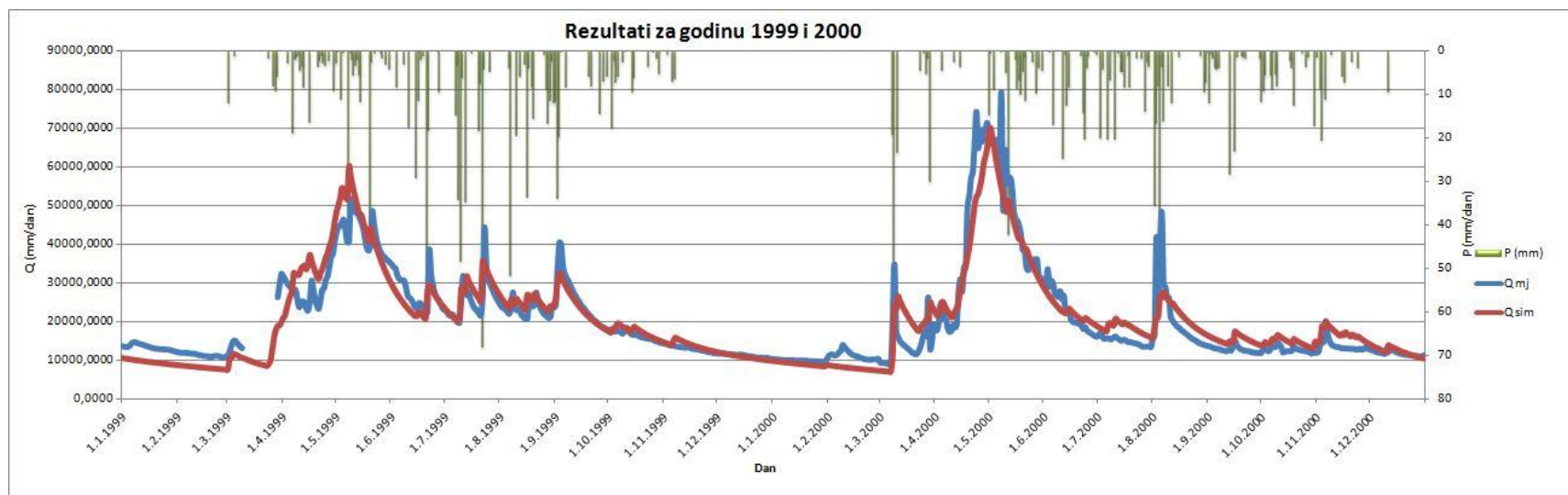
Radi bolje usporedbe Grafovi 34-42 prikazuju rezultate s vremenskim periodom od dvije godine, a sadrže  $Q_{mj}$  i  $Q_{sim}$ , te podatke oborine.



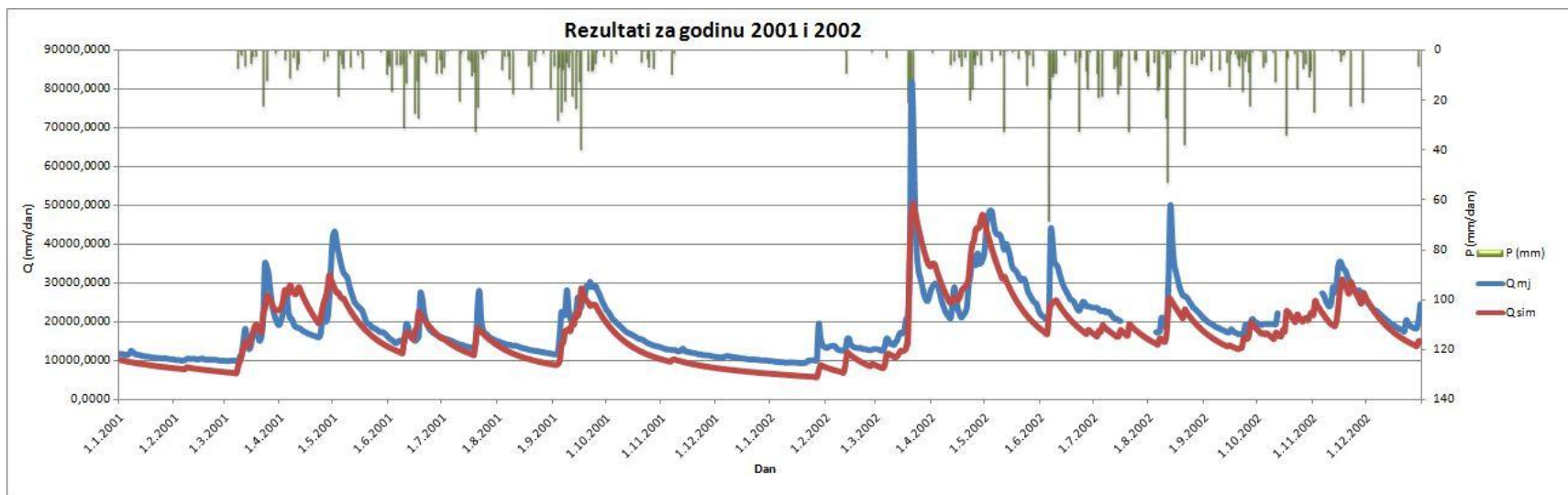
Graf 34: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1995. i 1996.



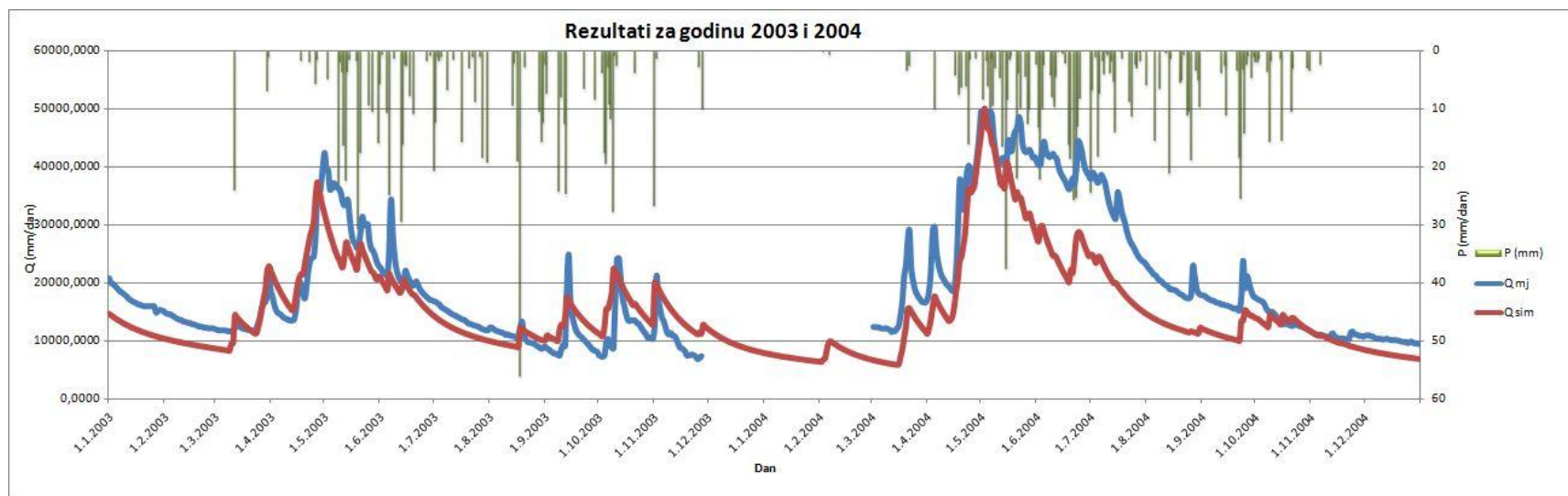
Graf 35: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1997. i 1998.



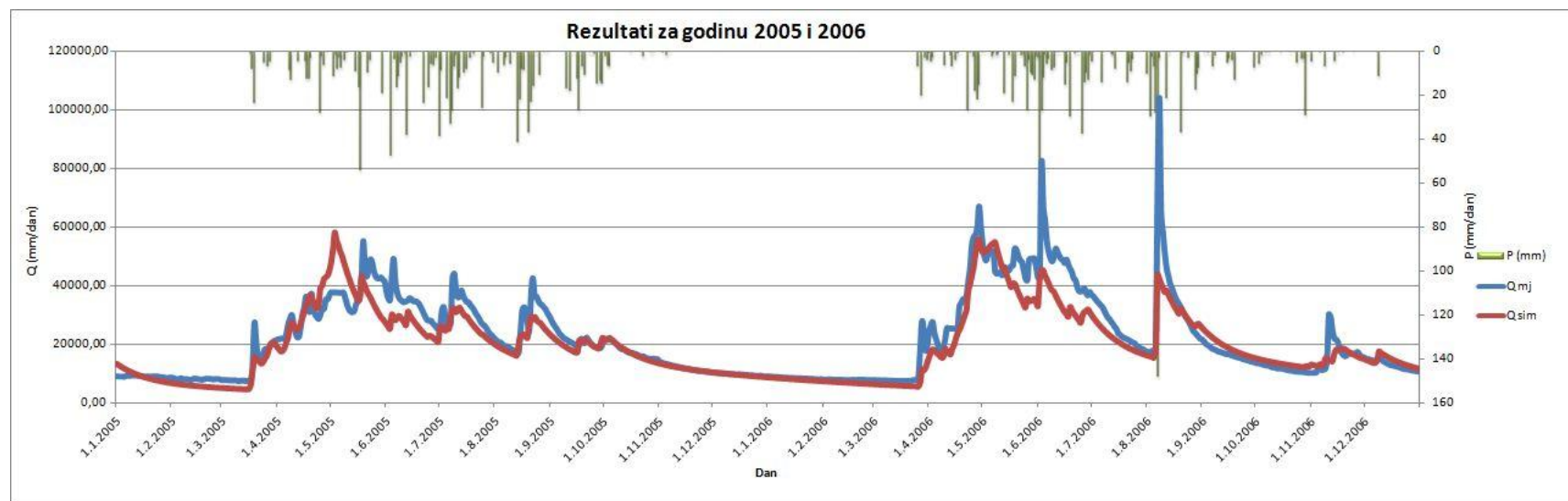
Graf 36: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1999. i 2000.



Graf 37: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2001. i 2002.

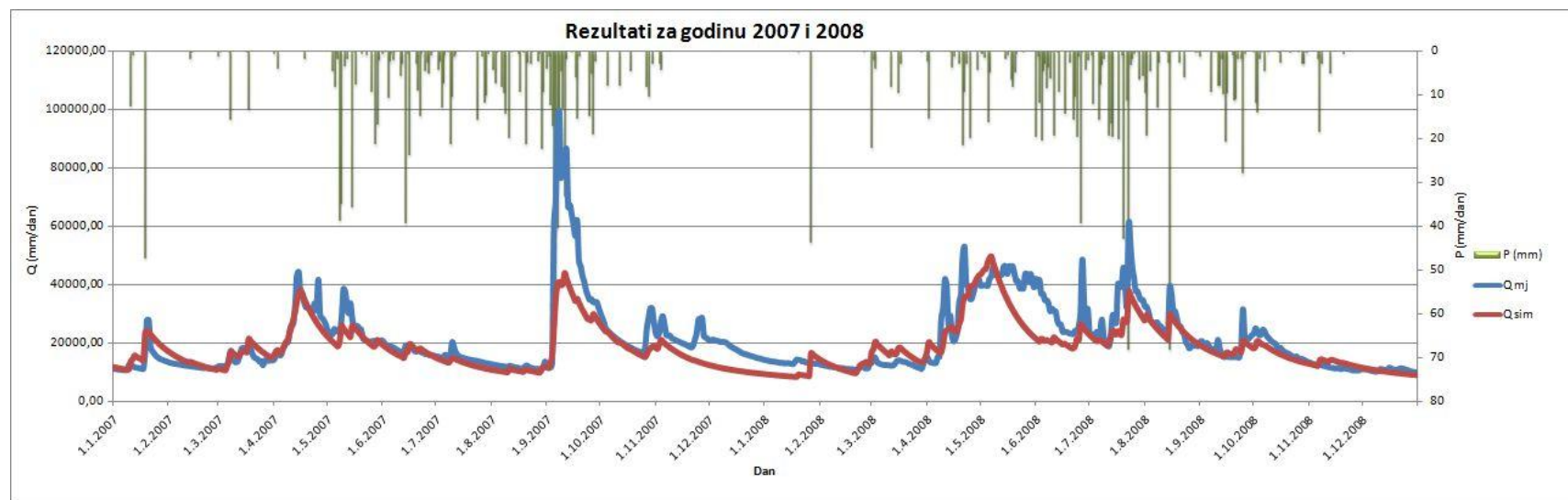


Graf 38: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2003. i 2004.

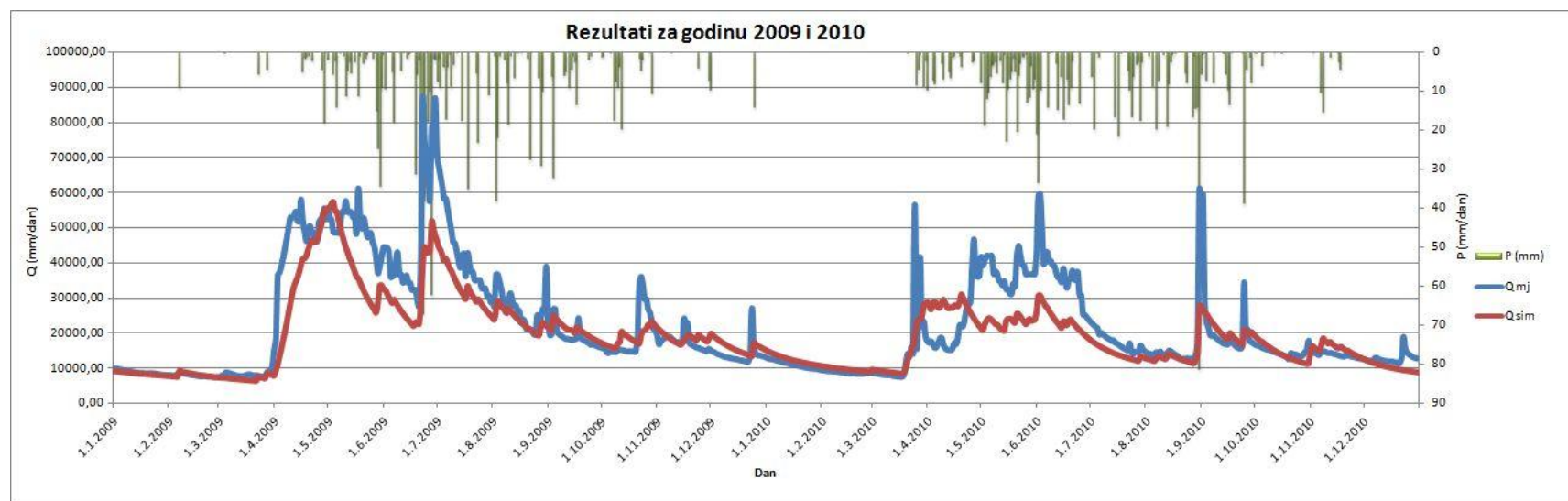


Graf 39: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2005. i 2006.

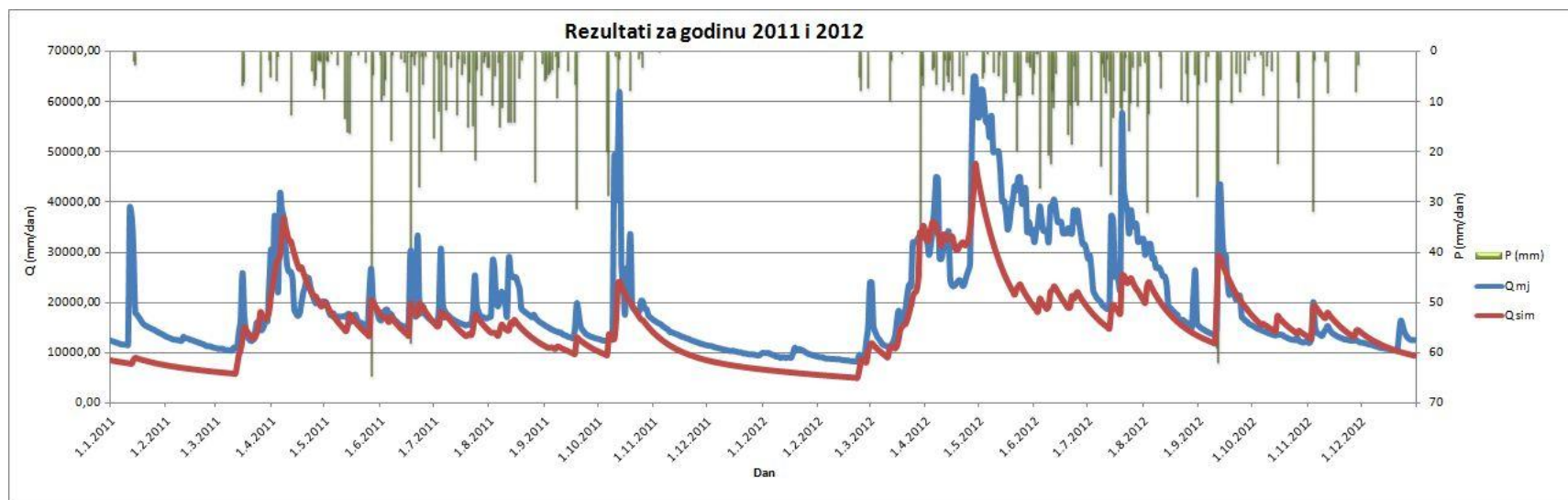




Graf 40: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2007. i 2008.



Graf 41: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2009. i 2010.



Graf 42: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2011. i 2012.



## 5. USPOREDBA REZULTATA

Rezultati prve metode dokazuju, s faktorom površine (2,5 i 4,0), da je procijenjena površina slivnog područja (2,08 km<sup>2</sup>) puno veća. Prema „Austrian Journal of Earth Sciences“ površina sliva se procjenjuje na 6,7 km<sup>2</sup> [3], ali kao što možemo vidjeti rezultati pokazuju da je i ta procjena podcijenjena, iako je točnija. To je razlog zašto je potrebno imati na umu da se cirkulacija podzemnih voda krša može razviti iako krška površina ne postoji. U drugoj metodi površina se ne dovodi u račun pa nema ni utjecaja na rezultate, ali time niti mogućnosti procijene površine slivnog područja.

Također je izračunato da je udio qMelt-a oko 30% oborine u svim primjerima prve metode (Tablica 17). Isti udio će se dobiti i za drugu metodu jer je dio izračuna, koji računa otopljeni snijeg, preuzet iz prve metode.

Period	1995-2004 s BT		1995-2004 bez BT		2005-2012 s BT		2005-2012 bez BT	
	P(mm/d)	qMelt	P(mm/d)	qMelt	P(mm/d)	qMelt	P(mm/d)	qMelt
<b>SUM</b>	14585,65	4247,04	14585,65	4225,92	11799,20	3504,03	11799,20	3492,44
		%		%		%		%
<b>qMelt/P</b>	0,29	29,12	0,29	28,97	0,30	29,70	0,30	29,60

Tablica 17: Udio qMelt-a u oborini

Razlika prve i druge metode je u tome što je sva voda u prvom modelu promatrana kao jedan tok vode (otjecanje), dok je u drugom podijeljena na bazno i direktno otjecanje. Svakako će rezultati metode koja promatra otjecanje podijeljeno na bazno i direktno davati bolje rezultate, što je dokazano ovim radom gdje druga metoda ima bolju korelaciju od prve.

Kao što je prije spomenuto, temperatura je izračunata za nadmorsku visinu od 1250 m.n.m., tj. za prosječnu visinu slivnog područja. Bilo bi bolje da se izračunaju različite temperature za različite nadmorske visine. Tako bi dobiti i različite vrijednosti za qMelt. Time bi poboljšali rezultate dobivene ovim metodama.

Bilanca vode u prvoj metodi uključena je u izračun hidrološkog modela, dok je u drugoj metodi to odvojeni izračun. U drugoj metodi bilanca vode predstavljena je kao ravnoteža gdje je granica tlo-zrak granica između koje mora postojati jednakost. Na Grafu 43 prikazani su simulirani rezultati dobivene ovim metodama. Kao što možemo vidjeti na Grafu 43, rezultati obe metode će dati dobre rezultate, ali će prva metoda bolje simulirati vršne vrijednosti. Također je bitno naglasiti da je za prvu metodu uzet primjer s baznim tokom.

Jedna bitna razlika metoda su vrijednosti parametara koje se javljaju u obe metode, kao maksimalni kapacitet tla, koji u prvoj metodi iznosi 30 mm, a u drugoj je za oba sloja tla ukupan 80 mm. Početni sadržaj vode u prvoj metodi je 25 mm to znači da nije popunjen kapacitet tla kao u drugoj metodi, te će u prvoj metodi dio oborine upiti tlo. Također možemo primijetiti da je parametar maksimalnog kapacitet tla u drugoj metodi puno veći nego u prvoj. Parametri pomoću kojih dobivamo vrijednosti akumuliranog i otopljenog snijega ostaju isti jer je taj cijeli dio preuzet iz prve metode te modificiran u drugu.



Graf 43: Usporedba kalibracijskih rezultata dviju metoda

## 6. ZAKLJUČAK

Obe metode daju vrlo dobre korelacije, što pokazuje da se obe mogu koristiti za dobivanje budućeg otjecanja. Glavni razlog što druga metoda ima bolju korelaciju je zbog toga što smo u toj metodi napravili poboljšanje koje se u prvoj metodi ispostavilo kao nedostatak. To je podjela na bazno i direktno otjecanje. Također, obe metode imaju prostora za poboljšanje, što bi dovelo do bolje korelacije te točnijih rezultata.

Dakle, da sumiramo, ovo su neke od rasprava i zaključaka koje su proizašle iz ovog rada:

- 1) Nepoznata stvarna površina slivnog područja krša:  
U prvoj metodi to je dokazano različitim faktorom površine za primjer s i bez baznog toka. U drugoj metodi površina nije procijenjena pa se nije ni napravila usporedba, ali se može dobiti njena vrijednost na isti način kako se napravila i u prvoj metodi. Ovo je dokaz da je krš kao teren jako nepoznat i teško ga je odrediti točno s obzirom na njegovo stalno mijenjanje.
- 2) Doprinos područja s ili bez baznog toka:  
Za prvu metodu smo napravili primjere s i bez baznog toka. Na simuliranim rezultatima možemo vidjeti da primjer bez baznog toka ima veliko odstupanje baznog dijela hidrograma, koji na primjeru s baznim tokom upravo dobivamo s pretpostavljenim baznim tokom.
- 3) Postotak otopljenog snijega koji ide u otjecanje:  
Postotak otopljenog snijega koji može stvoriti otjecanje je 30% oborine, što je skoro trećina oborine koja ide u otjecanje. To je veliki postotak koji bi, u slučaju da je zanemaren, napravio velike pogreške u modelu. Upravo zbog toga je modificirana Palmer-ova metoda u drugoj metodi.
- 4) Bazna i direktna linearna pohrana (otjecanje):  
U prvoj metodi ustanovljeno je da bi podjelom otjecanja na bazno i direktno dobili bolje simulirane rezultate, pa je s tom spoznajom, u drugoj metodi odmah napravljena podjela, te se dobila veću korelaciju.
- 5) Distribuirani pristup (otopljeni snijeg/visina sliva):  
Ovaj dio nije napravljen ni u jednoj ni drugoj metodi, ali ga moramo spomenuti jer se zna da bi podjela sliva na različite visine rezultirala različitim količinama snijega. Temperatura je ovdje ključna komponenta, a ni ona ne bi bila ista za sve visine, te bi time još više poboljšali oba modela.

Sve ove rasprave i zaključci mogu doprinijeti još boljoj korelaciji, iako su korelacije u vrijednosti od 0,85-0,90 za ovako jednostavne metode vrlo dobre.

Metode korištene u ovom radu samo su još jedan u nizu dokaza koji pokazuju neistraženost te posebnost krških terena. Bez obzira koje se metode istraživanja koriste, zbog konstantne izmjene te stvaranja novih pora i pukotina, a time i novih kanala, krš će ostati teren koji je najteže istražiti.

## 7. LITERATURA

- [1] Karst Hydrogeology and Geomorphology, Derek Ford and Paul D. Williams
- [2] Water Resources Engineering in Karst, Petar Milanović
- [3] Austrian Journal of Earth Sciences, Volume 99, 2006
- [4] Development and test of modular hydrological model concept with different degrees of complexity, H. Holzmann and C. Massmann
- [5] Exercise: Hydrology and Water Resources I, Josef Fürst and Hubert Holzmann
- [6] D. Jukić, Autorizirna predavanja iz kolegija Hidrologija krša, Split, 2014
- [7] V. Denić-Jukić, Autorizirna predavanja iz kolegija Inženjerska hidrologija, Split, 2014
- [8] Znanstveni rad: Bilanca vode na istočnom primorju Jadrana, Krešo Pandžić
- [9] Znanstveni rad: Jukić D., Denić-Jukić V., 2009, Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall-runoff model

## POPIS GRAFOVA

Graf 1: Dnevne vrijednosti oborine i otjecanja .....	11
Graf 2: Dnevne vrijednosti temperature .....	11
Graf 3: Mjesečne vrijednosti oborine .....	12
Graf 4: Mjesečne vrijednosti temperature .....	13
Graf 5: Mjesečne vrijednosti otjecanja.....	14
Graf 6: Godišnje vrijednosti oborine, temperature i otjecanja .....	15
Graf 7: Linearna regresija godišnjih vrijednosti oborina i otjecanja.....	16
Graf 8: Rezultati za vremenski period 1995-2004 s baznim tokom.....	27
Graf 9: Rezultati za vremenski period 1995-2004 bez baznog toka .....	28
Graf 10: Rezultati za vremenski period 2005-2012 s baznim tokom.....	29
Graf 11: Rezultati za vremenski period 2005-2012 bez baznog toka .....	30
Graf 12: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1995. i 1996. s baznim tokom.....	31
Graf 13: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1995. i 1996. bez baznog toka .....	31
Graf 14: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1997. i 1998. s baznim tokom.....	32
Graf 15: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1997. i 1998. bez baznog toka .....	32
Graf 16: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1999. i 2000. s baznim tokom.....	33
Graf 17: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1999. i 2000. bez baznog toka .....	33
Graf 18: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2001. i 2002. s baznim tokom.....	34
Graf 19: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2001. i 2002. bez baznog toka .....	34
Graf 20: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2003. i 2004. s baznim tokom.....	35
Graf 21: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2003. i 2004. bez baznog toka .....	35
Graf 22: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2005. i 2006. s baznim tokom.....	36
Graf 23: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2005. i 2006. bez baznog toka .....	36
Graf 24: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2007. i 2008. s baznim tokom.....	37
Graf 25: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2007. i 2008. bez baznog toka .....	37
Graf 26: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2009. i 2010. s baznim tokom.....	38
Graf 27: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2009. i 2010. bez baznog toka .....	38
Graf 28: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2011. i 2012. s baznim tokom.....	39
Graf 29: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2011. i 2012. bez baznog toka .....	39
Graf 30: Podjela otjecanja na bazno i direktno otjecanje .....	47
Graf 31: Godišnje vrijednosti komponenti Palmer-ove metode.....	50
Graf 32: Rezultati za vremenski period 1995-2004 .....	51
Graf 33: Rezultati za vremenski period 2005-2012 .....	52
Graf 34: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1995. i 1996. ....	53
Graf 35: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1997. i 1998. ....	53
Graf 36: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 1999. i 2000. ....	54
Graf 37: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2001. i 2002. ....	54
Graf 38: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2003. i 2004. ....	55
Graf 39: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2005. i 2006. ....	55
Graf 40: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2007. i 2008. ....	56
Graf 41: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2009. i 2010. ....	56
Graf 42: Detaljni rezultati otjecanja za godinu 2011. i 2012. ....	57
Graf 43: Usporedba kalibracijskih rezultata dviju metoda .....	59



**POPIS SLIKA**

Slika 1: Globalna raspodjela karbonatnih stijena. (Karta sastavljen pomoću GIS-a) .....	1
Slika 2: Podrijetlo pojma krš .....	2
Slika 3: Proces okršavanja .....	4
Slika 4: Shematski dijagram prikazuje stupanj do kojeg voda cirkulira i stijena se otapa na različitim dubinama ispod površine zemlje [2] .....	6
Slika 5: Odnos između okršavanja i dubine na temelju ispitivanja propusnosti u 146 bušotina Dinarskog krša istočne Hercegovine .....	6
Slika 6: Krški izvor .....	8
Slika 7: Karta sliva Wasseralm izvora .....	9
Slika 8: Proces evapotranspiracije .....	17
Slika 9: Ciklus vode (preuzeto sa stranice U.S. Geological Survey) .....	18
Slika 10: Prikaz jednostavnog procesa koji se koristi na BOKU (Universität für Bodenkultur Wien, Austrija) Model uzima u obzir prethodnu oborinu, otopljeni snijeg i dijeli ih na sporo (podzemne vode) i brzo (linearno skladištenje) otjecanje [4] .....	19
Slika 11: Dijelovi jednostavnog modela [5] .....	20
Slika 12: Faktor redukcije [5] .....	22
Slika 13: Shematski prikaz komponenti Palmer-ove vodne ravnoteže .....	40
Slika 14: Transformacija oborine u otjecanje .....	45
Slika 15: Linearni rezervoar .....	45

**POPIS TABLICA**

Tablica 1: Mjesečne vrijednosti oborine .....	12
Tablica 2: Mjesečne vrijednosti temperature .....	13
Tablica 3: Mjesečne vrijednosti otjecanja .....	14
Tablica 4: Godišnje vrijednosti oborine, temperature i otjecanja .....	15
Tablica 5: Popis parametara s baznim tokom      Tablica 6: Popis parametara bez baznog toka .....	21
Tablica 7: Izračun jednostavnog modela.....	23
Tablica 8: Podaci otjecanja za razdoblje 1995-2004 s baznim tokom .....	27
Tablica 9: Podaci otjecanja za razdoblje 1995-2004 bez baznog toka.....	28
Tablica 10: Podaci otjecanja za razdoblje 2005-2012 s baznim tokom .....	29
Tablica 11: Podaci otjecanja za razdoblje 2005-2012 bez baznog toka.....	30
Tablica 12: Izračun Palmer-ove metode.....	42
Tablica 13: Izračun hidrološkog modela .....	48
Tablica 14: Godišnje vrijednosti komponenti Palmer-ove metode i kontrola.....	49
Tablica 15: Podaci otjecanja za razdoblje 1995-2004.....	51
Tablica 16: Podaci otjecanja za razdoblje 2005-2012.....	52
Tablica 17: Udio qMelt-a u oborini.....	58