Analiza izmjerenih i teorijskih vremena koncentracije te njihov utjecaj na računske hidrograme na slivu rijeke Krapinice

Vuco, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:110572

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Josip Vuco

Analiza izmjerenih i teorijskih vremena koncentracije te njihov utjecaj na računske hidrograme na slivu rijeke Krapinice

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, studeni 2024.

Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Josip Vuco

Analiza izmjerenih i teorijskih vremena koncentracije te njihov utjecaj na računske hidrograme na slivu rijeke Krapinice

DIPLOMSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Damir Bekić

Zagreb, studeni 2024.

University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Josip Vuco

Analysis of measured and theoretical concentration times and their impact on calculated hydrographs in the Krapinica River Basin

MASTER THESIS

Supervisor: izv. prof. dr. sc. Damir Bekić

Zagreb, November 2024

SAŽETAK

U ovom radu prikazuje se usporedba teorijskih i empirijskih vremena koncentracije i vremena zakašnjenja na primjeru sliva rijeke Krapinice. Cilj rada bio je ustvrditi pouzdanost teoretskih vrijednosti vremena zakašnjenja i koncentracije i njihov utjecaj na oblik hidrograma otjecanja. Kao teorijske metode korištene su metode Kirpich (1940.), FAA (1970.), SCS (1954.) i kinematski val (1955.). Za izračun empirijskih vrijednosti korišteni su izmjereni podatci o 5-minutnim oborinama s meteorološke postaje Krapina u razdoblju od 1995. do 2020. godine, te izmjereni starni protoci na hidrološkoj postaji Krapina. Analizom podataka o oborinama i protocima dobivene empirijske vrijednosti vremena koncentracije i zakašnjenja. Teorijske vrijednosti dobivene iz fizikalnih karakteristika vodotoka i uzvodnog slivnog područja uz korištenje teorijski određenih formula (Kirpich, FAA, SCS i kinematski val). Nadalje, izrađena je analiza utjecaja različitih vrijednosti vremena koncentracije sliva na oblik hidrograma otjecanja. Računski hidrogrami dobiveni su hidrološkim proračunom u *HEC-HMS* softveru.

Ključne riječi: vrijeme koncentracije, vrijeme zakašnjenja, maksimalni protok, hidrogram otjecanja

SUMMARY

This paper presents a comparison of theoretical and empirical times of concentration and lag times using the example of the Krapinica River basin. The aim of the paper is to establish the reliability of theoretical values of lag time and time of concentration and their impact on the shape of the runoff hydrograph. Theoretical methods used include the Kirpich method (1940), FAA method (1970), SCS method (1954), and kinematic wave method (1955). Empirical values are calculated using measured data on 5-minute rainfall from the Krapina meteorological station over the period from 1995 to 2020, along with recorded flow rates from the Krapina hydrological station. By analyzing the data on rainfall and flows, empirical values for the time of concentration and lag time are obtained. Theoretical values are derived from the physical characteristics of the watercourse and upstream basin area, using theoretically established formulas (Kirpich, FAA, SCS, and kinematic wave). Furthermore, an analysis of the impact of different basin concentration times on the shape of the runoff hydrograph is conducted. Calculated hydrographs are obtained through hydrological modeling in HEC-HMS software.

Key words: time of concentration, lag time, peak flow, hydrograph

SADRŽAJ

SAŽETAK ..... **iv**
SUMMARY ..... **v**
SADRŽAJ ..... **vi**
1 UVOD **1**
2 METODOLOGIJA **2**
2.1. Metodologija empirijskih vrijednosti 2
2.1.1 Odabir velikovodnih događaja 2
3.2. Metodologija teorijskih metoda 9
3.2.1 Kirpicheva metoda 9
3.2.2 FAA metoda 9
3.2.3 SCS metoda 11
3.2.4 Metoda kinematskog vala 12
4 PREGLED PODLOGA I ODABIR PODRUČJA **14**
5 ANALIZA RJEŠENJA **19**
5.1. Analiza empirijskih rješenja 19
5.2. Analiza teorijskih rješenja 25
6 USPOREDBA **27**
7 ZAKLJUČAK **37**
POPIS LITERATURE **38**
POPIS SLIKA **39**
POPIS TABLICA **40**

1 UVOD

Razumijevanje vremena odaziva otjecanja sa sliva nakon oborina ključno je pitanje primijenjene hidrologije. Vrijeme zakašnjenja (t_L) i vrijeme koncentracije (t_C) dvije su povezane mjere koje pokazuju koliko brzo vodotok reagira na oborine koje stvaraju otjecanje preko sliva. Obje su značajne jer odražavaju hidrološke karakteristike sliva te su ključne prilikom korištenja hidrografova poplava. To je od iznimnog značaja za projektiranje, planiranje i rad hidrotehničkih građevina, ali i za obrane od poplava.

Glavni cilj ovoga rada usporedba je teorijskim obrascima dobivenih vremena koncentracije i vremena zakašnjenja s istim vrijednostima dobivenih empirijskim putem kao i izmjerenih vrijednosti. Usporedba se vrši na djelu sliva rijeke Krapinice od njenog izvora do hidrološke postaje Krapina. Ukupno se radi o 74 km^2 sliva, a duljina toka do hidrološke postaje iznosi 11,6 km. Za promatrano područje karakterističan je kontinentalni režim oborina s prosječnim godišnjim oborinama od 700 do 950 mm, uz izraženi maksimum oborina u rujnu. Promatrani sliv ima lepezasti oblik, a glavna karakteristika takvoga tipa sliva jest nagla koncentracija i kratko otjecanje. Dodatno, uz podatke o protocima s hidrološke postaje Krapina, za informacije o zabilježenim oborinama korišteni su podatci s meteorološke postaje Krapina. Oborine zabilježene na postoji u svrhu izrade ove usporedbe rasprostranjene su po cijeloj površini sliva s istim intenzitetom i trajanjem. U svrhu izračuna teorijskih vrijednosti korišten je računalni program *QGIS* pomoću kojeg su dobivene karakteristike tla na području sliva i ostale veličine potrebne u proračunu. Modeli oborina i odaziva sliva izrađeni su u računalnom programu *HEC-HMS*. Kao teorijske metode za izračun vremena koncentracije i otjecanja korištene su: SCS metoda, FAA metoda, metoda po Kirpichu i metoda kinematskog vala.

2 METODOLOGIJA

Obzirom da je glavni cilj ovoga rada usporedba rješenja teorijski i empirijski dobivenih vrijednosti vremena koncentracije, vremena zakašnjenja i količine efektivne oborine. Prije svega, potrebno je objasniti način dobivanja istih vrijednosti empirijskom kao i teorijskim metodama. Za dobivanje vrijednosti u empirijskom smislu, promatran je vremenski period od 30 godina podataka o oborinama i protocima na hidrološkoj i meteorološkoj postaji Krapina. Promatrano područje odabrano je zbog svojih karakteristika. Mali sliv lepezastog oblika hidrogramu daje jasno vidljive odazive na kišne događaje. Dodatno, postoje podatci o oborinama i protocima u dovoljno velikom vremenskom periodu za uspješnu i značajnu analizu. Također, dostupne su sve potrebne informacije o karakteristikama samog sliva; vrsti tla i načinu upotrebe područja kao i informacije o vodotoku kako bismo mogli odrediti teorijske vrijednosti vremena zakašnjenja i vremena koncentracije. Iz tih razloga može se zaključiti kako je sliv pogodan za vršenje ovakve usporedbe.

2.1. Metodologija empirijskih vrijednosti

Za uspješno određivanje vremena koncentracije i vremena zakašnjenja promatranog djela sliva rijeke Krapinice, potrebno je uzeti u obzir veliko vremensko razdoblje (25+ godina). Konkretno u ovom slučaju, analizirani su podatci o oborinama i protocima u periodu od 1990. do 2020. godine. Podatci o protocima preuzeti su sa hidrološke postaje Krapina, a podatci o oborini uzeti su s meteorološke postaje Krapina. S tim podatcima moguće je pristupiti analizi vremena koncentracije i zakašnjenja sliva. Za prvi korak u empirijskoj analizi potrebno je odrediti velikovodne događaje u promatranome vremenskom periodu.

2.1.1 Odabir velikovodnih događaja

Kao potencijalni događaji za analizu uzimani su događaji u kojima se javlja protok (Q_i) veći od 50% maksimalnog godišnjeg protoka ($Q_{50\%max,\,god}$).

$$Q_i \geq Q_{50\%max,god} \quad [1]$$

Iako je gledan period od 1990. godine, u periodu do 1994. godine mjerenja su nepotpuna te su te godine odbačene u analizi. Iz tog razloga u Tablici 1. događaji od 1990. do 1994. godine nisu prikazani te se analiza bavi isključivo događajima koji se nalaze u razdoblju od 1994. godine do 2020. godine. Zbog nedostatka podataka u početnim godinama analize, u obzir su uzeti i protoci koji su nešto manji od 50 % maksimalnog godišnjeg prosjeka radi što većeg obujma podataka i što točnijih rješenja empirijskih vrijednosti.

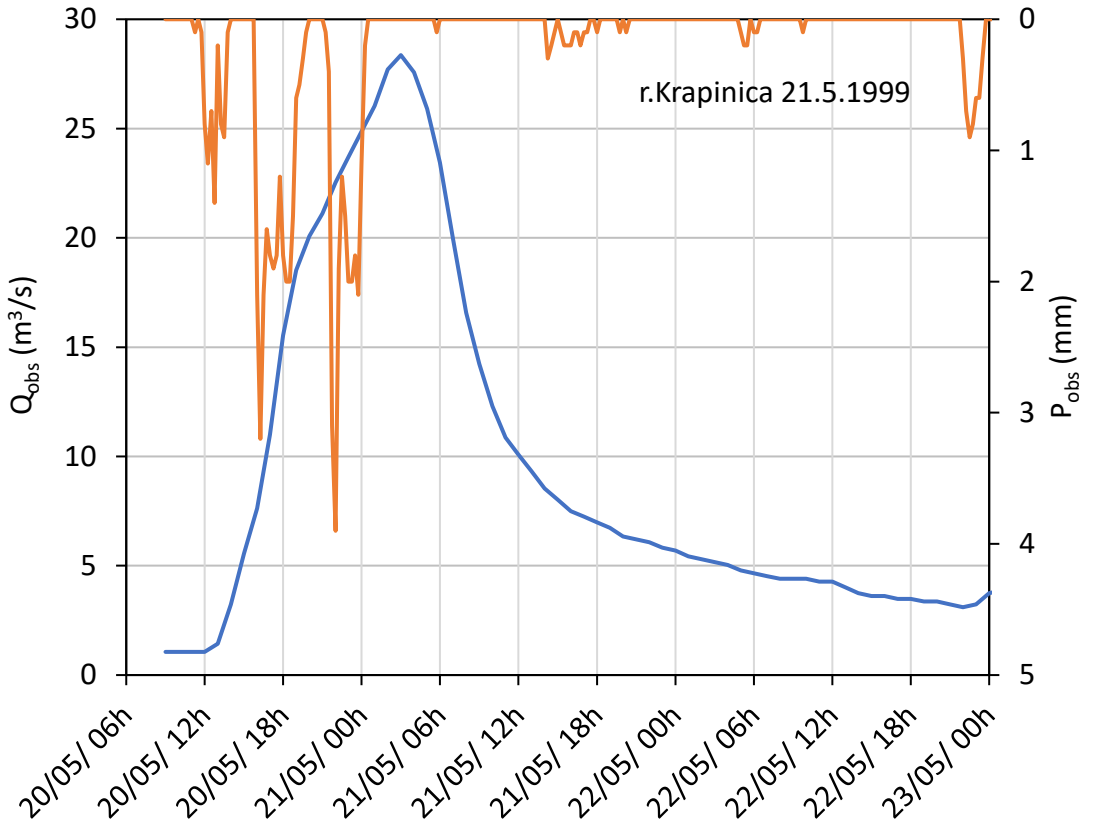
Tablica 1.: Prikaz potencijalnih velikovodnih događaja kroz protoke

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God	50% $Q_{max, god}$
1994	18.7	6.1	5.5	20.3	1.7	13.6	6.4	3.7	3.3	20.8	10.4	18.1	20.8	10.4
1995	17.2	22.0	16.5	1.8	13.1	4.2	6.1	15.0	21.0	0.5	2.6	13.2	22.0	11.0
1996	8.6	10.5	1.2	13.7	15.3	3.9	13.6	4.4	7.8	5.3	4.8	5.4	15.3	7.6
1997	5.3	7.8	1.8	3.8	6.2	11.9	5.1	1.2	2.1	5.0	4.3	25.2	25.2	12.6
1998	0.7	0.3	10.5	3.4	4.1	11.8	15.2	7.5	27.7	16.8	24.3	2.1	27.7	13.9
1999	1.9	12.7	4.5	10.2	28.4	25.0	8.4	11.3	4.8	17.5	1.1	17.0	28.4	14.2
2000	1.6	2.1	9.7	1.3	2.5	2.7	1.4	0.2	1.1	6.2	11.4	10.6	11.4	5.7
2001	10.9	2.2	6.7	15.0	8.9	3.6	1.8	0.4	8.3	0.7	4.8	3.5	15.0	7.5
2002	0.6	11.1	12.7	14.9	0.9	1.3	6.9	11.5	2.2	10.0	6.3	8.9	14.9	7.4
2003	2.0	2.2	3.2	0.7	0.6	0.1	3.1	0.5	1.6	5.4	3.2	4.9	5.4	2.7
2004	3.8	0.9	11.1	8.9	3.9	4.4	1.2	4.4	3.5	10.7	8.3	6.2	11.1	5.6
2005	0.6	11.0	9.7	13.5	12.0	0.6	10.7	3.7	6.3	3.4	9.7	16.2	16.2	8.1
2006	4.9	4.0	24.5	9.4	20.5	7.8	1.1	6.7	10.7	2.6	4.6	1.4	24.5	12.2
2007	2.9	12.4	13.6	0.7	1.9	6.1	1.3	3.6	8.0	13.9	8.0	14.5	14.5	7.3
2008	0.7	1.1	12.6	1.3	2.5	21.8	5.5	3.7	4.7	3.6	5.1	12.9	21.8	10.9
2009	15.4	10.7	15.0	1.5	2.7	7.6	6.6	4.0	0.4	0.4	2.5	4.7	15.4	7.7
2010	1.8	15.2	2.7	6.3	6.3	5.0	1.4	2.3	20.7	0.6	11.0	13.6	20.7	10.4
2011	0.9	0.4	1.7	1.8	0.7	8.8	15.4	0.5	1.8	4.2	0.1	10.0	15.4	7.7
2012	0.4	1.5	0.5	2.3	2.5	1.8	3.7	0.2	9.0	14.6	11.0	10.1	14.6	7.3
2013	11.2	20.3	17.8	7.4	9.5	2.1	0.4	3.6	11.4	1.0	24.3	1.0	24.3	12.2
2014	0.6	13.9	1.0	1.5	7.4	1.9				22.9	10.0	3.4	22.9	11.5
2015	19.0				20.9	5.0	2.4	1.0	2.5	25.1		0.2	25.1	12.6
2016	17.3	13.6	12.8	1.0	13.1	12.3	1.6	2.0	0.7	2.5	18.7	0.3	18.7	9.4
2017	0.3	10.2								11.6	13.8	8.2	13.8	6.9
2018	7.1	2.6											7.1	3.6
2019								2.1	2.5	3.2	19.7	27.0	27.0	13.5
2020	3.5	1.0	5.3	0.9	1.3	2.8	7.3	6.6	8.4	9.3	11.1	15.3	15.3	7.6
Max	19.0	22.0	24.5	15.0	28.4	25.0	15.4	15.0	27.7	25.1	24.3	27.0	28.4	
Sr	5.6	7.9	8.9	5.5	8.1	6.6	5.5	4.2	7.3	7.9	9.2	9.4	18.2	
Min	0.3	0.3	0.5	0.7	0.6	0.1	0.4	0.2	0.4	0.4	0.1	0.2	5.4	

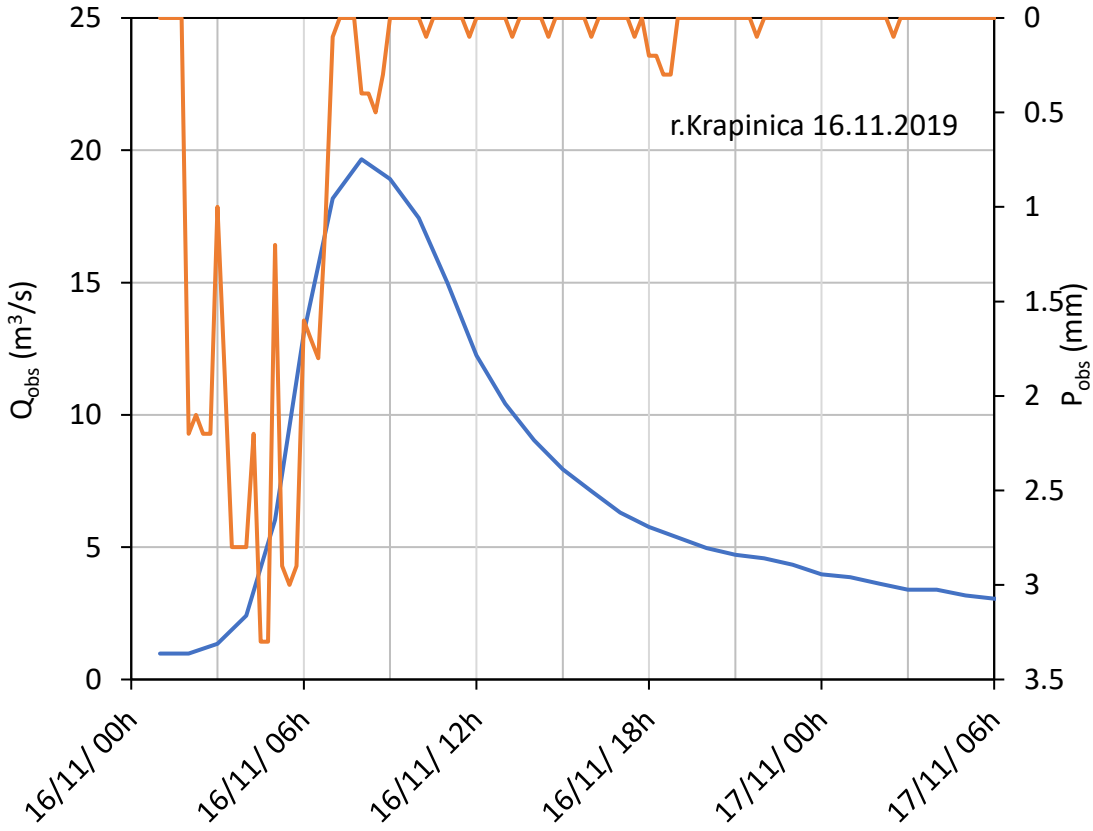
U Tablici 1. žutom bojom naznačeni su svi protoci u pojedinoj godini koji su veći od 50% maksimalnog godišnjeg protoka, ti su događaji potom detaljnije analizirani. Za svaki od potencijalnih događaja izrađen je hijetogram oborina s podatcima o oborini zabilježenim u vremenskom inkrementu od 15 minuta s mp. Krapina, a uz hijetogram izrađen je i hidrogram za koji su podatci preuzeti sa hp. Krapina u vremenskim inkrementima od 1h. Ukupno se stoga radi o 105 potencijalnih događaja za analizu. Ipak, nisu svi događaji uzeti u obzir pri izračunu vremena koncentracije i zakašnjenja u empirijskoj metodi. Razlog odbacivanja pojedinih događaja jest pojava složenog oblik hidrograma otjecanja. Pretežito se radi o dugotrajnijoj kiši

ili kiši sa značajnim promjenama intenziteta u vremenu te zbog toga hidrogram dobiva oblik u kojem se nalazi više '*peak*'-ova protoka u vremenu. Također, u zimskim i proljetnim mjesecima javljaju se protoci s velikim vrijednostima u odnosu na prosječne vrijednosti na Krapinici i prije kišnog događaja te se u pojedinima čak uočava i rast hidrograma prije početka oborine, što se može protumačiti topljenjem snijega na promatranom području. Također, odbačeni su slučajevi u kojima se kišni događaj odvija u dugom vremenskom periodu te ako oborina nastavlja i u periodu nakon vrha hidrograma otjecanja, a da pritom i jasno utječe na granu pada hidrograma, a dodatno su odbačeni i događaji u kojima kišni događaj ne rezultira pojavom direktnog otjecanja [1]. Ukupno se analiza vrši na 68 kišna događaja. Obzirom da je riječ o površini malom slivu i rijeci malih srednjih protoka, odaziv protoka u rijeci na kišne događaje odvija se brzo s rastom vrijednosti protoka u kratkom vremenskom periodu. Upravo zbog te karakteristike vršenje analize pogodno je na ovome slivu. U nastavku je prikazano izdvojenih 6 kišnih događaja te su isti događaji uzeti za pojedinačnu analizu teorijskih i empirijskih vrijednosti, a uz njih su korištene i uspoređivane i srednje vrijednosti svih događaja.

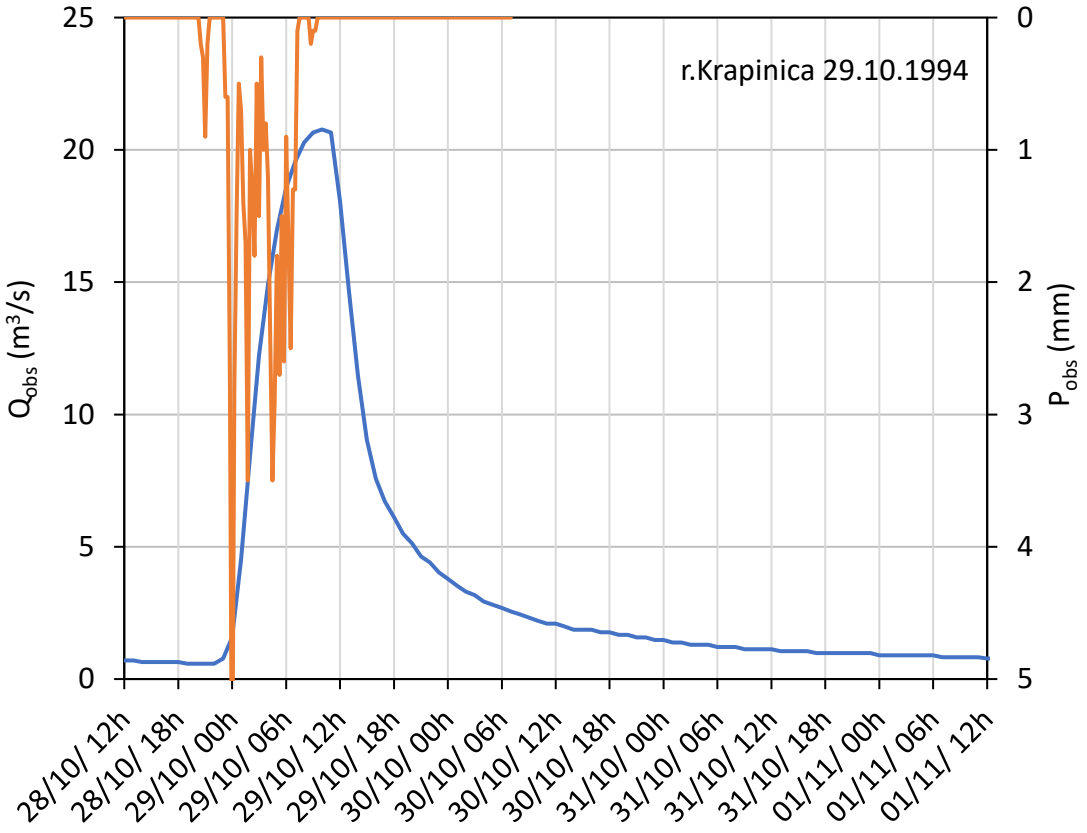
Pomoću poznatih podataka o oborinama i protocima, vršen je proračun vremena koncentracije i zakašnjenja na svakom pojedinom događaju. Za svaki događaj određen je maksimalni zabilježeni protok, i sve oborine do trenutka vrha hidrograma otjecanja (ukoliko su se oborine javljale i nakon vrha hidrograma zanemarivane su). Pomoću tih vrijednosti dobivene su vrijednosti težišta hijetograma oborina, vrijednost završetka efektivnih oborina i završetka direktnog otjecanja. Isti postupak ponavljan je na svim događajima koji ulaze u analizu. S tim vrijednosti zatim lako je i jednostavno izračunati tražene vrijednosti vremena zakašnjenja i koncentracije. Uzimajući u obzir da je vrijeme koncentracije vrijeme koje je proteklo od završetka oborine do početka infleksije na grani pada hidrograma. S druge strane, vrijeme zakašnjenja sliva vremenski označava period između težišta hijetograma oborina do vrha hidrograma.



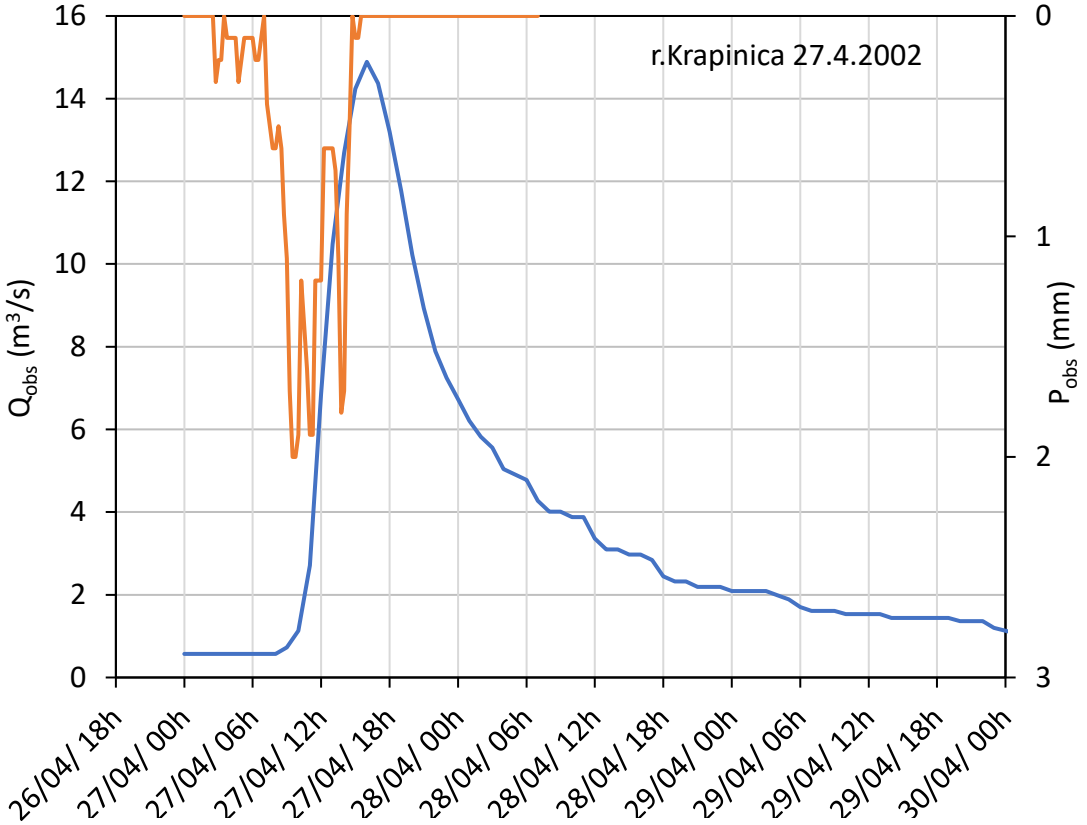
Slika 1.: Događaj 21.5.1999



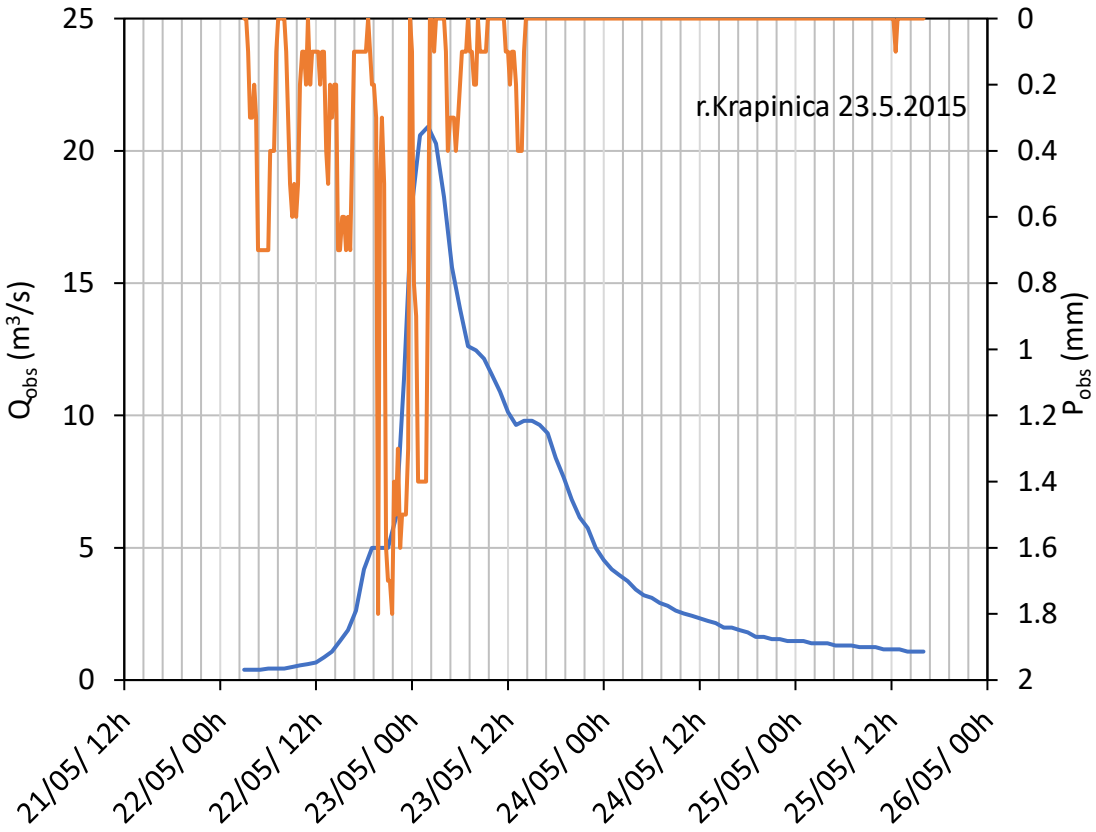
Slika 2.: Događaj 16.11.2019



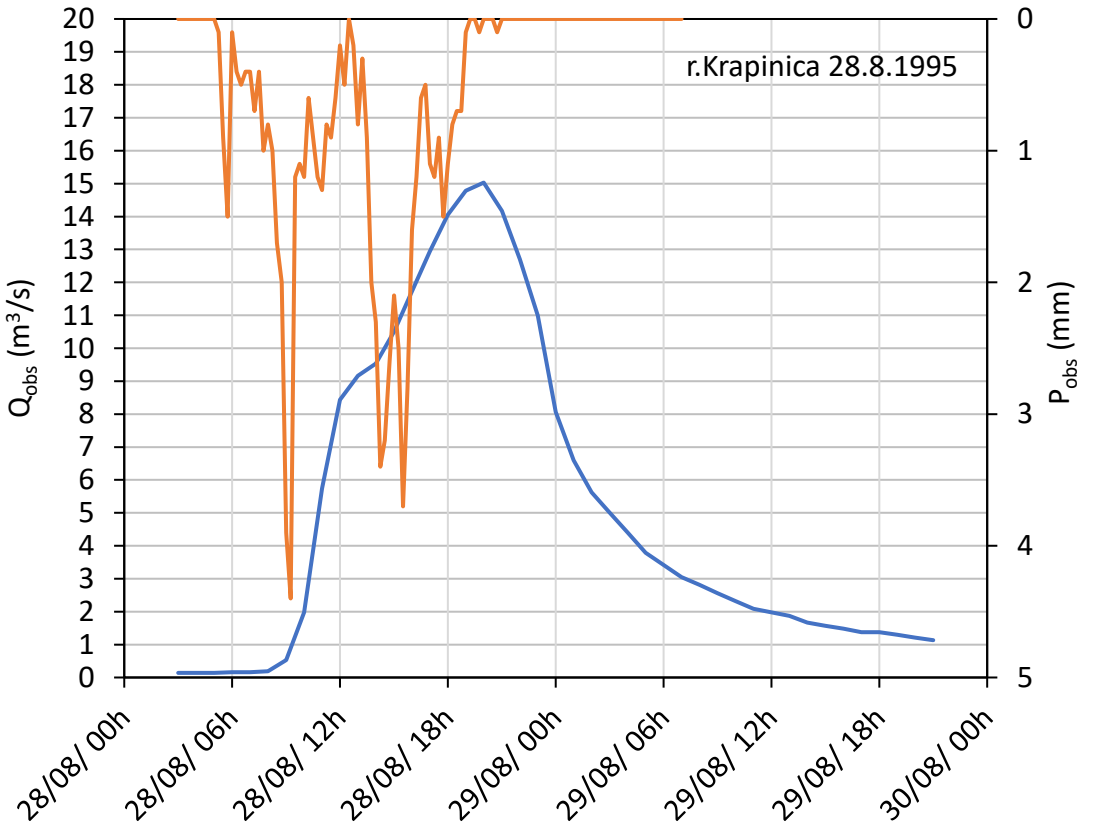
Slika 3.: Događaj 29.10.1994



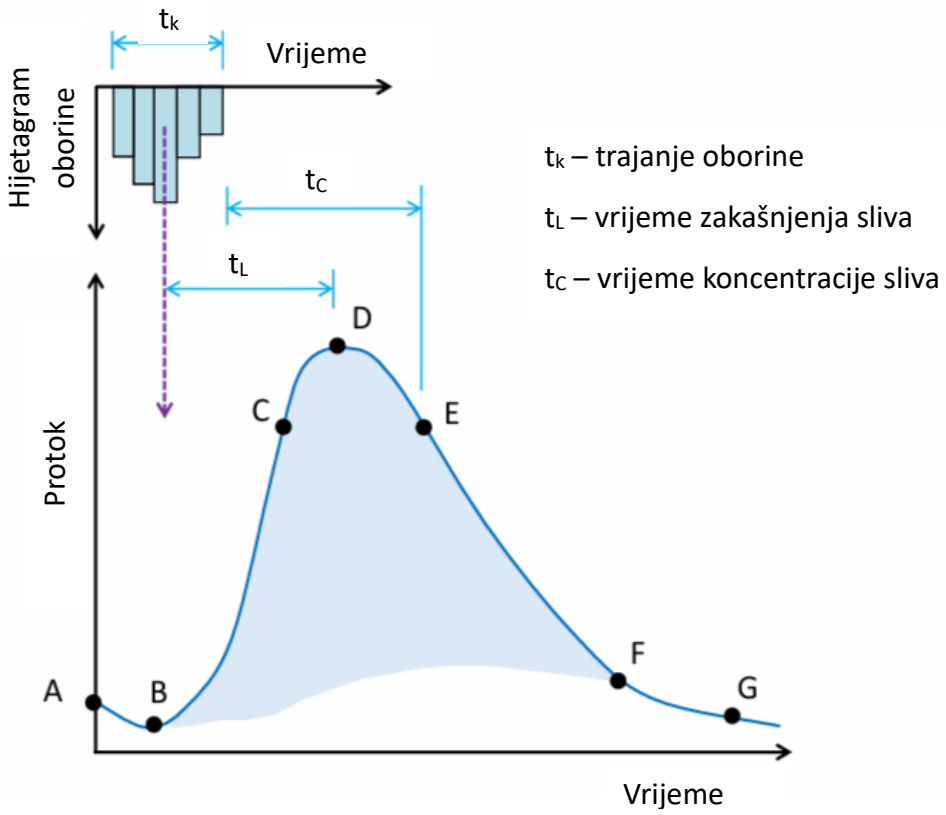
Slika 4.:Događaj 27.4.2002



Slika 5.: Događaj 23.5.2015



Slika 6.: Događaj 28.8.1995



Slika 7.: Prikaz vremena zakašnjenja I koncentracije na primjeru

Kao što je vidljivo na Slici 7., u svrhe ovoga rada računa se i uspoređuje vrijednost vremena koncentracije i vremena zakašnjenja. Pomoću ta dva vremena određujemo odgovor sliva na oborinski događaj. Uz to, dodatno su korištene vrijednosti maksimalnih protoka i vremena prestanka direktnog otjecanja, na slici označeno slovom F. Slično kao i na prikazanoj slici 7 vidljivo je i kako su realni događaji sa sliva prikazani na ranijim slikama oblikom hidrograma slični ovom teoretskom primjeru. Za uspješno izvršavanje proračuna važno je da oblik hidrograma otjecanja ima oblik sličan teoretskome. Ukoliko dolazi do nepravilnosti u obliku hidrograma, odnosno u odgovoru rijeke na kišni događaj, tada je potrebna daljnja analiza i nalaženje mogućih uzročnika promjene oblika.

Valja naglasiti kako se vrijeme koncentracije u ovome radu razdvaja u dvije vrijednosti t_{C1} i t_{C2}. t_{C1} vrijeme je koje je proteklo od kraja zabilježene oborine do točke infleksije na hidrogramau otjecanja na Slici 7. točka infleksije označena je slovom E, a t_{C2} je vrijeme koje je proteklo od točke infleksije do prestanka direktnoga otjecanja, na Slici 7. označeno točkom F.

3.2. Metodologija teorijskih metoda

Tako dobivene empirijske vrijednosti uspoređivat će se s vrijednostima dobivenima pomoću teorijskih metoda. Od teorijskih metoda koristit će se:

- Kirpicheva metoda
- FAA metoda
- SCS metoda
- Kinematski val

Usporedba neće biti vršena samo između empirijske metode i teorijskih, već i između teorijskih metoda međusobno. Stoga će se u nastavku ukratko opisati svaka metoda i njene zakonitosti.

3.2.1 Kirpicheva metoda

Metoda je razvijena 1940. godine na malim ruralnim slivovima u SAD-u, konkretnije u saveznim državama Tennessee i Pennsylvaniji. Riječ je o slivovima s velikim nagibima terena (3%-10%), što ovu metodu čini posebno pogodnom za primjenu u slučaju promatranog djela sliva rijeke Krapinice zbog velikog nagiba terena te dominantno nenaseljenog područja prekrivenog šumama i livadama. Metoda korelira karakteristike površine sliva s vremenom koncentracije na promatranome slivu. Kirpicheva metoda je pogodna za malene slivove s dominantnim tečenjem u vodotoku. Vrijeme koncentracije Kirpich nije odredio prema brzini tečenja vode u vodotoku, već prema oblicima i translacijama promatranih hidrografova. [2] Stoga je prema Kirpichu zapravo vrijeme koncentracije u vezi s valnom brzinom, a ne sa brzinom tečenja. Standardni izraz koji se koristi u ovoj metodi za izračun vremena koncentracije glasi:

$$t_c = \frac{0{,}0195 \times L^{0{,}77}}{S^{0{,}385}} \qquad [2]$$

Gdje je: L – duljina toka

S – prosječan pad sliva

U konkretnom slučaju, podatci o duljini toka i prosječnog pada sliva dobiveni su korištenjem programa *QGIS* (eng. *Quantum Geographic Information System*), o tome je više riječi u poglavlju 3.

3.2.2 FAA metoda

Glavna primjena ove metode, i razlog zbog kojeg je razvijena jest za odvodnju s pista na aerodromima. Razvijena je 1970. godine od strane Federalne avijacijske administracije (eng. *Federal Aviation Administration*). Međutim, metoda je naišla i na širu primjenu od prvotno

zamišljene. Posebno je pogodna kada se sagledavaju urbanizirani prostori. [3] Vrijeme koncentracije dobiva se slijedećom jednadžbom:

$$t_c = \frac{0{,}7\times(1{,}1-C)\times L^{0{,}5}}{S^{0{,}385}} \quad [3]$$

Gdje je: L – duljina toka

S – prosječan pad sliva

C – koefijcijent otjecanja u racionalnoj metodi

Koeficijent otjecanja C, određuje se ovisno o karakteristikama tla, ovisno o pokrovu i nagibu terena kao i povratnom razdoblju oborine.

U racionalnoj metodi, koeficijent otjecanja C najmanje je precizna varijabla. Njegova upotreba u formuli podrazumijeva fiksni omjer vršne stope otjecanja i intenziteta oborine za slivno područje, što u stvarnosti nije slučaj. [4]

Tablica 2.: Tablične vrijednosti koeficijenta otjecanja u racionlanoj metodi

	Povratno razdoblje P_R						
Pokrov i nagib terena	**2 godine**	**5 godina**	**10 godina**	**25 godina**	**50 godina**	**100 godina**	**500 godina**
Asfalt	0.73	0.77	0.81	0.86	0.9	0.95	1
Beton/krov	0.75	0.8	0.83	0.88	0.92	0.97	1
Zelena područja (groblja, parkovi ...) 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.4	0.44	0.47	0.58
Zelena područja (groblja, parkovi ...) 2-7%	0.37	0.4	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Zelena područja (groblja, parkovi ...) 7+%	0.4	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
Trava 50-70% - 0-2%	0.25	0.28	0.3	0.34	0.37	0.41	0.53
Trava 50-70% - 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Trava 50-70% - 7+%	0.37	0.4	0.42	0.46	0.49	0.53	0.6
Trava 75% - 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.48
Trava75% - 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Trava 75% - 7+%	0.34	0.37	0.4	0.44	0.47	0.51	0.58
Neizgrađena područja - 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.4	0.43	0.47	0.57
Neizgrađena područja - 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.6
Neizgrađena područja – 7+%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
Livade - 0-2%	0.25	0.28	0.3	0.34	0.37	0.41	0.53
Livade - 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Livade – 7+%	0.37	0.4	0.42	0.46	0.49	0.53	0.6
Šume - 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Šume - 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.4	0.44	0.47	0.56
Šume – 7+%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

3.2.3 SCS metoda

SCS metoda je jednostavna, popularna i korisna metoda procjenjivanja vremena koncentracije na slivovima. Metodu je razvila Agencija za konzervaciju prirodnih resursa (eng. *Natural Resources Conservation* Service). Prema ovoj metodi vrijeme koncentracije dobiva se slijedećom jednadžbom:

$$t_c = 0{,}0136 \times \frac{L^{0,8}}{S^{0,5}} \times \left(\frac{1000}{CN-9}\right)^{0,7} \quad [4]$$

Gdje je: L – duljina toka

S – prosječan pad sliva

CN – broj krivulje otjecanja

Broj krivulje otjecanja (CN) vezan je za maksimalni kapacitet tla za vodu (d), što dominatno predstavlja infiltraciju koja se javlja i nakon što je započelo otjecanje.

$$CN = \frac{25400}{254+d} \quad [5]$$

U praksi se broj krivulje otjecanja određuje obzirom na tip tla i njegovu uporabnu funkciju. Tipovi tla podijeljeni su u 4 kategorije A, B, C i D ovisno o sposobnostima otjecanja i infiltracije.

Procjena CN broja za svrhe ovoga rada napravljen je tabličnim putem.

Tablica 3.: Tablične vrijednosti koeficijenta CN za SCS metodu

Vegetacijski pokrov	Površinska obrada tla	Tip tla A	Tip tla B	Tip tla C	Tip tla D
Ugar	Ravni redovi	77	86	91	94
	Ravni redovi	70	80	87	90
Okopavine (kulture rijetka sklopa)	Ravni redovi	67	73	79	83
	Obrada po izohipsama	64	73	78	82
	O. po izohipsama + terase	63	73	77	82
Žitarice (niske trave)	Ravni redovi	64	76	84	88
	Obrada po izohipsama	62	74	82	85
	O. po izohipsama + terase	60	71	79	82
Leguminoze ili livade u plodoredu	Ravni redovi	62	75	81	84
	Obrada po izohipsama	60	72	78	81
	O. po izohipsama + terase	57	70	76	78
Pašnjaci	Slabi	68	79	86	89
	Normalni	49	69	79	84
	Dobri	39	61	74	80
	O. po izohipsama, slabi	47	67	81	88
	O. po izohipsama, normalni	25	59	75	83
	O. po izohipsama, dobri	6	35	50	79
Livade	Normalne	30	58	71	78
Uzgojene šume, lugovi	Niske trnspirac. sposob.	45	66	67	83
	Normalne transpirac. sposob.	36	60	63	77
	Visoka transpiracija	25	52	58	69
Salaši	Normalni	59	75	84	88
Putovi	Meka površina - blatnjavi	72	82	87	89
	Tvrda površina	74	84	90	92
Šume koje nisu uzgajane - prirodne	Vrlo niska transpiracija	56	78	85	86
	Niska transpiracija	46	68	78	84
	Normalna transpiracija	36	60	70	76
	Visoka transpiracija	26	52	62	69
	Vrlo visoka transpiracija	15	44	54	61
Nepropusna površina		100	100	100	100

3.2.4 Metoda kinematskog vala

Metoda kinematskog vala pruža načina za procjenu vremena koncentracije za otjecanje koristeći pojednostavljene pretpostavke o tome kako se voda kreće po površini pod utjecajem gravitacije i trenja. Ova se metoda često primjenjuje u hidrologiji za modeliranje kretanja vode preko površina, posebno u područjima gdje dolazi do plitkog, ravnomjernog toka, kao što su

urbane površine ili poljoprivredna zemljišta. Vrijednost t_c metodom kinematskog vala dobiva se pomoću jednadžbe:

$$t_c = 0{,}232 \times \frac{n^{0,6}}{I_{pe}^{0,4}} \times \frac{L^{0,6}}{S^{0,3}} \quad [6]$$

Gdje je: L – duljina toka

S – prosječan pad sliva

n – Manningov koeficijent hrapavosti

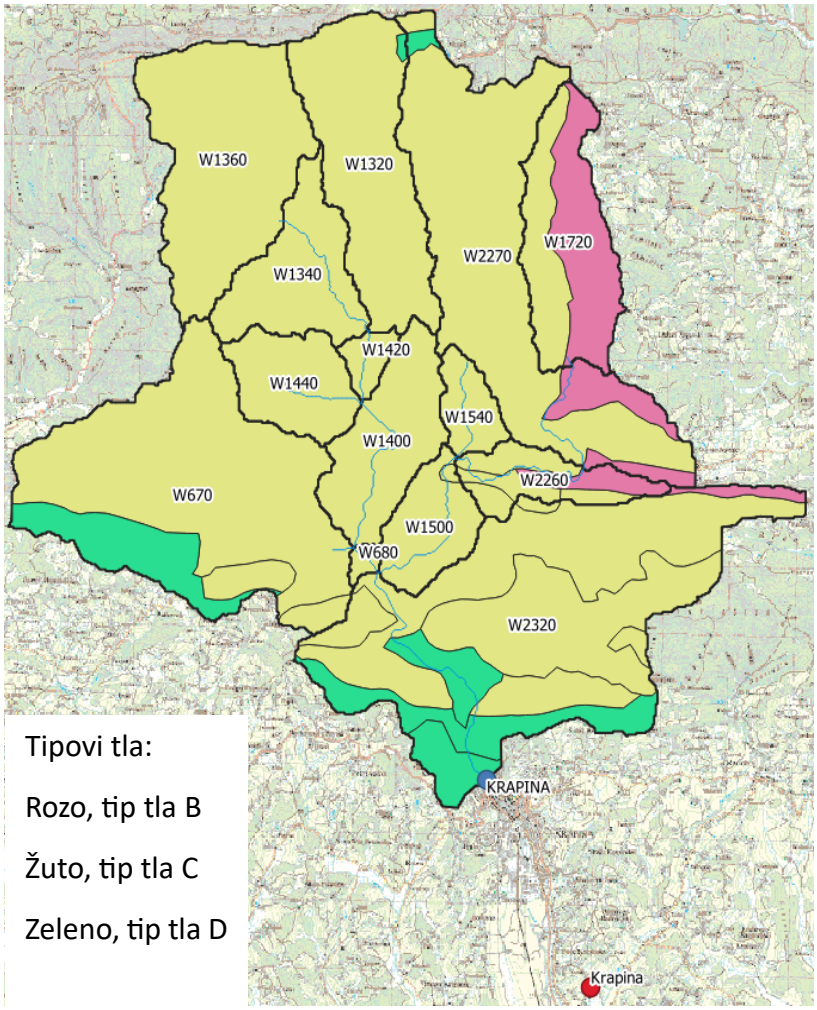
I_{pe} – intenzitet efektivne oborine [mm/mm]

Pristup kinematskog vala koristan je jer omogućava realniju procjenu vremena koncentracije u odnosu na jednostavnije metode, budući da uzima u obzir hrapavost površine i nagib terena. Međutim, pretpostavlja konstantnu količinu oborina i ujednačen tok, što je svakako pojednostavljenje realnih događaja. Dodatno, obzirom da su intenzitet oborina (I_{pe}) i vrijeme koncentracije (t_c) međusobno ovisni, metoda zahtijeva iteraciju kako bi se došlo do konačne vrijednosti. Iteracija se vrši uz poznatu formulu za izračun vremena koncentracije jednadžba 6 te uz poznatu formulu ITP krivulje za povratno razdoblje. ITP krivulje dane su u slijedećem poglavlju na Slici 11..

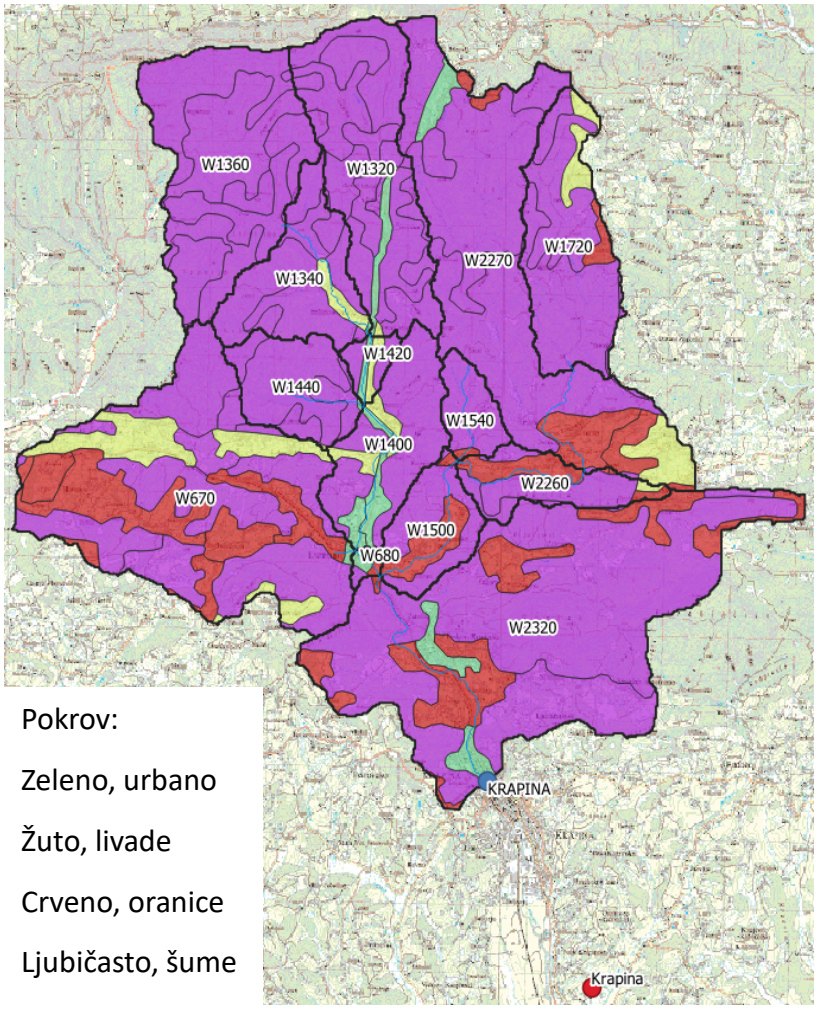
4 PREGLED PODLOGA I ODABIR PODRUČJA

Rijeka Krapinica nalazi se u sjeverozapadnoj Hrvatskoj, pritok je rijeke Krapine i dio je crnomorskoga sliva. Sama rijeka ukupne je dužine 25,8 km. Izvor rijeke nalazi se u blizini naselja Đurmanac, a ušće rijeke u Krapinu nalazi se u blizini mjesta Pavlovac Zabočki. Krapinica je mala rijeka, a veličina sliva rijeke manja od 1000 km^2 te ga stoga smatramo površinom malim riječnim slivom.

Promatrani prostor za ovo ispitivanje jest dio gornjeg toka rijeke Krapinice od njezinog izvora do hidrološke postaje Krapina. Dužina promatranog toka rijeke od izvora do h.p. iznosi 11 694 metra, a površina sliva rijeke iznosi približno 74 km^2. Teren je na tom području brdovit, te je područje uglavnom ruralno s velikom količinom šumskih površina kao i velikog broja oranica i livada. Najveći urbani centri smješteni su uz samu rijeku te obuhvaćaju najmanji dio površine. Što se tiče infiltracijskih sposobnosti tla, tlo na promatranom području prema infiltracijskim je sposobnostima kategorija B, C i D. Što znači da se tlo dominantno sastoji od lesa, ilovače i gline.



Slika 8.: Tipovi tla na slivu



Slika 9.: Tipovi pokrova na slivu

Zbog izražene brdovitosti terena nagib čitavog sliva je značajan. Za potrebe proračuna uzeta je srednja vrijednost nagiba sliva, a ona iznosi 14.6%. Cjelokupni raspon vrijednosti nagiba terena je između vrijednosti od 0.03% do 49.30%. Uzimajući u obzir kako se određivanje koeficijenta C vrši u ovisnosti o pokrovu tla, nagibu terena i povratnom razdoblju. Za određivanje koeficijenta korišteno je povratno razdoblje P_R=25 god, a nagib terena uzet je kao vrijednost veća od 7%.Vrijednosti koeficijenta otjecanja u racionalnoj metodi dobivena je formulom:

$$C = \sum \frac{C_i \times A_i}{A} \qquad [7]$$

Tablica 4.: Određivanje vrijednosti koeficijenta otjecanja za promatrani sliv

Pokrov terena	Površina [m^2]	C broj
oranice	9604068.285	0.48
šume	59786684.13	0.45
livade	3609288.809	0.46
urbano	1963983.289	0.87

S dostupnim podatcima o vrsti tla na slivu i o tipovima pokrova na slivu, moguće je izračunati CN broj. Za uspješno dobivanje vrijednosti CN-a cjelokupni sliv razvrstan je u skupine kako je prikazano u Tablici 5..

Tablica 5.: Određivanje vrijednosti CN broja za promatrani sliv

Vegetacijski pokrov	Tip tla	Površina [m^2]	CN broj
livade	B	658619.948	58
oranice	B	698551.125	61
šume	B	3380776.644	60
livade	C	2915024.011	71
oranice	C	7402578.247	74
šume	C	52445031.79	70
urbano	C	1463754.659	100
livade	D	35644.848	78
oranice	D	1502938.911	80
šume	D	3959724.265	76
urbano	D	500228.629	100

CN broj dobiven je korištenjem slijedeće formule uz poznate vrijednosti različitih površina tla prema:

$$CN = \frac{\sum CN_i \times A_i}{\sum A_i} \quad [8]$$

Obzirom na dostupne podatke o tipovima tla i pokrova promatranoga područja, te uz poznate vrijednosti nagiba sliva, njegove površine i duljine vodotoka, lako se dobivaju ostali parametri potrebni za izračun teorijskih vremena koncentracije i zakašnjenja.

Za vrijednost Manningova koeficijenta uzeta je vrijednost $n = 0{,}1$ za područje cjelokupnog promatranog sliva. Razlog ove vrijednosti je raspodjela tipova pokrova na slivu. S obzirom da se najvećim djelom radi o šumama, a zatim o oranicama i livadama opravdana je velika vrijednost Manningova koeficijenta. Različita vegetacija na tlu utječe na usporavanje površinskog otjecanja, odnosno doprinose povećanom trenju, a samim time to se odražava i na veću vrijednost koeficijenta [5].

Uz same podatke o karakteristikama tla i sliva, potrebne su informacije i o samoj rijeci Krapinici, oni su preuzeti s hidrološke postaje Krapina. Hp Krapina osnovana je 1989. godine, od studenoga 1995. postaja je automatizirana. Oprema je smještena na lijevoj obali rijeke Krapinice. Od svih dostupnih parametara, za uspješno određivanje empirijskih vrijednosti vremena zakašnjenja i koncentracije, potrebni su satni podatci o protoku.

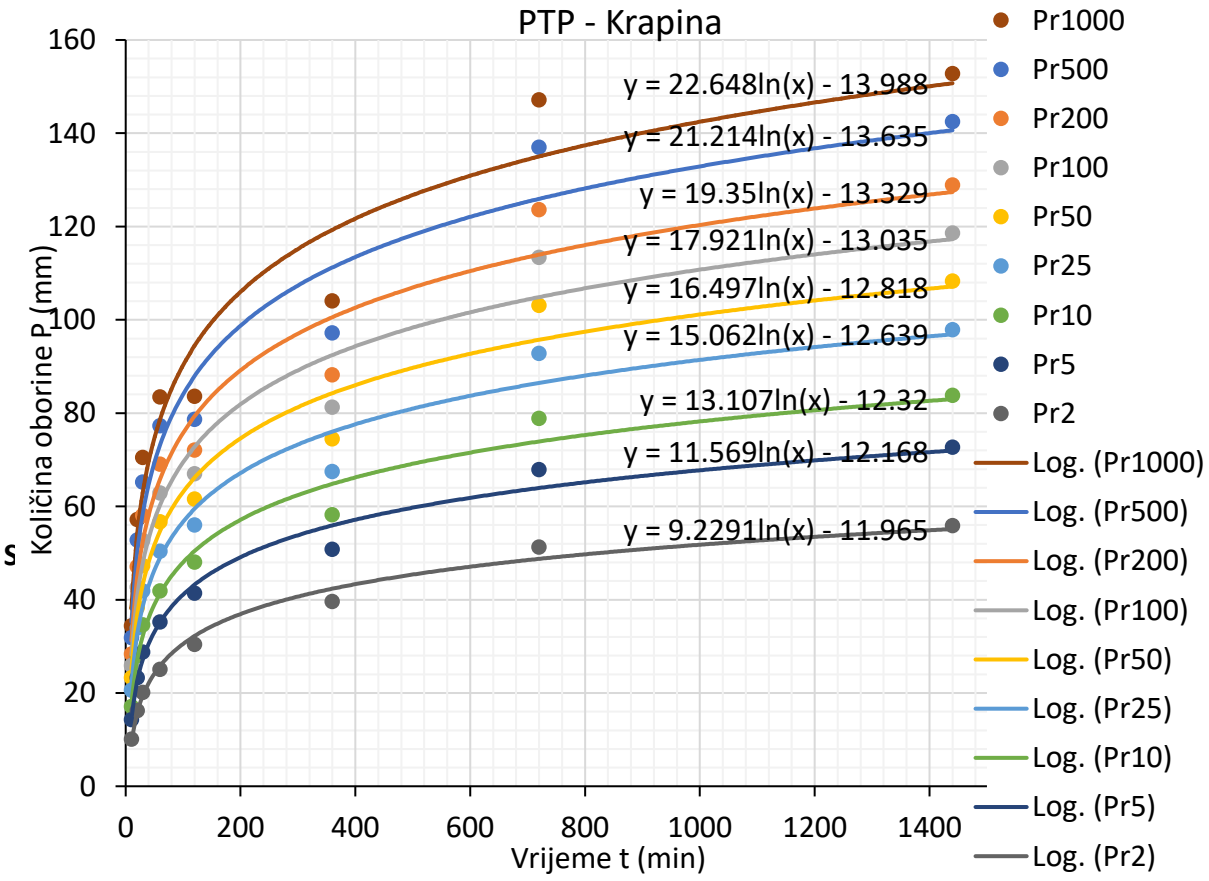
Dodatno, osim hidrološke postaje Krapina, podatci o oborinama za promatrani period dobiveni su s meteorološke postaje Krapina. GMP Krapina s radom je započela 1.9.1993. Riječ

je o automatskoj meteorološkoj postaji koja se nalazi na visini od 223 m. nm.. Na postaji se prikupljaju podatci o temperaturi zraka, relativnoj vlažnosti, tlaku zraka, brzini i smjeru vjetra, sunčevog zračenja, različitih tipova oborine… Za uspješnu izvedbu empirijskog modela korištene su informacije o oborinama, konkretnije, podatci o oborini u vremenskim inkrementima od 15 minuta.

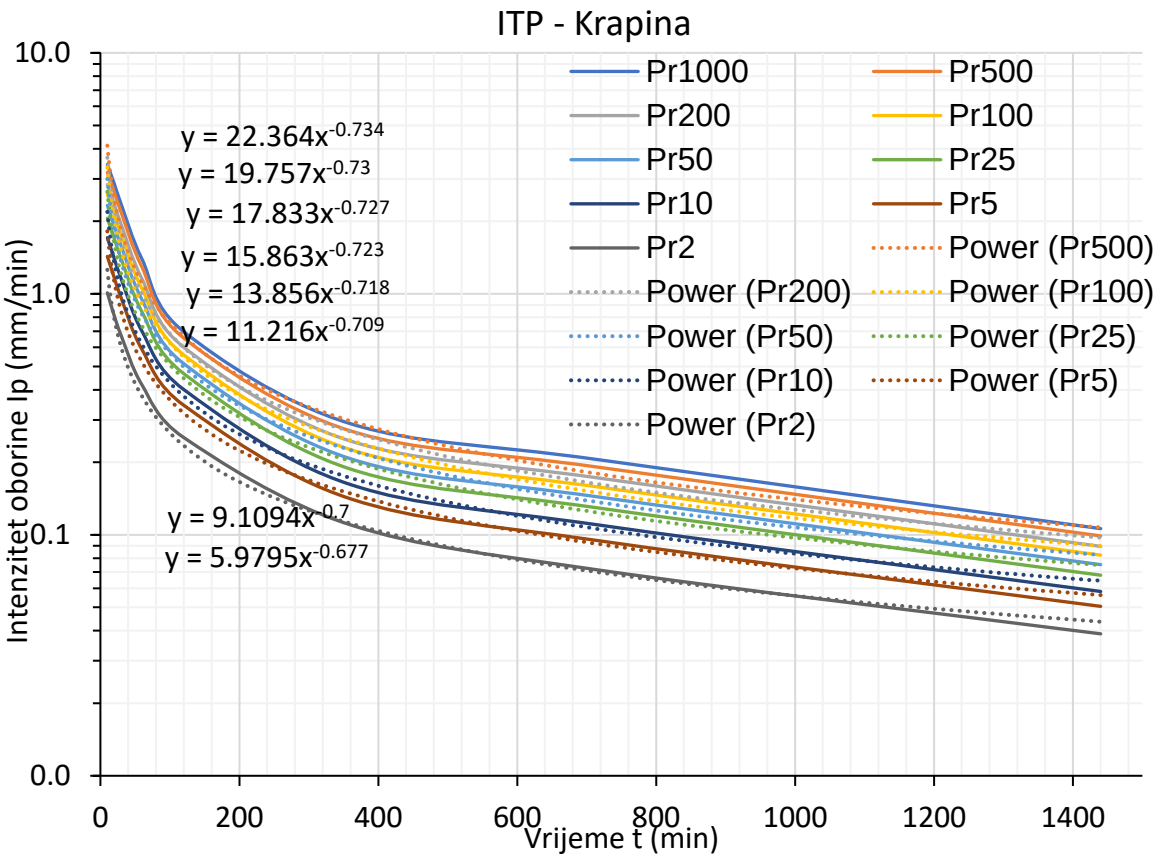
Vrijednosti PTP i ITP krivulja dobivene su korištenjem podataka iz projekta VEPAR. Pomoću ITP krivulje povratnog razdoblja 25 godina, dobivena je vrijednost intenziteta efektivne oborine (I_{pe}).

Tablica 6.: Vrijednosti korištene u proračunu za promatrani sliv

Površina sliva	A	74	km^2
Duljina toka	L	11694.18	m
Prosječan pad sliva	S	0.14606	m/m
Koef. Otjecanja u racionalnoj metodi	C	0.47	-
CN broj krivulje	CN	71	-
Manningov koeficijent hrapavosti	n	0.1	-
Intenzitet efektivne oborine	I_{pe}	1.36	mm/min



Slika 10.: PTP krivulja za mp. Krapina



Slika 11.: ITP krivulja za mp. Krapina

5 ANALIZA RJEŠENJA

U ovom djelu teksta prikazat će se rezultati rješenja dobivenih empirijskim putem pomoću stvarno izmjerenih vrijednosti na promatranome području. Dodatno uz njih će biti prikazani i rezultati dobiveni korištenjem teorijskih jednadžbi navedenih ranije u poglavlju 3.2. uz korištenje poznatih informacija o fizikalnim karakteristikama promatranoga područja dostupnog u poglavlju 4.. Analiza rješenja vršena je u računalnom programu *Microsoft Excel*.

5.1. Analiza empirijskih rješenja

Cjelokupni prikaz empirijskih rješenja za sve promatrane događaje prikazan je u Tablici 7.

Vrijednosti vremena zakašnjenja, koncentracije razlikuju se od događaja do događaja, to je posve očekivano jer se radi o realnim kišnim događajima različitog trajanja i intenziteta pa je i odgovor sliva i rijeke Krapinice na svaki događaj drugačiji.

Odnosi vremena zakašnjenja i oba vremena koncentracije zajedno s karakterističnim maksimalnim protocima svakog promatranog događaja u ovisnosti o datumu događaja prikazani su skupno na Slici 12.. Zbog količine informacija sadržanih u Slici 12, isti su podatci kasnije razdijeljeni u pojedinačne prikaze radi boljeg i jasnijeg pregleda svake pojedine stavke.

Vidljivo je i kako je vrijeme zakašnjenja sliva relativno malo, odnosno u svim promatranim slučajevima manje je od 24 sata, to govori o brzom odzivu sliva na kišu te brzu reakciju u vidu rasta vrijednosti protoka u području nizvodno. Takvi rezultati odgovaraju teoretskim postavkama koje govore kako je vrijeme zakašnjenja manje kod malih slivova. Dodatan utjecaj na kraće vrijeme zakašnjenja jest i relativno veliki nagib terena po cijelom promatranom području, odnosno utjecaj gravitacijskog ubrzanja za otjecanje vode po površini. Uz to, na strmijim slivovima efekt infiltracije je manji, a to dodatno doprinosi kraćem vremenu zakašnjenja.

Za samu analizu zanimljivo je promotriti srednje vrijednosti, kao i one maksimalne i minimalne te sagledati odstupanja od istih vrijednosti. Uz njih u Tablici 8. prikazana je i vrijednost srednje devijacije i to za sve vrijednosti t_L, t_{C1}, t_{C2} i Q_{max}. Pomoću srednje devijacije lako se vidi raspršenost podataka u odnosu na srednju vrijednost, odnosno o konzistentnosti rezultata.

Iz Slike 13. je vidljivo kako povećanjem protoka ne dolazi do značajnih promjena u vremenu zakašnjenja sliva. Iako je uobičajeno da se povećanjem protoka vrijeme zakašnjenja smanjuje. U vidu hidrograma to se očituje strmijim porastom hidrograma s pojavom oborine. Ova povezanost pod utjecajem je različitih čimbenika, uključujući zasićenje tla, korištenje zemljišta, karakteristike sliva i hidrološke odgovore. Razumijevanje ovoga odnosa bitno je za učinkovito upravljanje poplavama.

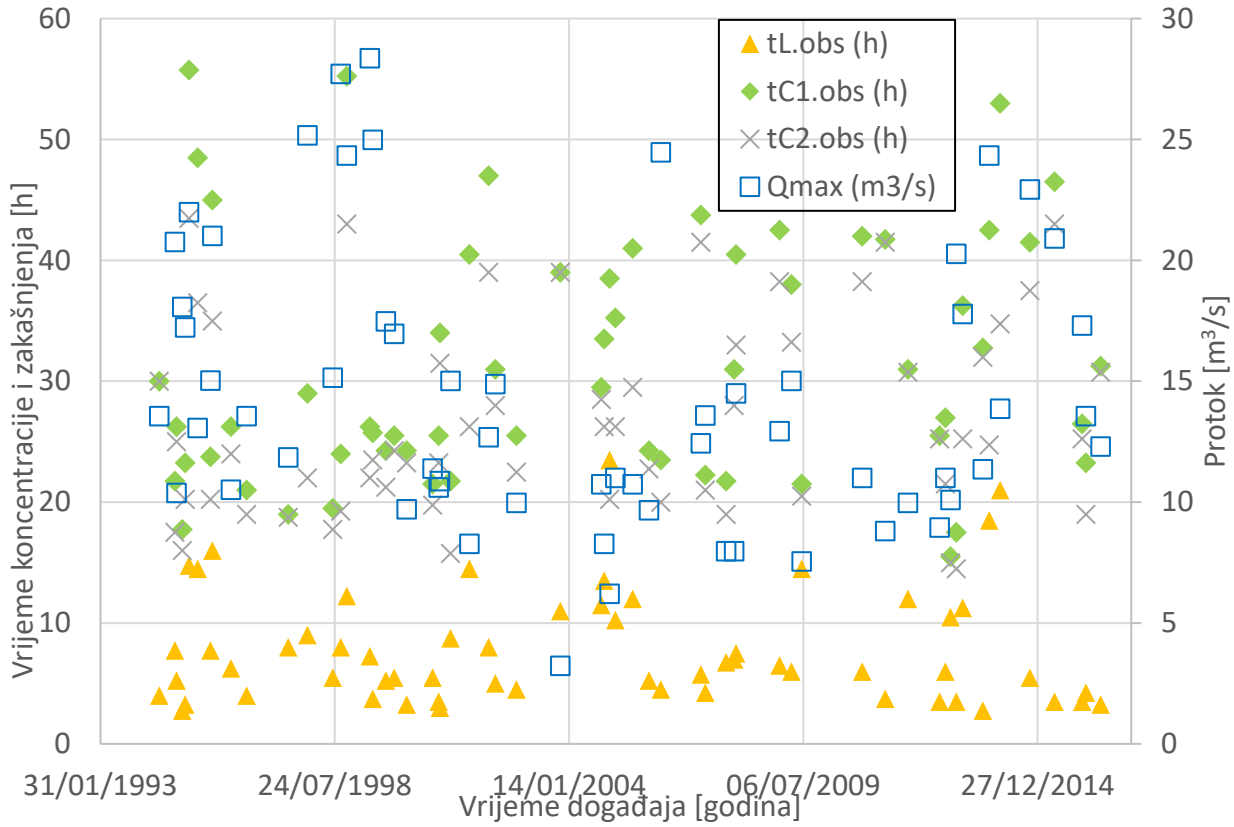
Na Slici 16. prikazano je šest ranije izdvojenih slučaja te dodatno slučaj minimalnog promatranog protoka. Vidljivo je kako je pri većim protocima grana rasta hidrograma nešto strmija no pri manjim protocima. Razlog tome u ovisnosti je prije svega intenziteta oborine. Pri oborinama većeg intenziteta i odgovor sliva je brži, odnosno grana rasta hidrograma je strmija. Dodatno, u praksi je uočeno kako se vrijeme zakašnjenja smanjuje pri povećanju protoka, iako to nije jasno vidljivo kada se sagledavaju svi promatrani slučajevi, ipak se može reći kako je pri najmanjem protoku vrijeme zakašnjenja nešto veće u odnosu na protok, nego li je slučaj pri većim protocima na promatranome slivu.

Na Slici 14., prikazani su rezultati vremena koncentracije kao dvije različite vrijednosti t_{C1} i t_{C2}, objašnjenje njihovih vrijednosti dano je ranije u poglavlju 2.. Uz njih prikazan je i linearni trend rezultata u ovisnosti o povećanju protoka. Vidljivo je kako vrijednost vremena koncentracije od završetka oborine do vrhunca hidrograma s porastom vrijednosti protoka blago raste, dok je za slučaj vremena koncentracije ta vrijednost s porastom protoka u blagom opadanju. Međutim, vrijednosti nagiba pravca trenda je premali da bi se moglo sa sigurnošću reći kako bi se takav trend nastavio s pojavom još većih protoka.

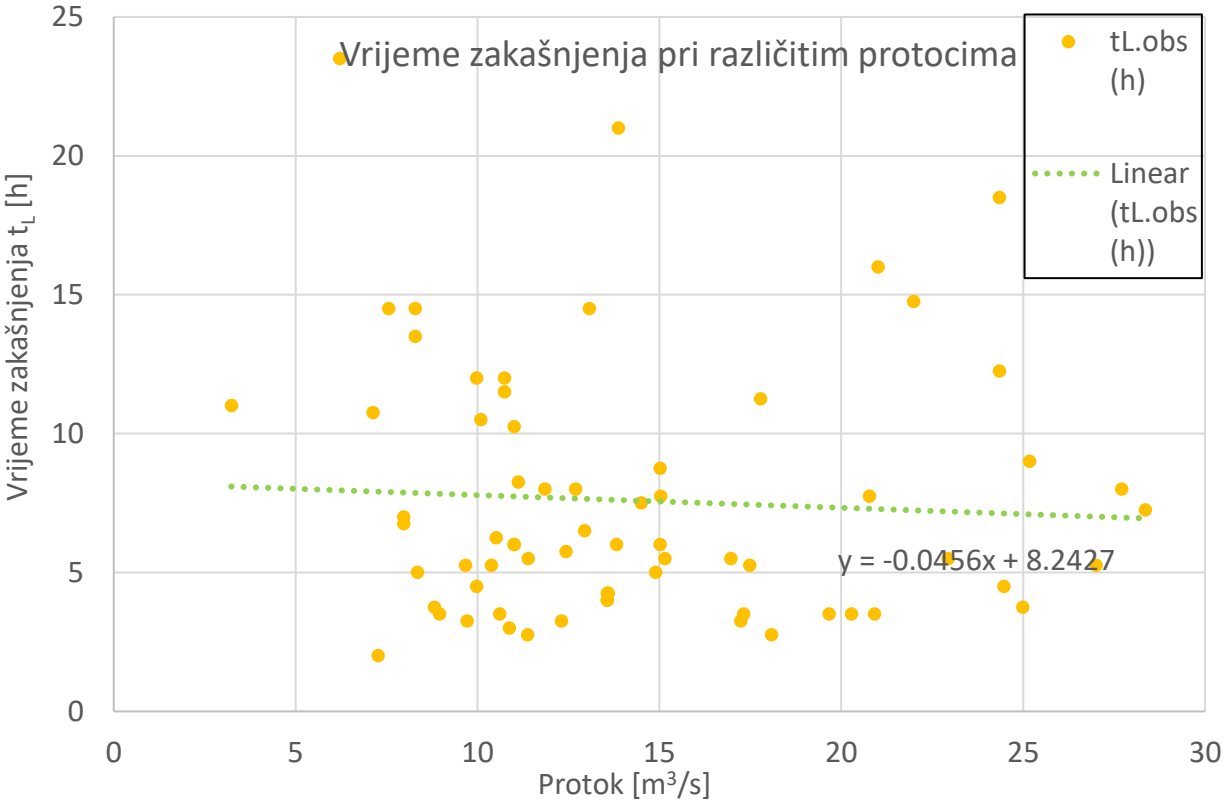
Ukupno vrijeme koncentracije od prestanka oborine do trenutka infleksije na grani pada hidrograma otjecanja u ovisnosti o veličini protoka prikazano je na Slici 15.. Slično kao i na Slici 13. vidljivo je kako s povećanjem protoka ne dolazi do značajnih promjena u vrijednostima vremena koncentracije. Što govori o tome kako porastom oborine i količine vode vrijeme koncentracije ostaje slično kao i pri manjim protocima.

Tablica 7.: Prikaz rezultata empirijiskim putem dobivenih vrijednosti vremena zakašnjenja i koncentracije

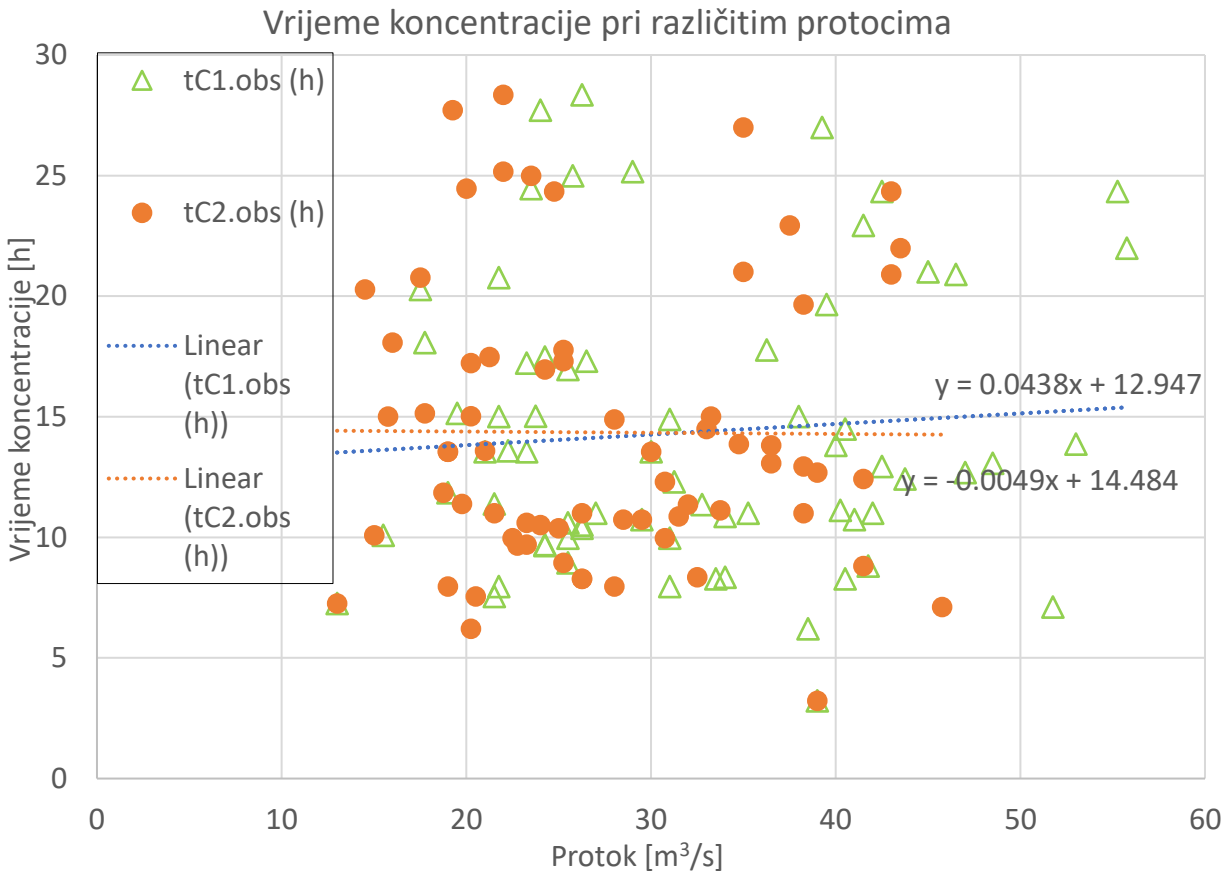
Događaj	$t_{L.obs}$ (h)	$t_{C1.obs}$ (h)	$t_{C2.obs}$ (h)	Q_{max}	Događaj	$t_{L.obs}$ (h)	$t_{C1.obs}$ (h)	$t_{C2.obs}$ (h)	Q_{max} (m^3/s)
17/06/1994	4	30	30	13.56	12/07/2005	12	41	29.5	10.74
29/10/1994	7.75	21.75	17.5	20.77	27/11/2005	5.25	24.25	22.75	9.67
11/11/1994	5.25	26.25	25	10.38	10/03/2006	4.5	23.5	20	24.47
31/12/1994	2.75	17.75	16	18.08	13/02/2007	5.75	43.75	41.5	12.43
24/01/1995	3.25	23.25	20.25	17.23	24/03/2007	4.25	22.25	21	13.59
26/02/1995	14.75	55.75	43.5	21.99	18/09/2007	6.75	21.75	19	7.97
12/05/1995	14.5	48.5	36.5	13.07	25/11/2007	7	31	28	7.97
28/08/1995	7.75	23.75	20.25	15.03	12/12/2007	7.5	40.5	33	14.5
14/09/1995	16	45	35	21.01	18/12/2008	6.5	42.5	38.25	12.94
19/02/1996	6.25	26.25	24	10.51	29/03/2009	6	38	33.25	15.02
03/07/1996	4	21	19	13.56	24/06/2009	14.5	21.5	20.5	7.55
23/06/1997	8	19	18.75	11.85	22/11/2010	6	42	38.25	11
03/12/1997	9	29	22	25.17	07/06/2011	3.75	41.75	41.5	8.81
07/07/1998	5.5	19.5	17.75	15.15	17/12/2011	12	31	30.75	9.97
14/09/1998	8	24	19.25	27.71	13/09/2012	3.5	25.5	25.25	8.95
04/11/1998	12.25	55.25	43	24.34	01/11/2012	6	27	21.5	11
20/05/1999	7.25	26.25	22	28.36	15/12/2012	10.5	15.5	15	10.09
15/06/1999	3.75	25.75	23.5	24.99	02/02/2013	3.5	17.5	14.5	20.28
04/10/1999	5.25	24.25	21.25	17.48	30/03/2013	11.25	36.25	25.25	17.78
13/12/1999	5.5	25.5	24.25	16.96	17/09/2013	2.75	32.75	32	11.37
29/03/2000	3.25	24.25	23.25	9.71	10/11/2013	18.5	42.5	24.75	24.34
07/11/2000	5.5	21.5	19.75	11.39	11/02/2014	21	53	34.75	13.87
28/12/2000	3.5	25.5	23.25	10.61	23/10/2014	5.5	41.5	37.5	22.94
08/01/2001	3	34	31.5	10.87	22/05/2015	3.5	46.5	43	20.91
08/04/2001	8.75	21.75	15.75	15.02	11/01/2016	3.5	26.5	25.25	17.31
16/09/2001	14.5	40.5	26.25	8.28	15/02/2016	4.25	23.25	19	13.56
28/02/2002	8	47	39	12.69	20/06/2016	3.25	31.25	30.75	12.31
27/04/2002	5	31	28	14.89	26/11/2017	6	40	36.5	13.82
24/10/2002	4.5	25.5	22.5	9.97	01/01/2018	10.75	51.75	45.75	7.12
02/11/2003	11	39	39	3.23	16/11/2019	3.5	39.5	38.25	19.66
17/10/2004	11.5	29.5	28.5	10.74	22/12/2019	5.25	39.25	35	27
10/11/2004	13.5	33.5	26.25	8.28	03/07/2020	2	13	13	7.26
27/12/2004	23.5	38.5	20.25	6.21	28/09/2020	5	34	32.5	8.35
13/02/2005	10.25	35.25	26.25	11	16/11/2020	8.25	40.25	33.75	11.12



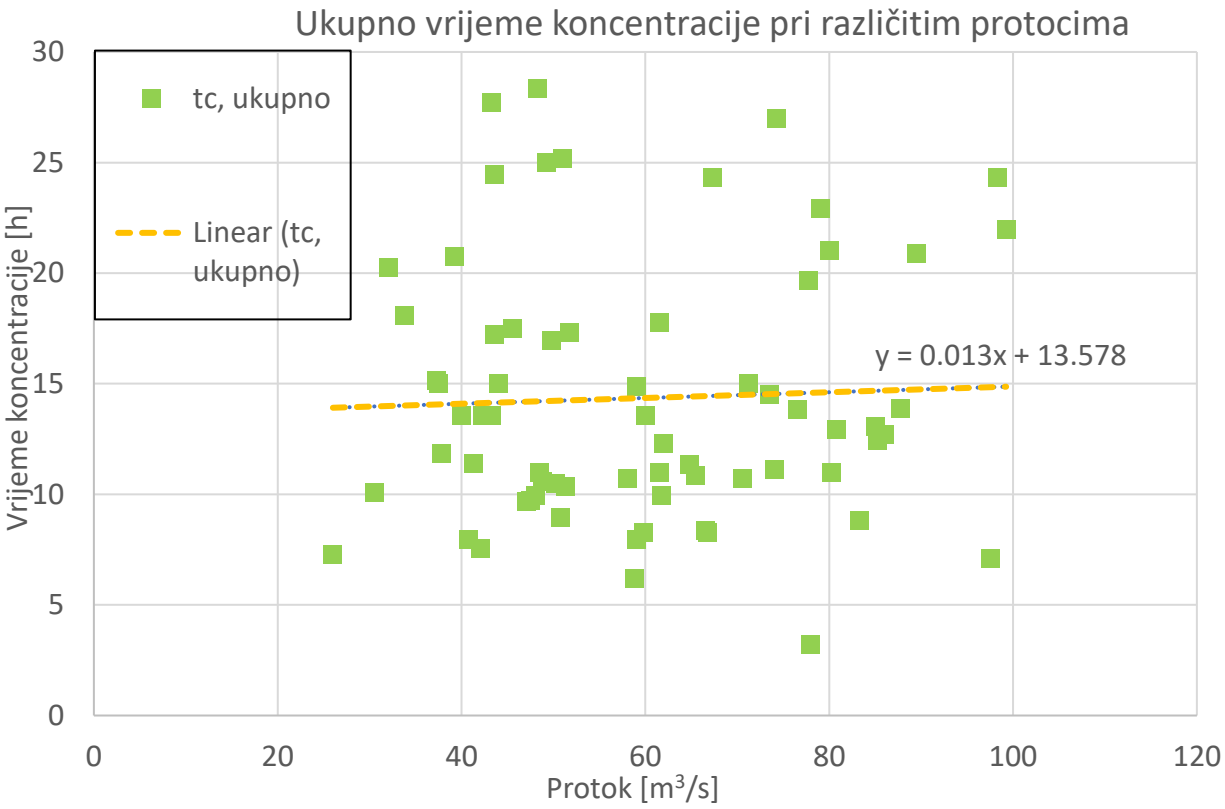
Slika 12.: Prikaz vremena koncentracije, zakašnjenja i protoka u ovisnosti o trenenutku događaja



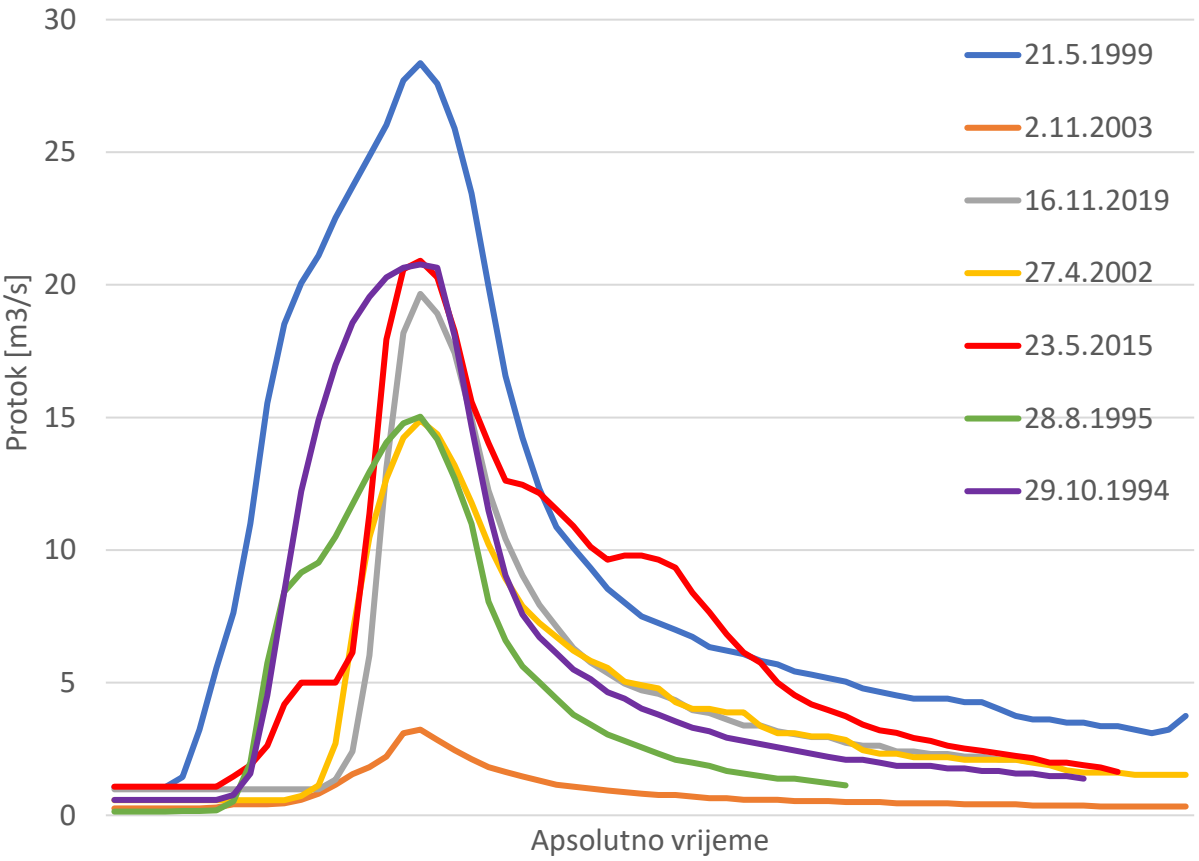
Slika 13.: Empirijski rezultati vremena zakašnjenja pri različitim protocima



Slika 14.: Empirijski rezultati vremena koncentracije pri različitim protocima



Slika 15.: Empirijski rezultati ukupnog vremena koncentracije pri različitim protocima



Slika 16.: Prikaz karakterističnih događaja u apsolutnom vremenu

Tablica 8.: Prikaz izdvojenih vrijednosti dobivenih empirijskom metodom

	$t_{L.obs}$ (h)	$t_{C1.obs}$ (h)	$t_{C2.obs}$ (h)	Q_{max} (m^3/s)
Minimum	2	13	13	3.23
Maksimum	23.5	55.75	45.75	28.36
Srednja vrijednost	7.59	32.00	27.48	14.35
Srednja devijacija	3.54	8.79	7.16	4.73

5.2. Analiza teorijskih rješenja

Vrijednosti vremena koncentracije i zakašnjenja prema teorijskim metodama napravljeni su prema ranije navedenim jednadžbama.

- Kirpich prema jednadžbi [2]
- FAA metoda prema jednadžbi [3]
- SCS metoda prema jednadžbi [4]
- Kinematski val prema jednadžbi [6]

Uz poznate jednadžbe i poznate vrijednosti konstanta i poznatih karakteristika slivnog područja i rijeke Krapinice navedenih u Tablici 6. uspješno je proveden proračun teorijskih vrijednosti vremena zakašnjenja i koncentracije. Treba napomenuti kako se u slučaju teorijskih vrijednosti vremena zakašnjenja radi o ukupnoj vrijednosti od završetka oborine do trenutka infleksije na grani pada hidrograma otjecanja. Prikaz dobivenih rezultata u minutama i satima dan je u Tablici 9.. Jasno je vidljivo kako su vrijednosti dobivene teorijskim formulama značajno manje no što su vremena dobivena empirijskim putem iz stvarnih kišnih događaja na promatranome djelu sliva. Također, obzirom da je formulama definirano samo vrijeme koncentracije t_C, vrijeme zakašnjenja dobiveno je posredno preko informacije o vremenu koncentracije, korištenjem slijedećeg odnosa:

$$t_L = 0{,}6 \times t_C \qquad [9]$$

I dok je ovaj odnos primjeren za upotrebu na manjim slivovima, što u ovome slučaju jest slučaj, isti omjer nije pogodno koristiti za velike slivove [6]. Ovaj odnos najbolje korelira sa slivovima veličine ≤ 50 km^2. Za potrebe ovog rada iako se radi o slivu veće površine uzet je ovaj omjer za izračun vremena zakašnjenja preko vremena koncentracije. Obzirom da je vrijednost vremena zakašnjenja dobivena posredno preko vremena koncentracije tako će i odnosi ekstremnih vrijednosti u vidu teorijskih rješenja biti ista za oba vremena. Maksimalna vrijednost vremena zakašnjenja i koncentracije dobivena su SCS metodom, a najmanja su dobivena metodom kinematskog vala. Osim prikaza maksimalne i minimalne vrijednosti, srednje vrijednosti i srednja devijacija teorijskih rješenja također su u Tablici 10.. Iz obje tablice vidljivo je kako su razlike u rješenjima između teorijski dobivenih vrijednosti i onih dobivenih empirijskim putem značajni, a o tome će više riječi biti u slijedećem poglavlju.

Tablica 9.: Prikaz vrijednosti vremena koncentracije i zakašnjenja dobivenih teorijskim metodama

	t_C (min)	t_L (min)	t_C (h)	t_L (h)
Kirpich	55.47	33.28	0.92	0.55
FAA	90.5	54.3	1.51	0.9
SCS	199.54	119.72	3.33	2
Kinematski val	25.33	15.2	0.42	0.25

Tablica 10.: Prikaz izdvojenih vrijednosti dobivenih teorijskom metodom

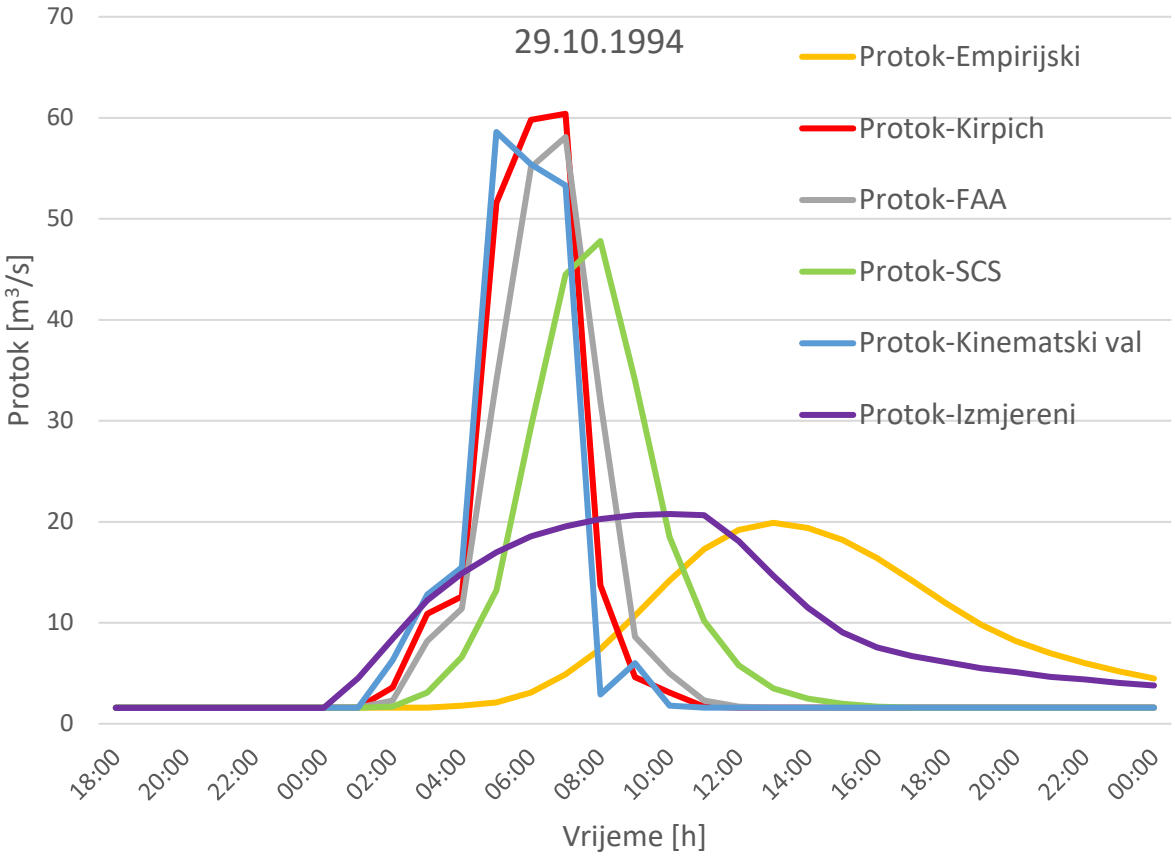
	t_C (min)	t_L (min)	t_C (h)	t_L (h)
Minimum	25.33	15.20	0.42	0.25
Maksimum	199.54	119.72	3.33	2.00
Srednja vrijednost	92.71	55.63	1.55	0.93
Srednja devijacija	53.41	32.05	0.89	0.53

6 USPOREDBA

Usporedba teorijski dobivenih vrijednosti i onih dobivenih empirijskim putem vršena je korištenjem računalnog programa *HEC-HMS*. Za potrebe izvršenja usporedbe teorijskih i empirijskih vrijednosti korišteno je ranije navedenih 6 karakterističnih događaja. Pri izradi samih modela, za početne protoke uzete su za svaki događaj karakteristične vrijednosti protoka prije početka svakog oborinskog događaja kao početna vrijednost. Dalje su za potrebe kvalitetne izrade modela korištene informacije o oborini u 15 minutnim inkrementima koje su preuzete, kako je ranije rečeno, s meteorološke postaje Krapina. Uz to, modeli su izrađeni uz korištenje vrijednosti, ranije dobivenih vremena zakašnjenja u cilju dobivanja prikaza hidrograma otjecanja za svaki događaj i za svaku metodu. Vrijednosti vremena zakašnjenja za svaku metodu i događaj dani su u Tablici 11.. Sam sliv i njegove fizikalne karakteristike preuzete su iz računalnog programa *QGIS*. Za vrijednost broja SCS korišten je ranije navedeni podatak dostupan u Tablici 6.. Dobiveni rezultati protoka obrađeni su u satnom inkrementu jer su i izmjerene informacije dostupne u istom vremenskom inkrementu s ciljem dobivanja hidrograma što veće sličnosti. U Tablici 11. dane su vrijednosti korištenih vremena zakašnjenja za svih 6 promatranih događaja. Iz Tablice 11. jasno je vidljivo kako su razlike u vrijednostima između empirijskih i teorijski dobivenih vrijednosti vremena zakašnjenja značajni, odnosno kako su empirijskim putem dobivene vrijednosti višestruko veće od teorijskih. Za očekivati je stoga kako će se korištenjem vremena zakašnjenja teorijskih metoda formirati vodni događaji većeg maksimalnog protoka jer će se u kraćem vremenu veća količina oborine transformirati u otjecanje u vodotoku. Rješenja simulacija modela za svaki događaj prikazani su u nastavku, a uz to za svaki događaj priložena je i tablica s maksimalnim protocima za svaku promatranu metodu i vrijeme u kojem se javlja maksimalni protok.

Tablica 11.: Prikaz vremena zakašnjenja korištenih u svrhu izrade simulacija karakterističnih događaja

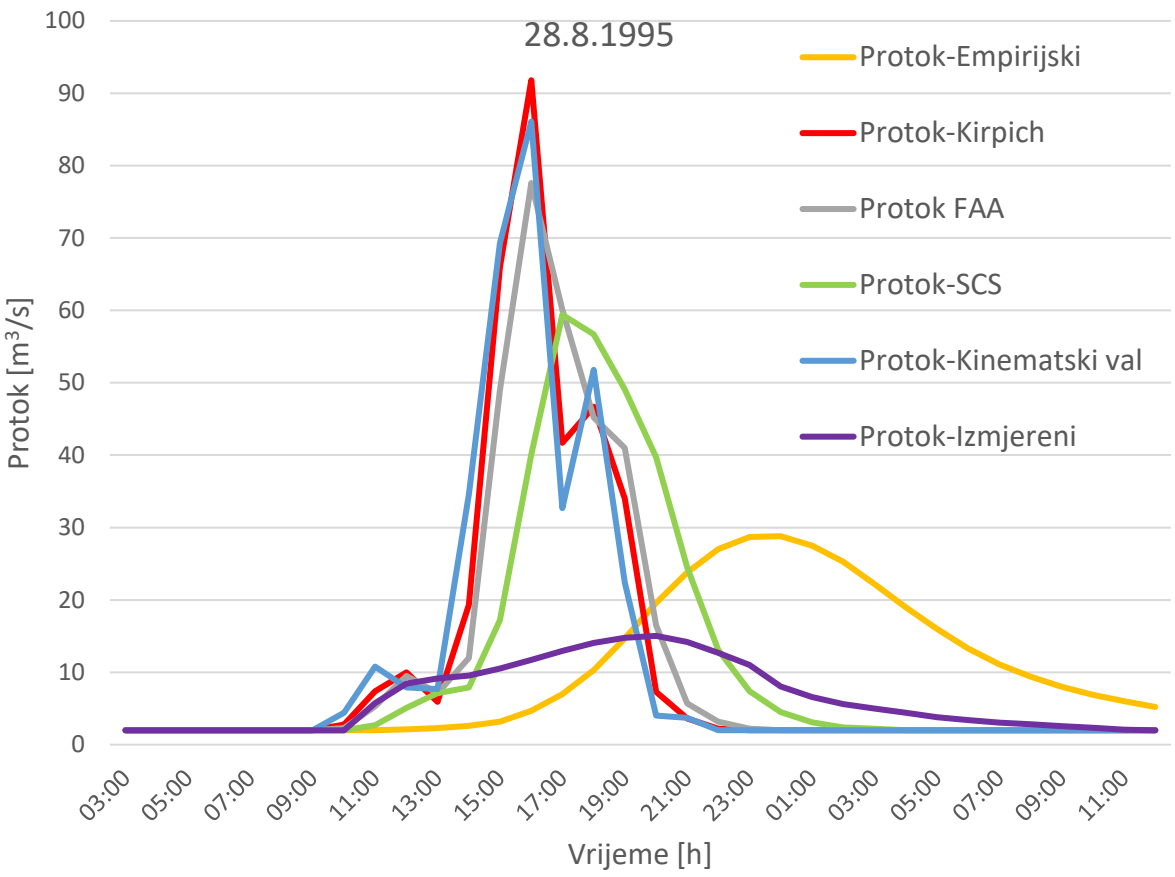
Događaj	Empijriski t_L (min)	Kirpich t_L (min)	FAA t_L (min)	SCS t_L (min)	Kinematski val t_L (min)
28/08/1995	465	33	54	120	15
21/05/1999	435	33	54	120	15
27/04/2002	300	33	54	120	15
23/05/2015	210	33	54	120	15
16/11/2019	210	33	54	120	15



Slika 17.: Rezultati modela za događaj 29.10.1994

Tablica 12.: Vrijednosti maksimalnih protoka ovisno o metodi za oborinski događaj 29.10.1994

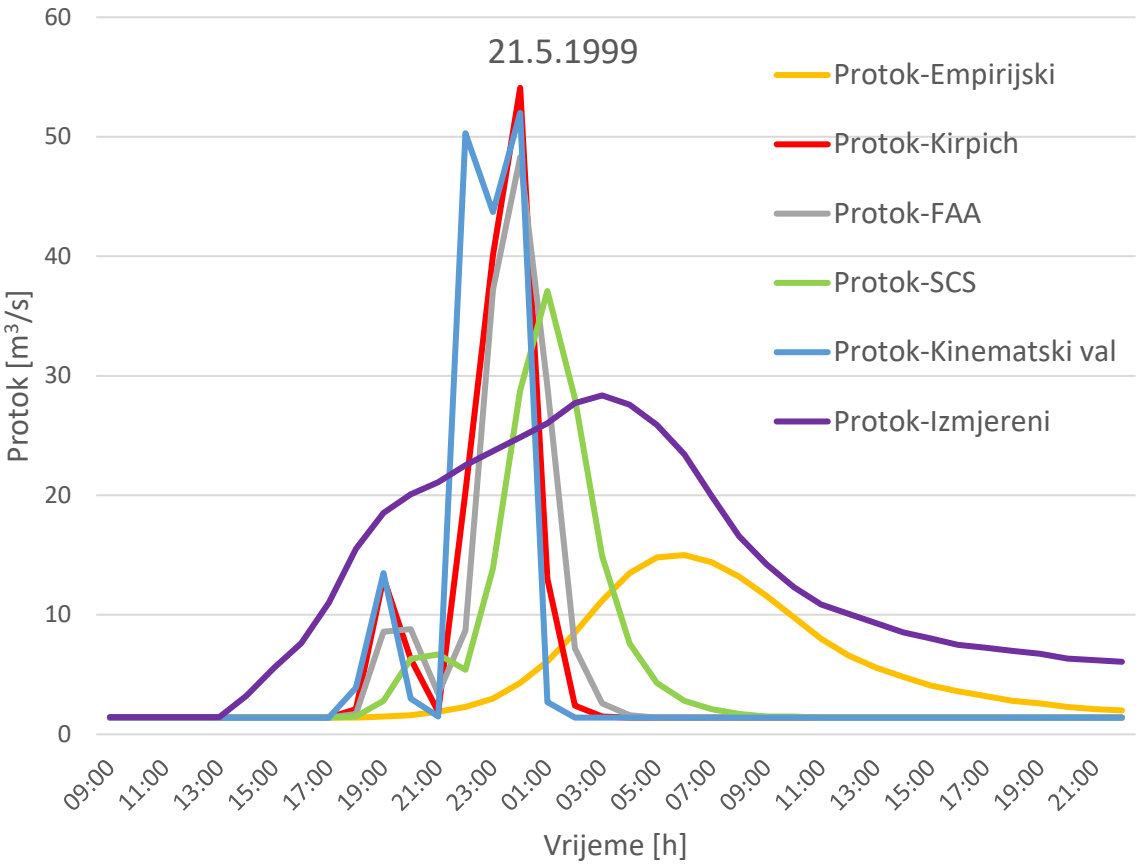
	Datum	Vrijeme	Maksimalni protok (m^3/s)
Empirijski	29/10/1994	13:00	19.9
Kirpich	29/10/1994	07:00	60.4
FAA	29/10/1994	07:00	58.1
SCS	29/10/1994	08:00	47.8
Kinematski val	29/10/1994	05:00	58.6
Izmjereno	29/10/1994	10:00	20.77



Slika 18.: Rezultati modela za događaj 28.8.1995

Tablica 13.: Vrijednost maksimalnih protoka ovisno o metodi za oborinski događaj 28.8.1995

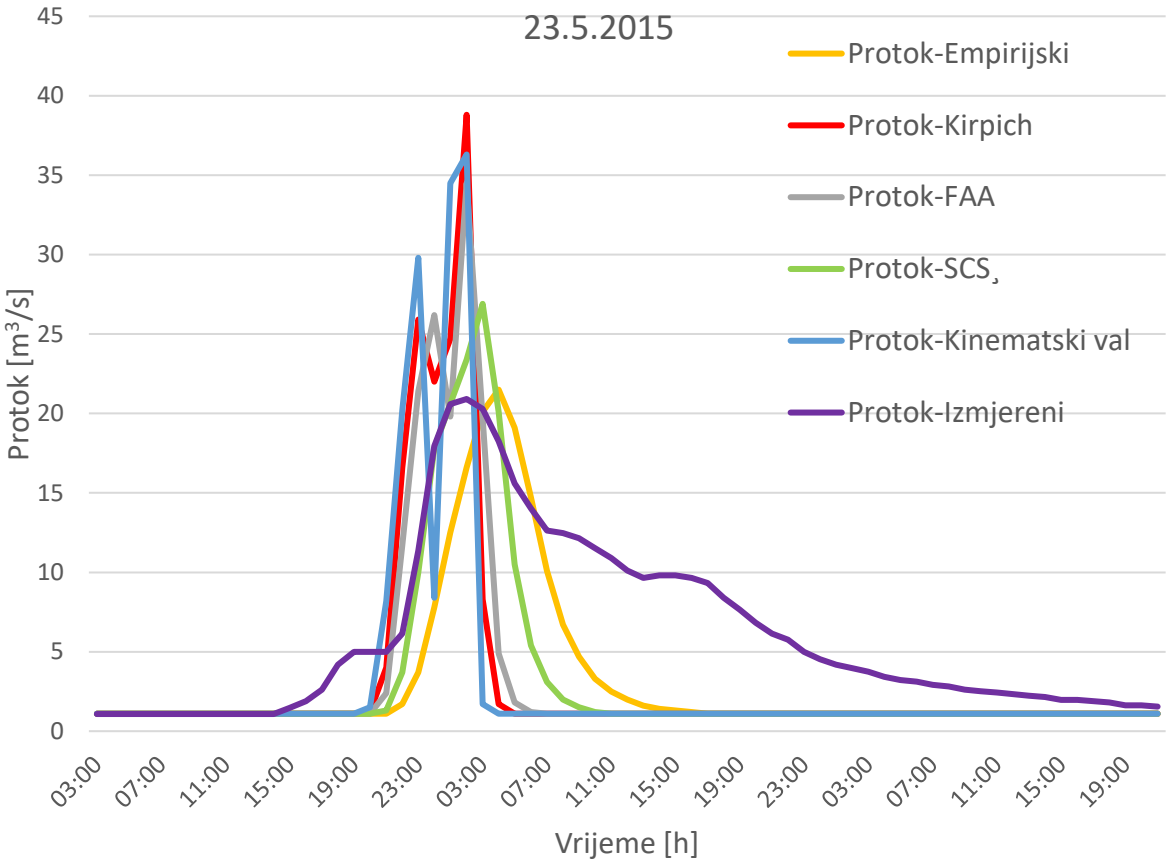
	Datum	Vrijeme	Maksimalni protok (m^3/s)
Empirijski	29/08/1995	00:00	28.8
Kirpich	28/08/1995	16:00	91.8
FAA	28/08/1995	16:00	77.6
SCS	28/08/1995	17:00	59.4
Kinematski val	28/08/1995	16:00	86.1
Izmjereno	28/08/1995	20:00	15.03



Slika 19 .: Rezultati modela za događaj 21.5.1999

Tablica 14.: Vrijednost maksimalnih protoka ovisno o metodi za oborinski događaj 21.5.1999

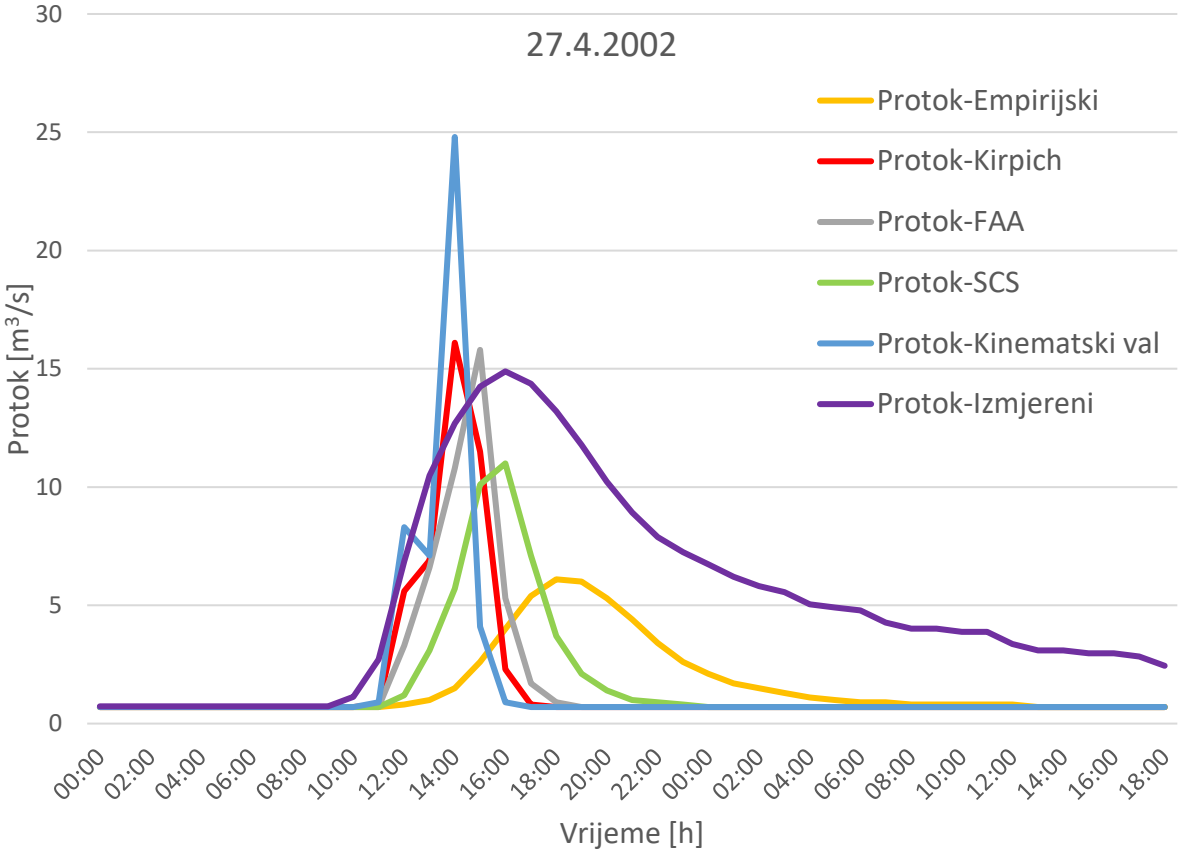
	Datum	Vrijeme	Maksimalni protok (m^3/s)
Empirijski	21/05/1999	06:00	15
Kirpich	21/05/1999	00:00	54.1
FAA	21/05/1999	00:00	48.3
SCS	21/05/1999	01:00	37.1
Kinematski val	21/05/1999	00:00	52
Izmjereno	21/05/1999	03:00	28.36



Slika 20.: Rezultati modela za događaj 23.5.2015

Tablica 15.: Vrijednost maksimalnih protoka ovisno o metodi za oborinski događaj 23.5.2015

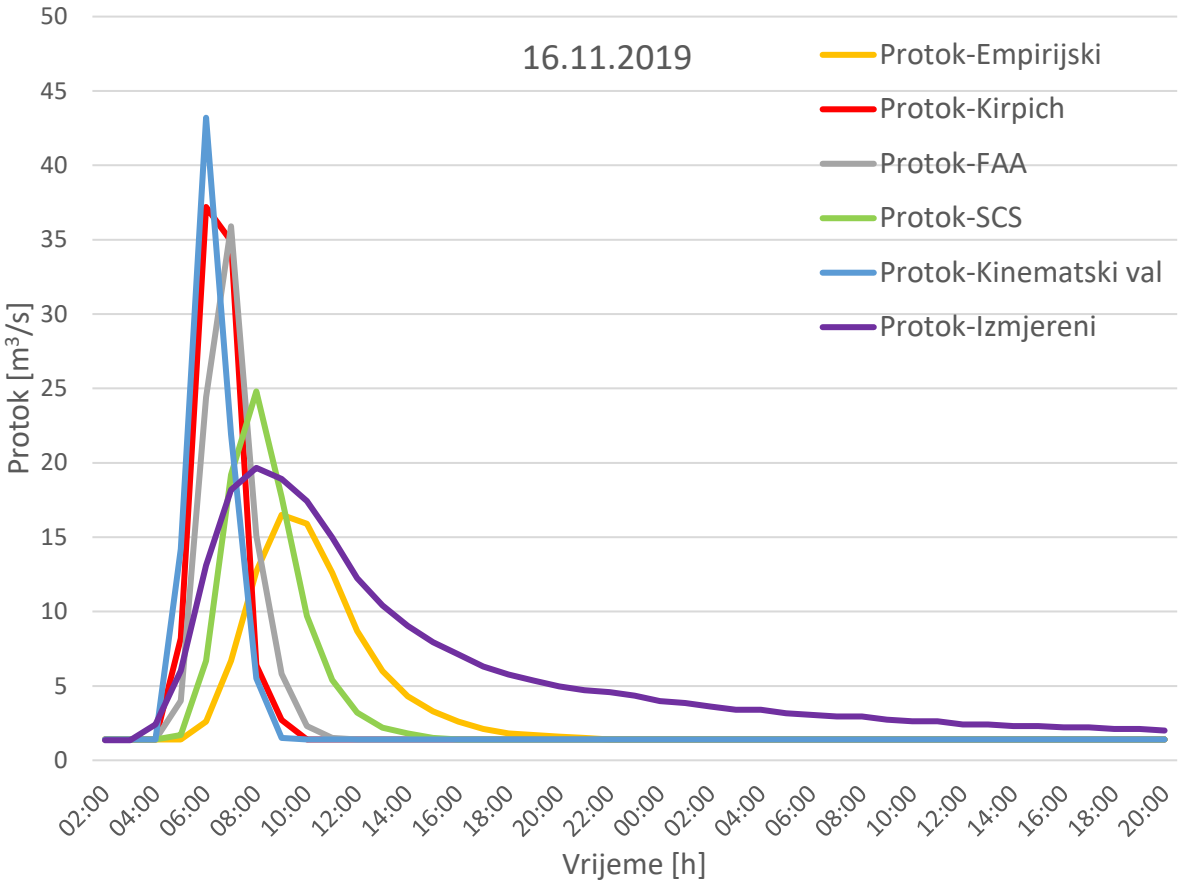
	Datum	Vrijeme	Maksimalni protok (m^3/s)
Empirijski	23/05/2015	04:00	21.5
Kirpich	23/05/2015	02:00	38.8
FAA	23/05/2015	02:00	34.5
SCS	23/05/2015	03:00	26.9
Kinematski val	23/05/2015	02:00	36.3
Izmjereno	23/05/2015	02:00	20.91



Slika 21.: Rezultati modela za događaj 27.4.2002

Tablica 16.: Vrijednost maksimalnih protoka ovisno o metodi za oborinski događaj 27.4.2002

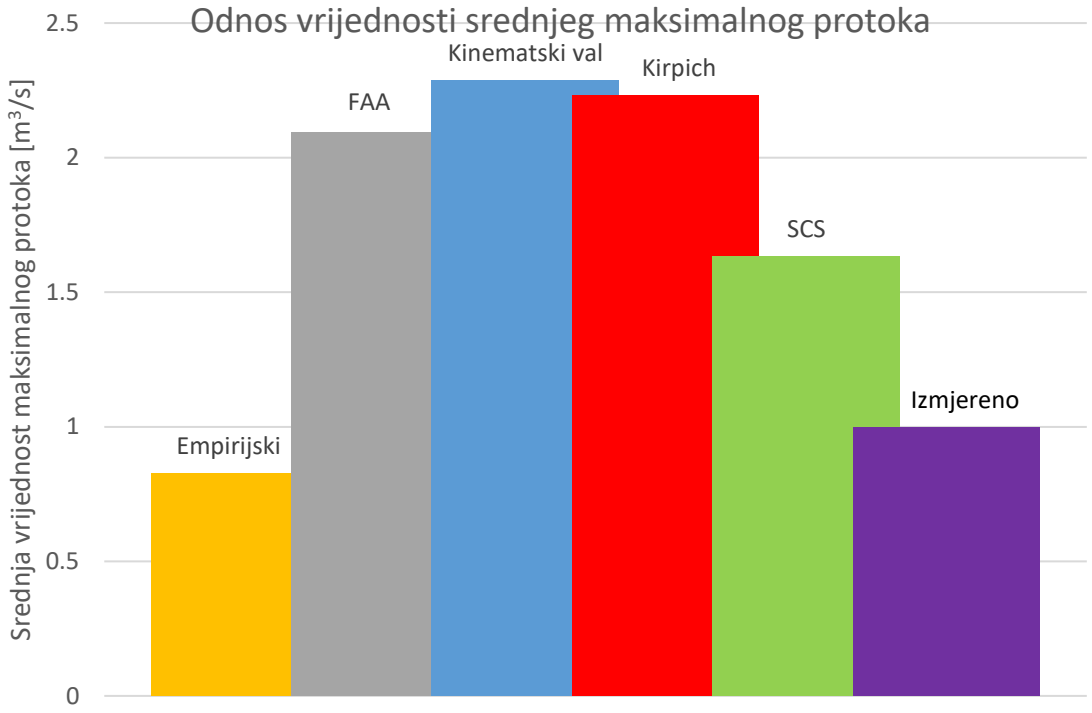
	Datum	Vrijeme	Maksimalni protok (m^3/s)
Empirijski	27/04/2002	18:00	6.1
Kirpich	27/04/2002	14:00	16.1
FAA	27/04/2002	15:00	15.8
SCS	27/04/2002	16:00	11
Kinematski val	27/04/2002	14:00	24.8
Izmjereno	27/04/2002	16:00	14.89



Slika 22.: Rezultati modela za događaj 16.11.2019

Tablica 17.: Vrijednost maksimalnih protoka ovisno o metodi za oborinski događaj 16.11.2019

	Datum	Vrijeme	Maksimalni protok (m^3/s)
Empirijski	16/11/2019	03:00	16.5
Kirpich	16/11/2019	06:00	37.2
FAA	16/11/2019	07:00	35.9
SCS	16/11/2019	08:00	24.8
Kinematski val	16/11/2019	06:00	43.2
Izmjereno	16/11/2019	08:00	19.66

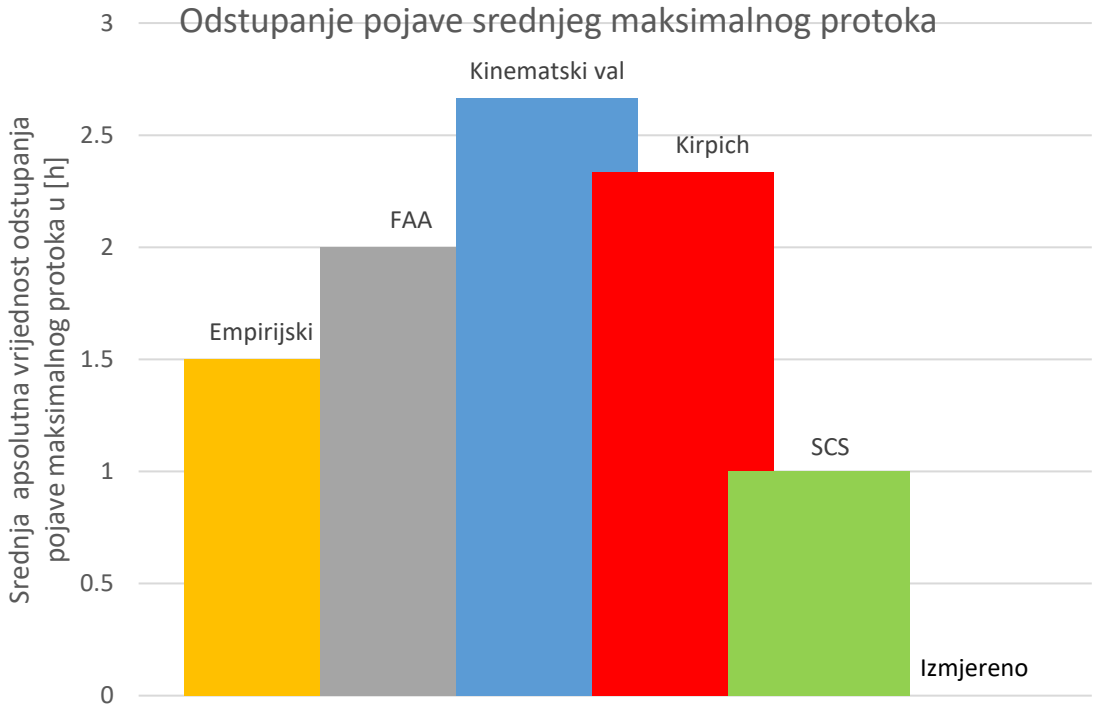


Slika 23.: Odnos vrijednosti srednjeg maksimalnog protoka u odnosu na izmjerenu vrijednost ovisno o korištenoj metodi

Vrijednosti osrednjenih maksimalnih protoka u odnosu na izmjerene vrijednosti iznose:

- Empirijska vrijednost je 82% izmjerenih vrijednosti
- FAA metoda ima vrijednosti 209% izmjerenih
- Metoda kinematskog vala ima vrijednosti 228% izmjerenih
- Kirpicheva metoda ima vrijednosti 223% izmjerenih
- SCS metoda ima vrijednosti 163% izmjerenih

Iz gore vidljivih slika jasno je kako postoji veliki nesrazmjer između empirijskih vrijednosti maksimalnih protoka i njihove pojave u odnosu na one dobivene teorijskim putem u ovisnosti o izmjerenim vrijednostima. Odstupanja su značajna i velika. Osim maksimalnih vrijednosti protoka, razlika se očituje i u vremenu pojave '*peak*-a' hidrograma otjecanja. To je logično jer je vrijeme pojave vrhunca hidrograma vezano za vrijeme zakašnjenja sliva, a budući se u teorijskim rješenjima radi o značajno manjim vrijednostima vremena zakašnjenja, tako se i vrhunac hidrograma javlja ranije sukladno razlici u vrijednosti vremena zakašnjenja korištene metode. Najbliže izmjerenim vrijednostima jest, izuzmu li se empirijske vrijednosti, teorijska metoda SCS, međutim i ona ima značajna odstupanja.



Slika 24.: Odnos odstupanja pojave maksimalnog protoka u odnosu na pojavu istoga pri izmjerenim vrijednostima

Sa Slike 24. vidljivo je kako se odstupanja pojave maksimalnog protoka u odnosu na izmjerene vrijednosti odnose vrlo slično kao i vrijednosti maksimalnih protoka. Vidljivo je također kako metoda SCS daje najbliže rezultate onima izmjerenima, a dok se najveća odstupanja javljaju kod metoda kinematskog vala i Kirpicha.

- Empirijska vremena pojave vrhunca hidrograma otjecanja u apsolutnim vrijednostima prosječno odstupa 1,5 sati od izmjerenih vrijednosti
- Vremena pojave vrhunca hidrograma otjecanja u apsolutnim vrijednostima korištenjem FAA metode prosječno odstupaju 2 sata od izmjerenih vrijednosti
- Vremena pojave vrhunca hidrograma otjecanja u apsolutnim vrijednostima korištenjem metode kinematskog vala prosječno odstupaju 2,67 sati od izmjerenih vrijednosti
- Vremena pojave vrhunca hidrograma otjecanja u apsolutnim vrijednostima korištenjem Kirpicheve metode prosječno odstupaju 2,33 sati od izmjerenih vrijednosti
- Vremena pojave vrhunca hidrograma otjecanja u apsolutnim vrijednostima korištenjem SCS metode prosječno odstupaju 1 sat od izmjerenih vrijednosti

Može se zaključiti kako SCS metoda daje rezultate najbliže izmjerenim vrijednostima izvjesno je, da ova metoda daje rješenja najbliskija onim izmjerenima iz razloga što ni u kakvom obliku ne koristi podatke vezane za brzinu toka. Brzina propagacije vodnog vala ne kreće se jednakom brzinom kao brzina toka. Uz to, SCS metoda daje rješenja najsličnija izmjerenim vrijednostima jer se unutar formule koriste isključivo informacije o fizikalnim karakteristikama vodotoka i sliva. Najveća razlika se pak uočava korištenjem metode kinematskog vala, a razlika se pojavljuje upravo iz razloga što se koriste informacije o brzini toka vode i trenja. Dodatno, obzirom na pojednostavljenje cjelokupnog sliva i korištenja iste vrijednosti Manningova broja za cjelokupnu površinu sliva, vjerojatno dolazi do dodatnih nejednakosti u samom rješenju.

Na primjeru rijeke Krapinice do promatrane točke na hp. Krapina i cjelokupne slivne površine što zahvaća prostor do te točke stoga, može se reći kako je za potrebe dobivanja brzih proračuna i informacija najpoželjnije koristiti SCS metodu, jer upravo ta metoda ima najmanja, iako i dalje značajna odstupanja od izmjerenih vrijednosti.

7 ZAKLJUČAK

Naposlijetku, može se zaključiti kako postoje značajne razlike između vremena koncentracije i zakašnjenja dobivenih mjerenjima i onih dobivenih korištenjem teorijskih metoda. Dok se vrijednosti vremena zakašnjenja i koncentracije pomoću teorijskih metoda može smatrati dobrim za brze izračune i grube podatke, valja uzeti u obzir njihovo značajno odstupanje od stvarnih rezultata dobivenih na realnim slučajevima i u stvarnim događajima. Teorijske metode proračuna stoga valja koristiti oprezno i sa sviješću o njihovim nedostacima. Valjalo bi koristiti realne i javno dostupne podatke kada je god to moguće ukoliko je cilj razviti precizne simulacije.

Razlike između teorijskih, empirijskih i izmjerenih rezultata uobičajeno su posebno izraženi u scenarijima s visokim intenzitetom oborina. Teorijske metode pojednostavljuju složene karakteristike sliva, što može biti prikladno za proračuna manjih protoka ili kod manjih oborinskih događaja, no kod većih ekstremnih oborina, razlike između teorijskih i izmjerenih vrijednosti se povećavaju. Može se reći kako je za potrebe proračuna kada je god to moguće, poželjnije koristiti povijesne podatke i veliku količinu dostupnih izmjerenih rezultata nego li pribjegavati brzim i jednostavnim teorijskim metodama jer je diskrepancija među rezultatima tako dobivenih vrijednosti i onih realno zabilježenih značajna. Od svih teorijskih metoda, pokazalo se kako se korištenjem SCS metode, koja u proračunu ne sadrži podatke o brzini toka, daje rezultate najbliže i najsličnije onima izmjerenima u stvarnosti.

Razlozi velikih nesrazmjera rješenja mogu se objasniti ovisnošću pojedinih teorijskih metoda s (u ovom slučaju sve metode osim SCS) brzinom toka. Međutim, pojava i propagacija vodnog vala ne korelira s brzinom toka,

Međutim, ne smije se zanemariti korisnost bilo kakve vrijednosti pomoću korištenja teorijskih metoda posebice u slučaju gdje se analiziraju područja gdje nema višegodišnje zabilježenih i pouzdanih podataka o svim relevantnim faktorima poput intenziteta i trajanja oborina, ili pak o vrijednostima protoka za promatrano područje. U tim slučajevima, teorijske metode daju najbolju aproksimaciju mogućih događaja. Uz to valja i kritički sagledavati rješenja dobivena korištenjem ovih metoda te analizirati dobivena rješenja.

Također, svaki sliv i podsliv ima svoje vlastite zakonitosti, te se empirijski dobivene vrijednosti vremena koncentracije i zakašnjenja sa jednog područja ne bi smjela primjenjivati za druga. U tim slučajevima bolje je koristiti teorijske metode dobivanja vrijednosti vremena koncentracije i zakašnjenja uz kritičko analiziranje dobivenih vrijednosti.

POPIS LITERATURE

[1] Dagnet, S. er al. (2022). Evaluation of lag time and time of concentration estimation methods in small tropical watersheds in Ethiopia

[2] Keith J. Beven (2020), A history of the concept of time of concentration

[3] Pramana, J.H., Hairuseno D. (2023). Time of concentration estimated of overland flow

[4] Chow, W.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988). Applied Hydrology

[5] Arcement, G.J.Jr., Schneider V.R. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plain

[6] Allnut, C.E., Gericke, O.J., Pietersen, J.P.J. (2020). Estimation of time parameter proportionality ratios in large catchemnts: Case study of the Modder-Riet River Catchment, South Africa

POPIS SLIKA

Slika 1.: Događaj 21.5.1999 5
Slika 2.: Događaj 16.11.2019 5
Slika 3.: Događaj 29.10.1994 6
Slika 4.:Događaj 27.4.2002 6
Slika 5.: Događaj 23.5.2015 7
Slika 6.: Događaj 28.8.1995 7
Slika 7.: Prikaz vremena zakašnjenja I koncentracije na primjeru 8
Slika 8.: Tipovi tla na slivu 14
Slika 9.: Tipovi pokrova na slivu 15
Slika 10.: PTP krivulja za mp. Krapina 17
Slika 11.: ITP krivulja za mp. Krapina 18
Slika 12.: Prikaz vremena koncentracije, zakašnjenja i protoka u ovisnosti o trenenutku događaja 22
Slika 13.: Empirijski rezultati vremena zakašnjenja pri različitim protocima 22
Slika 14.: Empirijiski rezultati vremena koncentracije pri različitim protocima 23
Slika 15.: Empirijiski rezultati ukupnog vremena koncentracije pri različitim protocima 23
Slika 16.: Prikaz karakterističnih događaja u apsolutnom vremenu 24
Slika 17.: Rezultati modela za događaj 29.10.1994 28
Slika 18.: Rezultati modela za događaj 28.8.1995 29
Slika 19 .: Rezultati modela za događaj 21.5.1999 30
Slika 20.: Rezultati modela za događaj 23.5.2015 31
Slika 21.: Rezultati modela za događaj 27.4.2002 32
Slika 22.: Rezultati modela za događaj 16.11.2019 33
Slika 23.: Odnos vrijednosti srednjeg maksimalnog protoka u odnosu na izmjerenu vrijednost ovisno o korištenoj metodi 34
Slika 24.: Odnos odstupanja pojave maksimalnog protoka u odnosu na pojavu istoga pri izmjerenim vrijednostima 35

POPIS TABLICA

Tablica 1.: Prikaz potencijalnih velikovodnih događaja kroz protoke 3
Tablica 2.: Tablične vrijednosti koeficijenta otjecanja u racionlanoj metodi 10
Tablica 3.: Tablične vrijednosti koeficijenta CN za SCS metodu 12
Tablica 4.: Određivanje vrijednosti koeficijenta otjecanja za promatrani sliv 15
Tablica 5.: Određivanje vrijednosti CN broja za promatrani sliv 16
Tablica 6.: Vrijednosti korištene u proračunu za promatrani sliv 17
Tablica 7.: Prikaz rezultata empirijiskim putem dobivenih vrijednosti vremena zakašnjenja i koncentracije 21
Tablica 8.: Prikaz izdvojenih vrijednosti dobivenih empirijskom metodom 24
Tablica 9.: Prikaz vrijednosti vremena koncentracije i zakašnjenja dobivenih teorijskim metodama 25
Tablica 10.: Prikaz izdvojenih vrijednosti dobivenih teorijskom metodom 26
Tablica 11.: Prikaz vremena zakašnjenja korištenih u svrhu izrade simulacija karakterističnih događaja 27
Tablica 12.: Vrijednosti maksimalnih protoka ovisno o metodi za oborinski događaj 29.10.1994 28
Tablica 13.: Vrijednost maksimalnih protoka ovisno o metodi za oborinski događaj 28.8.1995 29
Tablica 14.: Vrijednost maksimalnih protoka ovisno o metodi za oborinski događaj 21.5.1999 30
Tablica 15.: Vrijednost maksimalnih protoka ovisno o metodi za oborinski događaj 23.5.2015 31
Tablica 16.: Vrijednost maksimalnih protoka ovisno o metodi za oborinski događaj 27.4.2002 32
Tablica 17.: Vrijednost maksimalnih protoka ovisno o metodi za oborinski događaj 16.11.2019 33