

Analiza i usporedba izmjerenih i teorijskih vremena koncentracije na slivovima Bjelovarska i Vučica

Vručinić, Marin

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:272458>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Marin Vručinić

**Analiza i usporedba izmjerenih i teorijskih
vremena koncentracije na slivovima
Bjelovarska i Vučica**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, studeni 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Marin Vručinić

**Analiza i usporedba izmjerenih i teorijskih
vremena koncentracije na slivovima
Bjelovarska i Vučica**

DIPLOMSKI RAD

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

Zagreb, studeni 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Marin Vručinić

**Analysis and comparison of Measured and
Theoretical Concentration Times in the
Bjelovarska and Vučica River Basin**

MASTER THESIS

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

Zagreb, November 2024

SAŽETAK

U radu je prikazana usporedba izmjerenih i teorijskih vrijednosti vremena koncentracije i vremena zakašnjenja za slivove Bjelovarska i Vučica. Za izračun izmjerenih vrijednosti korišteni su dostupni podaci o oborinama i protocima za navedene slivove. Od teorijskih metoda izdvojene su metode Kirpich, FAA, SCS i metoda kinematskog vala. Nakon proračuna izmjerenih i teorijskih vrijednosti vršena je analiza i usporedba podataka. Korisno je provjeriti pouzdanost rezultata dobivenih teorijskim metodama jer su vrijeme koncentracije i vrijeme zakašnjenja bitni parametri za razumijevanje ponašanja slivnog područja uslijed oborinskih događaja. Kao što je i očekivano, vrijednosti teorijskih rezultata su znatno manje od izmjerenih. S obzirom da su ulazni podaci i pretpostavke za teoretske obrasce različiti, ne čudi da i među njima postoje odstupanja. Najbliža procjena ostvarena je SCS metodom, ali treba napomenuti da ni ona nije preporučljiva.

Ključne riječi: vrijeme koncentracije; vrijeme zakašnjenja

SUMMARY

This study deals with comparison of empirically and theoretically calculated values of time of concentration and lag time for two basins Bjelovarska and Vučica. Publically available rainfall and flow data are used to calculate empirical values. Kirpich, FAA, SCS and kinematic wave are theoretical methods chosen to calculate theoretical values. It is useful to determine how reliable theoretical methods are for determining time of concentration and lag time as they represent important parameters in hydrology. As expected, theoretical values are significantly lower than empirical values. Considering the differences in starting input and assumptions for theoretical methods, it doesn't surprise that there are also differences between theoretical values themselves. The closest estimate is made using the SCS method, although it also gives an innacurate estimate.

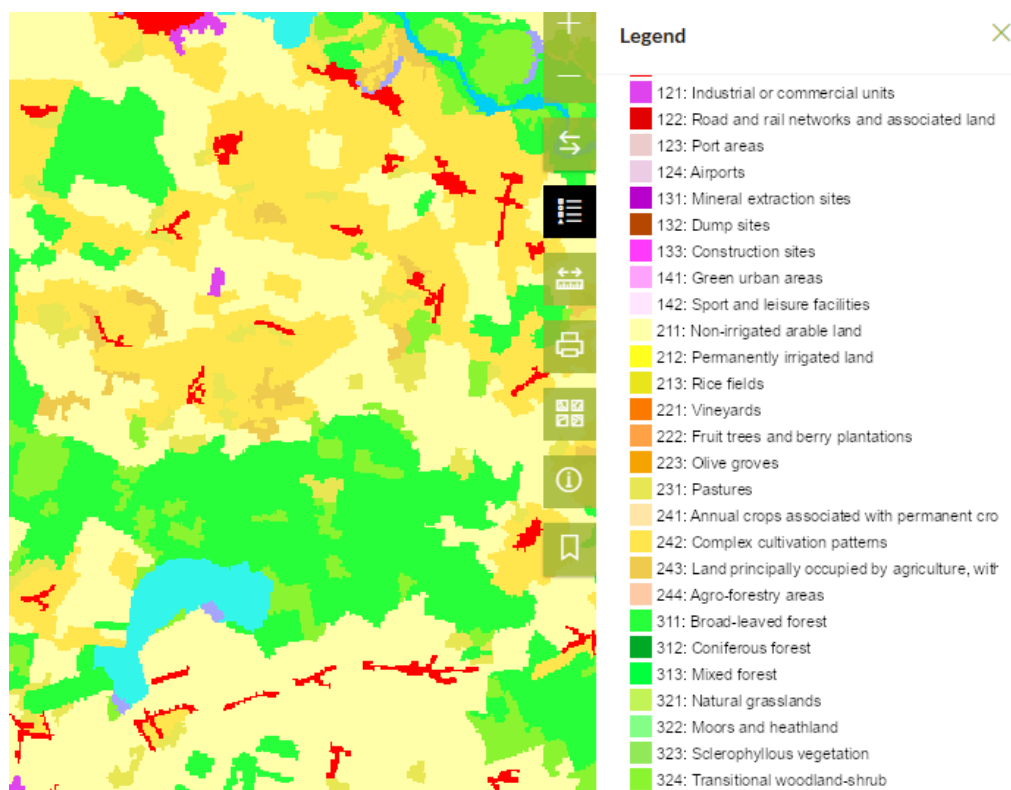
Key words: time of concentration; lag time

SADRŽAJ

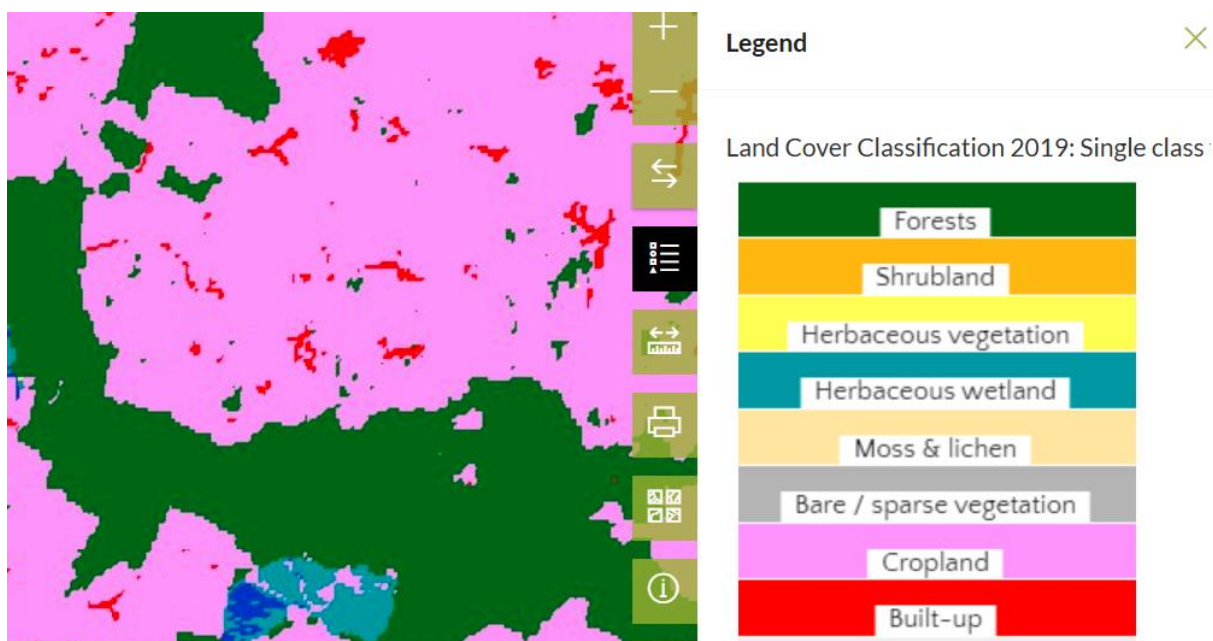
SAŽETAK	iv
SUMMARY	v
SADRŽAJ	vi
1 UVOD	1
2 METODOLOGIJA	4
2.1. Metodologija empirijskih vrijednosti.....	4
2.2. Metodologija teorijskih obrazaca.....	9
3 ANALIZA I USPOREDBA RJEŠENJA	11
3.1. Sliv Bjelovarska	11
3.2. Sliv Vučica.....	13
4 ZAKLJUČAK	15
POPIS LITERATURE	16
POPIS SLIKA	17
POPIS TABLICA	18
PRILOG	19

1 UVOD

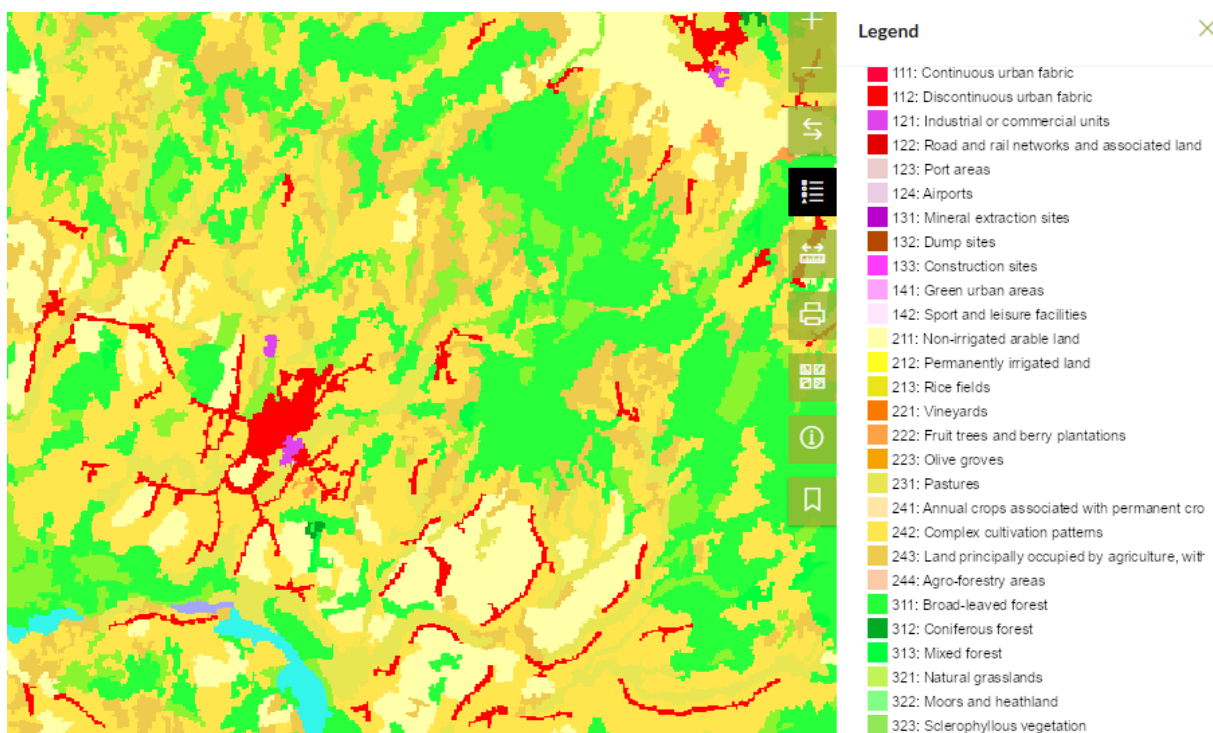
Cilj ovoga rada je usporedba teoretskih obrazaca sa izmjerenim vrijednostima vremena koncentracije i vremena zakašnjenja sliva. Promatrani su slivovi Bjelovarska i Vučica u vremenskom periodu od 1991. do 2020. godine. Podaci o protocima preuzeti su sa hidroloških postaja Bjelovar i Beničanci-Prkos, dok su podaci o zabilježenim oborinama preuzeti sa meteoroloških postaja Bjelovar i Orahovica. Uzima se da su oborine zabilježene na postajama rasprostranjene po cijeloj površini sliva sa istim intenzitetom i trajanjem. Za potrebe izračuna teorijskih vrijednosti korišten je računalni program *QGIS* pomoću kojeg su dobivene karakteristike tla na području sliva i ostale veličine potrebne u proračunu. Od teorijskih metoda za izračun vremena koncentracije i zakašnjenja izdvojene su metoda Kirpich, FAA, SCS i metoda kinematskog vala. Na području sliva Bjelovarska uglavnom prevladavaju poljoprivredna zemljišta, šume i urbane površine. Sliv Vučica također je uvelike prekriven poljoprivrednim zemljištima i šumama ali za razliku od Bjelovarske ima zanemarivo malo urbanih površina. Detaljniji prikaz pokrova zemljišta prikazan je na slikama u nastavku. Slike su preuzete sa internet stranice *Copernicus Land Monitoring Service*.



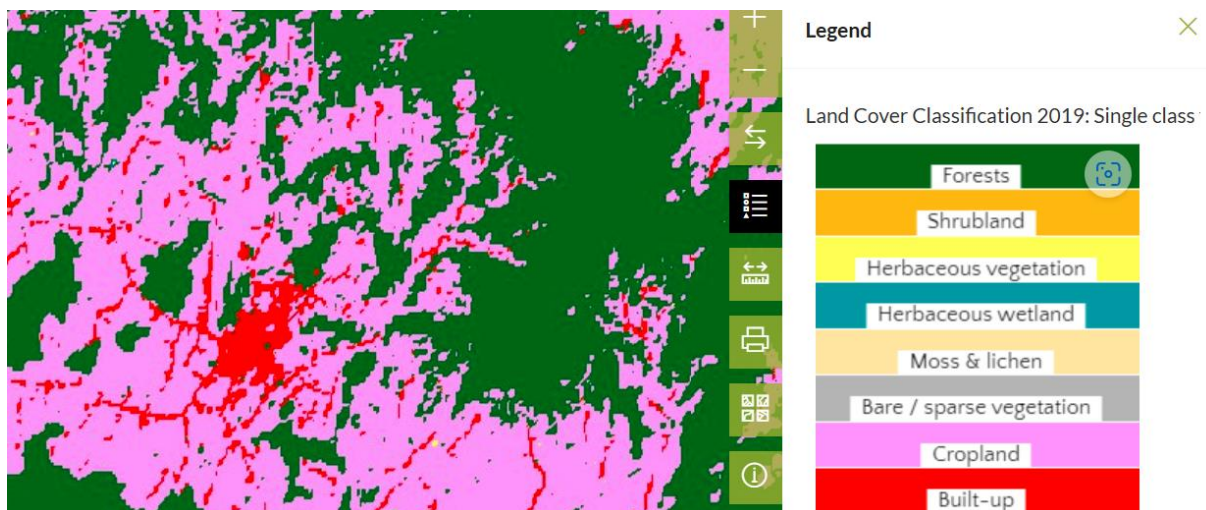
Slika 1: Pokrov zemljišta u području sliva Vučica (CORINE land cover)



Slika 2: Pokrov zemljišta u području sliva Vučica (Dynamic land cover)



Slika 3: Pokrov zemljišta u području sliva Bjelovarska (CORINE land cover)



Slika 4: Pokrov zemljišta u području sliva Bjelovarska (Dynamic land cover)

Prikazane su tablice sa osnovnim podacima o slivovima koji su u kasnijim poglavljima korišteni za izračun teorijskih vrijednosti vremena koncentracije.

Tablica 1: Vrijednosti korištene u proračunu za sliv Bjelovarska

Površina sliva	A	80	km ²
Duljina toka	L	13000	m
Prosječan pad sliva	S	0.0555	m/m
Koef. Otjecanja u racionalnoj metodi	C	0.65	-
CN broj krivulje	CN	78	-
Manningov koeficijent hrapavosti	n	0.07	-
Intenzitet efektivne oborine	I_{pe}	1.35	mm/min

Tablica 2: Vrijednosti korištene u proračunu za sliv Vučica

Površina sliva	A	181	km ²
Duljina toka	L	41060	m
Prosječan pad sliva	S	0.0768	m/m
Koef. Otjecanja u racionalnoj metodi	C	0.65	-
CN broj krivulje	CN	78	-
Manningov koeficijent hrapavosti	n	0.07	-
Intenzitet efektivne oborine	I_{pe}	1.3	mm/min

2 METODOLOGIJA

U ovom poglavlju objašnjene su metode i načini izračuna vremena koncentracije i vremena zakašnjenja. U slučaju empirijskih vrijednosti prikazan je način na koji se odabiru velikovodni događaji i kako se na temelju istih dolazi do izračunatih vrijednosti. Nadalje, ukratko su opisane teorijske metode koje su korištene, i priložene su formule za izračun vremena koncentracije.

2.1. Metodologija empirijskih vrijednosti

Kako bismo dobili što pouzdanije rezultate potrebno je promatrati dovoljno veliko vremensko razdoblje, u ovom slučaju 30 godina. U ovome radu uzeti su podaci o oborinama i protocima u periodu od 1990. do 2020. godine. Prvi korak je odrediti velikovodne događaje, odnosno događaje unutar promatranog vremenskog perioda koji su interesantni u smislu velikih voda. Naravno, neophodno je da takvi događaji imaju zabilježenu oborinu i protok. Nadalje, promatraju se mjeseci s maksimalnim protokom većim od cca. 50% od maksimalnog protoka za cijeli promatrani period. Pretpostavlja se da su to događaji koji imaju neki velikovodni val. Također, odabrani događaj ne smije imati složen hidrogram, odnosno ne smije imati više od jednog vršnog protoka. S obzirom da je veliki broj potencijalnih događaja koji ne zadovoljavaju neki od navedenih kriterija, u obzir su uzeti i protoci koji su nešto manji od 50% maksimalnog protoka. Na taj način dobiven je dovoljno velik uzorak i sami rezultati su vjerodostojniji. U tablici 3 prikazani su svi mjesečni i godišnji maksimumi protoka za sliv Bjelovarska. U tablici 4 žutom bojom su označeni svi potencijalni događaji. Nakon sagledavanja podataka o oborinama i oblika hidrograma, u tablici 5 prikazani su odabrani velikovodni događaji. Isti postupak u nastavku je prikazan i za sliv Vučicu.

Tablica 3: Prikaz maksimalnih protoka po mjesecima za sliv Bjelovarska

Mjesečni i godišnji maksimumi protoka (m ³ /s)													
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
1991													
1992	0.64	1.51	6.22	1.13	3.91	4.22	0.42	0.11	0.19	4.41	15.66	7.07	15.66
1993													
1994													
1995													
1996	7.07	4.49	0.31	10.19	6.48	0.14	0.14	1.11	9.07	1.84	9.23	9.55	10.19
1997	2.27	7.14	0.41	1.96	7.29	1.41	1.11	0.2	0.12	1.77	9.87	14.49	14.49
1998	10.11	0.38	7.29	4.84	8.67	0.62	2.65	2.9	12.29	12.72	12.72	1.59	12.72
1999	7.44	10.88	5.9	10.8	12.04	22.38	6.11	0.33	0.5	0.29	1.58	10.08	22.38
2000	0.6	3.13	1.27	11.29	1.07	0.65	1.84	0.04	0.88	0.1	0.37	2.54	11.29
2001	5.33	3.67	11.54	0.70	1.40	2.09	0.29	0.29	4.28	0.11	3.60	2.09	11.54
2002	0.88	1.40	1.90	7.14	1.00	0.55	4.90	4.83	4.90	3.20	4.90	0.82	7.14
2003	1.46	1.07	1.21	0.55	0.19	0.33	2.67	0.70	0.14	1.52	4.21	0.46	4.21
2004	2.67	0.65	2.61	6.55	0.19	1.00	0.14	6.92	0.33	7.29	3.87	0.60	7.29
2005	0.29	5.19	3.87	1.07	2.15	0.41	6.19	12.37	0.33	0.19	1.21	7.52	12.37
2006	3.80	0.76	6.99	0.55	2.54	4.07	0.10			0.26	1.52	1.07	6.99
2007	0.85	4.39	3.57	0.19	0.53	0.33	0.06	0.03	1.08	3.49	6.30	1.93	6.30
2008	0.63	0.45	8.93	0.36	0.12	16.97	0.29	0.17	0.06	0.53	0.22	3.81	16.97
2009	2.74	3.89	0.63	0.40	0.40	0.45	0.36	0.06	0.40	0.17	0.29	1.31	3.89
2010	2.19	8.49	1.86	3.57	16.37	16.52	1.55	19.46	29.41	1.67	12.86	7.62	29.41
2011	0.74	0.97	0.36	0.85	0.29	0.29	0.63	0.17	1.37	0.14	0.22	0.79	1.37
2012	0.45	0.97	0.33	0.08	0.49	3.49	0.03	0.02	0.49	0.14	0.74	4.39	4.39
2013	9.16	14.22	24.91	5.45	2.32	3.41	1.08	1.20	1.93	0.92	17.73	0.46	24.91
2014	0.35	18.45	0.40	5.09	22.45	10.10	7.35	15.23	34.60	34.33	2.00	1.90	34.60
2015	10.10	6.14	0.96	0.48	21.41	0.18	0.06	0.25	0.23	12.97	3.77	0.15	21.41
2016	16.09	10.92	25.96	0.54	4.85	0.96	0.60	4.26	0.20	0.64	12.21	0.23	25.96
2017	0.33	5.00	0.92	0.23						3.84	2.93	19.22	19.22
2018	7.03	11.41	23.84	19.55	0.91	4.49	5.94	1.52	5.65	0.41	0.91	0.37	23.84
2019	0.77	0.86	0.49	2.28	18.42	11.15	11.79	0.26	4.49	1.46	17.95	19.55	19.55
2020	1.58	1.13	0.77	0.15	0.33	1.02	18.90	2.35	1.76	6.82	0.08	10.53	18.90
Max	16.09	18.45	25.96	19.55	22.45	22.38	18.90	19.46	34.60	34.33	17.95	19.55	34.60
Sr	3.68	4.91	5.52	3.69	5.43	4.29	3.01	3.12	4.78	3.89	5.65	5.01	14.88
Min	0.29	0.38	0.31	0.08	0.12	0.14	0.03	0.02	0.06	0.1	0.08	0.15	1.37

Tablica 4: Prikaz potencijalnih događaja za sliv Bjelovarska

Mjesečni i godišnji maksimumi protoka (m ³ /s)													
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
1991													
1992	0.64	1.51	6.22	1.13	3.91	4.22	0.42	0.11	0.19	4.41	15.66	7.07	15.66
1993													
1994													
1995													
1996	7.07	4.49	0.31	10.19	6.48	0.14	0.14	1.11	9.07	1.84	9.23	9.55	10.19
1997	2.27	7.14	0.41	1.96	7.29	1.41	1.11	0.2	0.12	1.77	9.87	14.49	14.49
1998	10.11	0.38	7.29	4.84	8.67	0.62	2.65	2.9	12.29	12.72	12.72	1.59	12.72
1999	7.44	10.88	5.9	10.8	12.04	22.38	6.11	0.33	0.5	0.29	1.58	10.08	22.38
2000	0.6	3.13	1.27	11.29	1.07	0.65	1.84	0.04	0.88	0.1	0.37	2.54	11.29
2001	5.33	3.67	11.54	0.70	1.40	2.09	0.29	0.29	4.28	0.11	3.60	2.09	11.54
2002	0.88	1.40	1.90	7.14	1.00	0.55	4.90	4.83	4.90	3.20	4.90	0.82	7.14
2003	1.46	1.07	1.21	0.55	0.19	0.33	2.67	0.70	0.14	1.52	4.21	0.46	4.21
2004	2.67	0.65	2.61	6.55	0.19	1.00	0.14	6.92	0.33	7.29	3.87	0.60	7.29
2005	0.29	5.19	3.87	1.07	2.15	0.41	6.19	12.37	0.33	0.19	1.21	7.52	12.37
2006	3.80	0.76	6.99	0.55	2.54	4.07	0.10			0.26	1.52	1.07	6.99
2007	0.85	4.39	3.57	0.19	0.53	0.33	0.06	0.03	1.08	3.49	6.30	1.93	6.30
2008	0.63	0.45	8.93	0.36	0.12	16.97	0.29	0.17	0.06	0.53	0.22	3.81	16.97
2009	2.74	3.89	0.63	0.40	0.40	0.45	0.36	0.06	0.40	0.17	0.29	1.31	3.89
2010	2.19	8.49	1.86	3.57	16.37	16.52	1.55	19.46	29.41	1.67	12.86	7.62	29.41
2011	0.74	0.97	0.36	0.85	0.29	0.29	0.63	0.17	1.37	0.14	0.22	0.79	1.37
2012	0.45	0.97	0.33	0.08	0.49	3.49	0.03	0.02	0.49	0.14	0.74	4.39	4.39
2013	9.16	14.22	24.91	5.45	2.32	3.41	1.08	1.20	1.93	0.92	17.73	0.46	24.91
2014	0.35	18.45	0.40	5.09	22.45	10.10	7.35	15.23	34.60	34.33	2.00	1.90	34.60
2015	10.10	6.14	0.96	0.48	21.41	0.18	0.06	0.25	0.23	12.97	3.77	0.15	21.41
2016	16.09	10.92	25.96	0.54	4.85	0.96	0.60	4.26	0.20	0.64	12.21	0.23	25.96
2017	0.33	5.00	0.92	0.23						3.84	2.93	19.22	19.22
2018	7.03	11.41	23.84	19.55	0.91	4.49	5.94	1.52	5.65	0.41	0.91	0.37	23.84
2019	0.77	0.86	0.49	2.28	18.42	11.15	11.79	0.26	4.49	1.46	17.95	19.55	19.55
2020	1.58	1.13	0.77	0.15	0.33	1.02	18.90	2.35	1.76	6.82	0.08	10.53	18.90
Max	16.09	18.45	25.96	19.55	22.45	22.38	18.90	19.46	34.60	34.33	17.95	19.55	34.60
Sr	3.68	4.91	5.52	3.69	5.43	4.29	3.01	3.12	4.78	3.89	5.65	5.01	14.88
Min	0.29	0.38	0.31	0.08	0.12	0.14	0.03	0.02	0.06	0.1	0.08	0.15	1.37

Tablica 5: Prikaz odabranih događaja za sliv Bjelovarska

Mjesečni i godišnji maksimumi protoka (m ³ /s)													
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
1991													
1992	0.64	1.51	6.22	1.13	3.91	4.22	0.42	0.11	0.19	4.41	15.66	7.07	15.66
1993													
1994													
1995													
1996	7.07	4.49	0.31	10.19	6.48	0.14	0.14	1.11	9.07	1.84	9.23	9.55	10.19
1997	2.27	7.14	0.41	1.96	7.29	1.41	1.11	0.2	0.12	1.77	9.87	14.49	14.49
1998	10.11	0.38	7.29	4.84	8.67	0.62	2.65	2.9	12.29	12.72	12.72	1.59	12.72
1999	7.44	10.88	5.9	10.8	12.04	22.38	6.11	0.33	0.5	0.29	1.58	10.08	22.38
2000	0.6	3.13	1.27	11.29	1.07	0.65	1.84	0.04	0.88	0.1	0.37	2.54	11.29
2001	5.33	3.67	11.54	0.70	1.40	2.09	0.29	0.29	4.28	0.11	3.60	2.09	11.54
2002	0.88	1.40	1.90	7.14	1.00	0.55	4.90	4.83	4.90	3.20	4.90	0.82	7.14
2003	1.46	1.07	1.21	0.55	0.19	0.33	2.67	0.70	0.14	1.52	4.21	0.46	4.21
2004	2.67	0.65	2.61	6.55	0.19	1.00	0.14	6.92	0.33	7.29	3.87	0.60	7.29
2005	0.29	5.19	3.87	1.07	2.15	0.41	6.19	12.37	0.33	0.19	1.21	7.52	12.37
2006	3.80	0.76	6.99	0.55	2.54	4.07	0.10			0.26	1.52	1.07	6.99
2007	0.85	4.39	3.57	0.19	0.53	0.33	0.06	0.03	1.08	3.49	6.30	1.93	6.30
2008	0.63	0.45	8.93	0.36	0.12	16.97	0.29	0.17	0.06	0.53	0.22	3.81	16.97
2009	2.74	3.89	0.63	0.40	0.40	0.45	0.36	0.06	0.40	0.17	0.29	1.31	3.89
2010	2.19	8.49	1.86	3.57	16.37	16.52	1.55	19.46	29.41	1.67	12.86	7.62	29.41
2011	0.74	0.97	0.36	0.85	0.29	0.29	0.63	0.17	1.37	0.14	0.22	0.79	1.37
2012	0.45	0.97	0.33	0.08	0.49	3.49	0.03	0.02	0.49	0.14	0.74	4.39	4.39
2013	9.16	14.22	24.91	5.45	2.32	3.41	1.08	1.20	1.93	0.92	17.73	0.46	24.91
2014	0.35	18.45	0.40	5.09	22.45	10.10	7.35	15.23	34.60	34.33	2.00	1.90	34.60
2015	10.10	6.14	0.96	0.48	21.41	0.18	0.06	0.25	0.23	12.97	3.77	0.15	21.41
2016	16.09	10.92	25.96	0.54	4.85	0.96	0.60	4.26	0.20	0.64	12.21	0.23	25.96
2017	0.33	5.00	0.92	0.23						3.84	2.93	19.22	19.22
2018	7.03	11.41	23.84	19.55	0.91	4.49	5.94	1.52	5.65	0.41	0.91	0.37	23.84
2019	0.77	0.86	0.49	2.28	18.42	11.15	11.79	0.26	4.49	1.46	17.95	19.55	19.55
2020	1.58	1.13	0.77	0.15	0.33	1.02	18.90	2.35	1.76	6.82	0.08	10.53	18.90
Max	16.09	18.45	25.96	19.55	22.45	22.38	18.90	19.46	34.60	34.33	17.95	19.55	34.60
Sr	3.68	4.91	5.52	3.69	5.43	4.29	3.01	3.12	4.78	3.89	5.65	5.01	14.88
Min	0.29	0.38	0.31	0.08	0.12	0.14	0.03	0.02	0.06	0.1	0.08	0.15	1.37

Tablica 6: Prikaz maksimalnih protoka po mjesecima za sliv Vučica

Mjesečni i godišnji maksimumi protoka (m ³ /s)													
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
1991													
1992													
1993													
1994													
1995													
1996													
1997													
1998													
1999													
2000													
2001													
2002													
2003		6.43	10.80	2.06	1.59	0.79	0.46	0.46	0.79	2.54	4.57	1.39	10.80
2004	3.70	12.20	9.43	29.00	3.62	8.52	2.90	3.98	3.54	14.10	24.90	14.10	29.00
2005	6.08	19.40	28.40	17.30	5.20	8.74	13.60	22.60	13.40	10.10	3.62	11.90	28.40
2006	24.80	21.30	22.60	22.70	15.50	20.90	2.38	2.74	1.86	2.58	2.90	1.94	24.80
2007	2.90	12.80	15.50	2.34	5.03	1.66	1.43	2.14	2.06	11.40	22.30	12.60	22.30
2008	13.00	3.74	23.70	8.44	4.44	10.90	12.20	1.78	3.34	3.94	1.70	2.18	23.70
2009	6.39	14.20	6.58	2.10	1.70	2.90	2.74	1.66	2.26	1.07	2.34	6.98	14.20
2010	13.70	25.10	12.60	10.60	27.20	31.20	5.10	2.10	20.60	9.41	9.56	24.00	31.20
2011	6.40	4.05	6.27	3.27	2.03	2.29	1.13	0.65	0.25	0.93	0.65	1.79	6.40
2012	1.73	4.27	1.98	0.90	4.71	1.27	0.53	0.39	0.47	1.46	3.06	17.70	17.70
2013	15.90	22.30	23.50	24.70	2.46	1.81	2.32	1.16	12.80	12.50	6.93	2.70	24.70
2014	1.99	8.51	13.00	3.15	30.30	1.99	3.20	13.50	16.10	27.00	6.86	11.40	30.30
2015	18.90	20.70	23.60	3.75	35.20	12.30	1.27	3.67	1.45	20.50	5.37	2.73	35.20
2016	21.90	21.40	28.90	3.01	3.63	11.90	33.80	4.12	11.40	5.10	14.50	4.08	33.80
2017	2.58	28.90	28.70	3.14	4.36	1.49	0.73	0.44	1.28	8.42	3.14	22.50	28.90
2018	15.40	14.60	32.60	19.10	2.31	2.87	3.74	2.09	2.22	3.11	2.18	1.85	32.60
2019	1.32	2.76	0.79	4.90	26.70	13.20	2.01	1.56	1.97	1.52	3.99	3.59	26.70
2020													
Max	24.80	28.90	32.60	29.00	35.20	31.20	33.80	22.60	20.60	27.00	24.90	24.00	35.20
Sr	9.79	14.27	17.00	9.44	10.35	7.93	5.27	3.83	5.63	7.98	6.97	8.44	24.75
Min	1.32	2.76	0.79	0.90	1.59	0.79	0.46	0.39	0.25	0.93	0.65	1.39	6.40

Tablica 7: Prikaz potencijalnih događaja za sliv Vučica

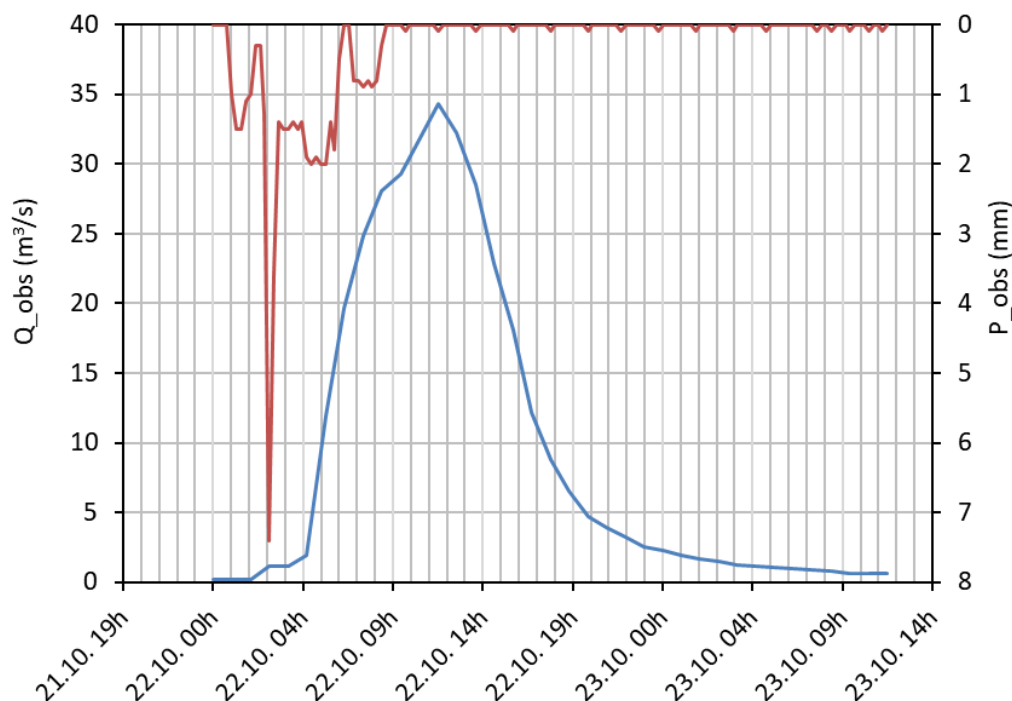
Mjesečni i godišnji maksimumi protoka (m ³ /s)													
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
1991													
1992													
1993													
1994													
1995													
1996													
1997													
1998													
1999													
2000													
2001													
2002													
2003		6.43	10.80	2.06	1.59	0.79	0.46	0.46	0.79	2.54	4.57	1.39	10.80
2004	3.70	12.20	9.43	29.00	3.62	8.52	2.90	3.98	3.54	14.10	24.90	14.10	29.00
2005	6.08	19.40	28.40	17.30	5.20	8.74	13.60	22.60	13.40	10.10	3.62	11.90	28.40
2006	24.80	21.30	22.60	22.70	15.50	20.90	2.38	2.74	1.86	2.58	2.90	1.94	24.80
2007	2.90	12.80	15.50	2.34	5.03	1.66	1.43	2.14	2.06	11.40	22.30	12.60	22.30
2008	13.00	3.74	23.70	8.44	4.44	10.90	12.20	1.78	3.34	3.94	1.70	2.18	23.70
2009	6.39	14.20	6.58	2.10	1.70	2.90	2.74	1.66	2.26	1.07	2.34	6.98	14.20
2010	13.70	25.10	12.60	10.60	27.20	31.20	5.10	2.10	20.60	9.41	9.56	24.00	31.20
2011	6.40	4.05	6.27	3.27	2.03	2.29	1.13	0.65	0.25	0.93	0.65	1.79	6.40
2012	1.73	4.27	1.98	0.90	4.71	1.27	0.53	0.39	0.47	1.46	3.06	17.70	17.70
2013	15.90	22.30	23.50	24.70	2.46	1.81	2.32	1.16	12.80	12.50	6.93	2.70	24.70
2014	1.99	8.51	13.00	3.15	30.30	1.99	3.20	13.50	16.10	27.00	6.86	11.40	30.30
2015	18.90	20.70	23.60	3.75	35.20	12.30	1.27	3.67	1.45	20.50	5.37	2.73	35.20
2016	21.90	21.40	28.90	3.01	3.63	11.90	33.80	4.12	11.40	5.10	14.50	4.08	33.80
2017	2.58	28.90	28.70	3.14	4.36	1.49	0.73	0.44	1.28	8.42	3.14	22.50	28.90
2018	15.40	14.60	32.60	19.10	2.31	2.87	3.74	2.09	2.22	3.11	2.18	1.85	32.60
2019	1.32	2.76	0.79	4.90	26.70	13.20	2.01	1.56	1.97	1.52	3.99	3.59	26.70
2020													
Max	24.80	28.90	32.60	29.00	35.20	31.20	33.80	22.60	20.60	27.00	24.90	24.00	35.20
Sr	9.79	14.27	17.00	9.44	10.35	7.93	5.27	3.83	5.63	7.98	6.97	8.44	24.75
Min	1.32	2.76	0.79	0.90	1.59	0.79	0.46	0.39	0.25	0.93	0.65	1.39	6.40

Tablica 8: Prikaz odabranih događaja za sliv Vučica

Mjesečni i godišnji maksimumi protoka (m ³ /s)													
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God
1991													
1992													
1993													
1994													
1995													
1996													
1997													
1998													
1999													
2000													
2001													
2002													
2003		6.43	10.80	2.06	1.59	0.79	0.46	0.46	0.79	2.54	4.57	1.39	10.80
2004	3.70	12.20	9.43	29.00	3.62	8.52	2.90	3.98	3.54	14.10	24.90	14.10	29.00
2005	6.08	19.40	28.40	17.30	5.20	8.74	13.60	22.60	13.40	10.10	3.62	11.90	28.40
2006	24.80	21.30	22.60	22.70	15.50	20.90	2.38	2.74	1.86	2.58	2.90	1.94	24.80
2007	2.90	12.80	15.50	2.34	5.03	1.66	1.43	2.14	2.06	11.40	22.30	12.60	22.30
2008	13.00	3.74	23.70	8.44	4.44	10.90	12.20	1.78	3.34	3.94	1.70	2.18	23.70
2009	6.39	14.20	6.58	2.10	1.70	2.90	2.74	1.66	2.26	1.07	2.34	6.98	14.20
2010	13.70	25.10	12.60	10.60	27.20	31.20	5.10	2.10	20.60	9.41	9.56	24.00	31.20
2011	6.40	4.05	6.27	3.27	2.03	2.29	1.13	0.65	0.25	0.93	0.65	1.79	6.40
2012	1.73	4.27	1.98	0.90	4.71	1.27	0.53	0.39	0.47	1.46	3.06	17.70	17.70
2013	15.90	22.30	23.50	24.70	2.46	1.81	2.32	1.16	12.80	12.50	6.93	2.70	24.70
2014	1.99	8.51	13.00	3.15	30.30	1.99	3.20	13.50	16.10	27.00	6.86	11.40	30.30
2015	18.90	20.70	23.60	3.75	35.20	12.30	1.27	3.67	1.45	20.50	5.37	2.73	35.20
2016	21.90	21.40	28.90	3.01	3.63	11.90	33.80	4.12	11.40	5.10	14.50	4.08	33.80
2017	2.58	28.90	28.70	3.14	4.36	1.49	0.73	0.44	1.28	8.42	3.14	22.50	28.90
2018	15.40	14.60	32.60	19.10	2.31	2.87	3.74	2.09	2.22	3.11	2.18	1.85	32.60
2019	1.32	2.76	0.79	4.90	26.70	13.20	2.01	1.56	1.97	1.52	3.99	3.59	26.70
2020													
Max	24.80	28.90	32.60	29.00	35.20	31.20	33.80	22.60	20.60	27.00	24.90	24.00	35.20
Sr	9.79	14.27	17.00	9.44	10.35	7.93	5.27	3.83	5.63	7.98	6.97	8.44	24.75
Min	1.32	2.76	0.79	0.90	1.59	0.79	0.46	0.39	0.25	0.93	0.65	1.39	6.40

Za svaki od odabranih događaja izrađen je hidrogram i hijetogram oborina. Mjerenja za oborinu zabilježena su u vremenskim inkrementima od 15 minuta dok su za protok zabilježeni vremenski inkrementi od sat vremena. Ukupno za dva promatrana sliva izdvojeni su 30 događaja. Zbog jednostavnosti i preglednosti prikazan je samo jedan događaj, dok se ostali događaji mogu pronaći u prilogu.

r.Bjelovarska 22.10.-23.10.2014.



Slika 5: događaj na slivu Bjelovarska 22.10.2014.

Na temelju izdvojenih događaja može se izračunati vrijeme koncentracije i zakašnjenja. Vrijeme koncentracije računa se na dva načina, t_{c1} i t_{c2} . t_{c1} predstavlja vrijeme od tezista hijetograma efektivne oborine do kraja hidrograma direktnog otjecanja, dok t_{c2} predstavlja vrijeme od kraja hijetograma efektivne oborine do kraja hidrograma direktnog otjecanja. Oborine koje se javljaju nakon vrha hidrograma su zanemarene. Vrijeme zakašnjenja predstavlja vrijeme od težišta hijetograma efektivne oborine do vrha hidrograma. U trećem poglavlju prikazani su rezultati za sve odabrane događaje.

2.2. Metodologija teorijskih obrazaca

Od teorijskih metoda odabrane su metoda Kirpich, FAA, SCS i metoda kinematskog vala.

Metoda Kirpicha razvijena je 1940. godine promatrajući manje ruralne slivove u SAD-u. Radi se o slivovima sa velikim nagibima terena. Kirpich je pogodan za malene slivove s dominantnim tečenjem u vodotoku. [1] Formula koja se koristi u ovoj metodi za izračun vremena koncentracije glasi:

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

Gdje je: L – duljina toka

S – prosječan pad sliva

Podaci o duljini sliva i prosječnom padu sliva dobiveni su korištenjem programa *QGIS*.

Sljedeća metoda, FAA, razvijena je 1970. godine od strane Federalne avijacijske administracije (eng. *Federal Aviation Administration*). Primarni razlog zašto je razvijena je za odvodnju sa pista na aerodromima. Također se pokazala primjenjiva u kontekstu urbaniziranih površina. [2] Vrijeme koncentracije dobiva se sljedećom jednadžbom:

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

Gdje je: L – duljina toka

S – prosječan pad sliva

C – koeficijent otjecanja u racionalnoj metodi

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

Treća metoda, *Soil Conservation Service* (SCS) bazira se na definiranju broja krivulje CN, ovisno o stupnju izgrađenosti površine, vlažnosti tla i vrsti pokrova tla. Jedna je od popularnijih metoda za izračun efektivne oborine na malim poljoprivrednim, šumskim i urbanim slivovima. [3]

Prema ovoj metodi vrijeme koncentracije dobiva se sljedećim izrazom:

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

Gdje je: L – duljina toka

S – prosječan pad sliva

CN – broj krivulje otjecanja

Zadnja metoda koja je korištena u ovom radu je metoda kinematskog vala. Ova metoda se bazira na pojednostavljenim pretpostavkama o načinu na koji se voda kreće po površini pod utjecajem gravitacije i trenja. Metoda se generalno pokazala primjenjiva za cestovnu odvodnju. [4] Vrijeme koncentracije pomoću ove metode može se izračunati preko izraza:

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

Gdje je: L – duljina toka

S – prosječan pad sliva

n – Manningov koeficijent hrapavosti

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

S obzirom da su vrijeme koncentracije i intenzitet oborina međusobno ovisni, konačno rješenje se dobiva iteracijom. Metoda kinematskog vala često se koristi za urbane površine ili poljoprivredna zemljišta.

U tablici 5 prikazani su parametri slivova na temelju kojih su izračunate teorijske vrijednosti vremena koncentracije i zakašnjenja.

Tablica 9: Parametri slivova za proračun teorijskih vrijednosti

Bjelovarska			
Duljina toka	L	13000	m/m
Prosječan pad sliva	S	0.0555	m/m
Koeficijent otjecanja u racionalnoj metodi	C	0.65	
CN broj krivulje	CN	78	
Manningov koeficijent hrapavosti	n	0.07	
Intenzitet efektivne oborine	I_{pe}	1.35	mm/min
Vučica			
Duljina toka	L	41060	m/m
Prosječan pad sliva	S	0.0768	m/m
Koeficijent otjecanja u racionalnoj metodi	C	0.65	
CN broj krivulje	CN	78	
Manningov koeficijent hrapavosti	n	0.07	
Intenzitet efektivne oborine	I_{pe}	1.3	mm/min

3 ANALIZA I USPOREDBA RJEŠENJA

3.1. Sliv Bjelovarska

Empirijska rješenja za sve odabrane događaje prikazana su u tablici 7. na dnu tablice također su prikazani osnovni statistički parametri, odnosno srednja vrijednost, minimum, maksimum i standardna devijacija.

Tablica 10: Prikaz empirijskih rezultata i osnovne statističke obrade vremena koncentracije, zakašnjenja i maksimalnog protoka za sliv Bjelovarska

	Događaj	tL.obs (h)	tc1.obs (h)	tc2.obs (h)	Qmax (m ³ /s)
1	05.08.2010	6.2	19.3	19.0	18.5
2	06.08.2010	5.0	17.0	16.7	19.5
3	18.09.2010	17.8	38.8	21.0	29.4
4	11.11.2013	9.8	27.8	11.7	17.7
5	11.02.2014	8.0	18.0	11.5	18.5
6	16.05.2014	6.8	32.8	26.5	22.5
7	13.09.2014	5.3	21.2	16.0	34.6
8	22.10.2014	8.0	21.0	13.0	34.3
9	22.05.2015	8.5	27.5	18.5	21.4
10	17.03.2018	6.8	28.7	18.5	23.8
11	31.03.2018	13.3	29.3	27.5	23.7
12	15.05.2019	12.0	40.0	18.2	18.4
13	25.07.2020	4.0	17.0	15.2	18.9

Srednja vrijednost	8.6	26.0	18.0	23.17
Minimum	4.0	17.0	11.5	17.7
Maksimum	17.8	40.0	27.5	34.6
Standardna devijacija	3.84	7.89	4.94	5.96

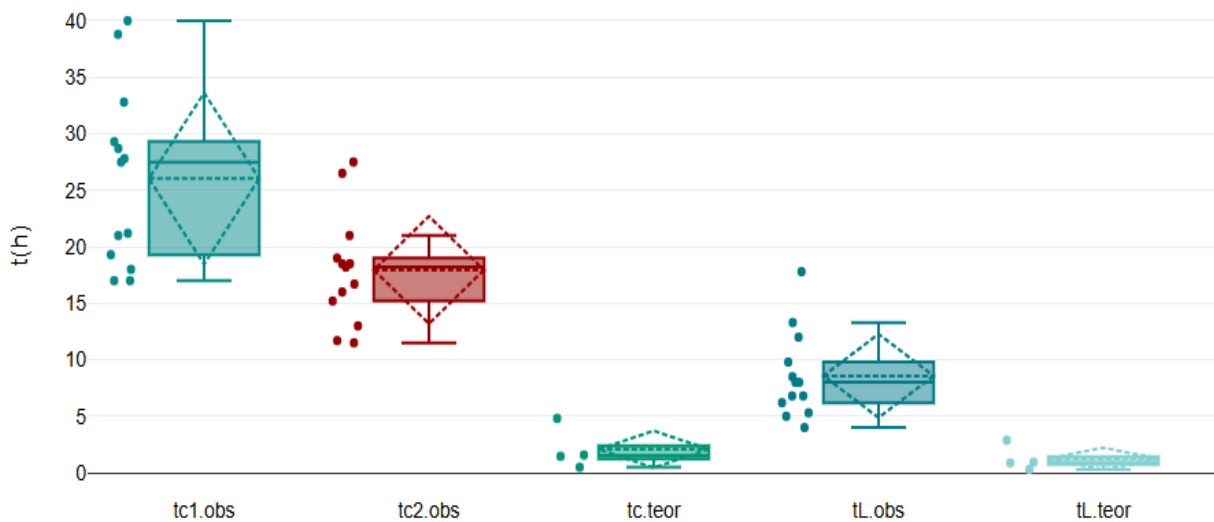
U nastavku su prikazani rezultati dobiveni preko spomenutih teoretskih obrazaca. Vrijeme zakašnjenja izračunato je koristeći vrijeme koncentracije na način da se pretpostavlja odnos: $t_L = 0,6 \times t_C$

U slučaju izmjerenih vrijednosti taj odnos iznosi: $t_L = 0,39 \times t_C$

Tablica 11: Prikaz teoretskih rezultata i osnovne statističke obrade vremena koncentracije, zakašnjenja i maksimalnog protoka za sliv Bjelovarska

	tc (h)	tL(h)
Kirpich	1.46	0.87
FAA	1.57	0.94
SCS	4.81	2.88
Kinematski val	0.49	0.29

Srednja vrijednost	2.08	1.25
Minimum	0.49	0.29
Maksimum	4.81	2.88



Slika 6: Grafički prikaz izmjerenih i teorijskih vremena koncentracije i zakašnjenja za sliv Bjelovarska

3.2 Sliv Vučica

Po istom principu prikazani su rezultati za sliv Vučicu.

Tablica 12: Prikaz empirijskih rezultata i osnovne statističke obrade vremena koncentracije, zakašnjenja i maksimalnog protoka za sliv Vučica

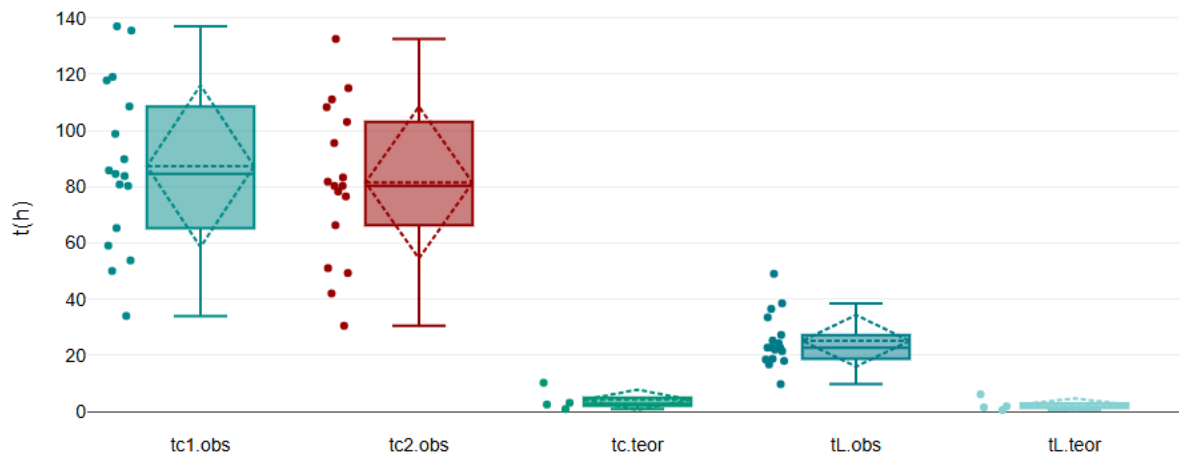
	Događaj	tL.obs (h)	tc1.obs (h)	tc2.obs (h)	Qmax (m ³ /s)
1	18.12.2004	18.75	83.75	81.75	14.1
2	13.02.2005	24.25	117.75	115	19.40
3	28.03.2005	9.75	65.25	66.25	22.50
4	28.03.2005	21.5	119	108.25	22.50
5	13.04.2005	33.5	59	42	17.30
6	23.08.2005	18	50	49.25	22.60
7	23.03.2006	22	34	30.5	17.50
8	30.04.2006	16.75	80.25	78.25	16.10
9	23.03.2007	27.25	98.75	95.5	15.50
10	26.11.2007	25.25	89.75	80.25	22.30
11	19.09.2010	22.75	85.75	80.25	20.60
12	21.03.2013	22.75	80.75	76.5	23.50
13	12.03.2015	38.5	137	132.5	23.60
14	14.10.2015	18.5	84.5	83.25	20.50
15	12.11.2016	36.5	108.5	103	14.50
16	17.01.2018	22.75	53.75	51	15.40
17	14.05.2019	49	135.5	111	26.70

Srednja vrijednost	25.16	87.25	81.44	19.68
Minimum	9.75	34.00	30.50	14.10
Maksimum	49.00	137.00	132.50	26.70
Standardna devijacija	9.47	29.66	27.81	3.78

Tablica 13: Prikaz teoretskih rezultata i osnovne statističke obrade vremena koncentracije, zakašnjenja i maksimalnog protoka za sliv Vučica

	tc (h)	tL(h)
Kirpich	3.11	1.87
FAA	2.50	1.50
SCS	10.25	6.15
Kinematski val	0.89	0.54

Srednja vrijednost	4.19	2.51
Minimum	0.89	0.54
Maksimum	10.25	6.15



Slika 7: Grafički prikaz izmjerenih i teorijskih vremena koncentracije i zakašnjenja za sliv Vučica

4 ZAKLJUČAK

Zbog problema nedostatka dovoljne količine informacija o nekom području interesa ponekad je potrebno koristiti teorijske obrasce koji su generalno razvijeni za slivove sa specifičnim karakteristikama i uvjetima. To naravno nije idealno, te se preporuča, kad god je to moguće, razviti empirijske jednadžbe na temelju lokalnih uvjeta. Na prvi pogled odmah je jasno da postoji velika razlika između izmjerenih i teorijskih rezultata. Izmjereno vrijeme koncentracije ($t_{c1.obs}$) je 12,5 puta veće od teorijskog ($t_{c.teor}$) dok je $t_{c2.obs}$ 8,5 puta veći. Izmjereno vrijeme zakašnjenja ($t_{L.obs}$) je skoro 7 puta veće od teorijskog. Teorijsko vrijeme zakašnjenja je uzeto kao 60% vrijednosti vremena koncentracije dok je izmjereno vrijeme zakašnjenja iznosilo 39% od izmjerenog vremena koncentracije za sliv Bjelovarsku i 30% za sliv Vučicu. Velike razlike proizlaze iz toga što promatrani slivovi Bjelovarska i Vučica imaju drugačije ulazne parametre od onih koji su bili korišteni pri izradi teoretskih obrazaca. Razlike se mogu primijetiti i u međusobnom odnosu teoretskih obrazaca, također zbog različitosti u ulaznim podacima i pretpostavkama. Najbliži rezultat dobiven je korištenjem SCS metode, ali valja napomenuti da ni ta metoda nije preporučljiva.

POPIS LITERATURE

- [1] Pramana, Y. H., & Harisuseno, D. (2024). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1311, 012004.
- [2] McCuen, R., Wong, S., & Rawls, W. (1984). Estimating urban time of concentration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(7), 887-904.
- [3] Sušanjanj Čule, I., Kuhar, E., & Ožanić, N. (2022). Primjena SCS metode pri konstruiranju hidrograma oteklih oborina. *Zbornik Radova (Građevinski Fakultet Sveučilišta U Rijeci)*, 25(1), 107-122. <https://doi.org/10.32762/zr.25.1.7>
- [4] Wong, T. S. W. (1994). Kinematic wave method for determination of road drainage inlet spacing. *Advances in Water Resources*, 17(6), 291-296. Elsevier.

POPIS SLIKA

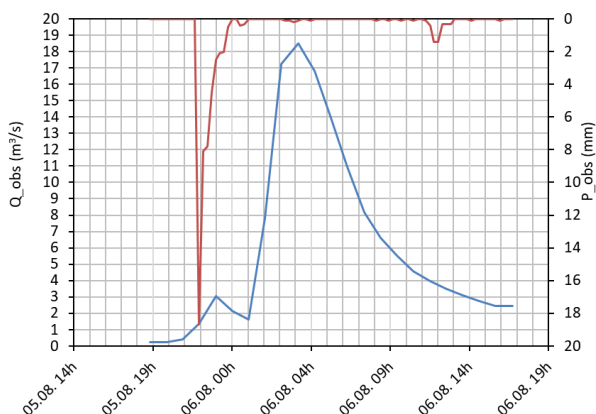
Slika 1: Pokrov zemljišta u području sliva Vučica (CORINE land cover)	1
Slika 2: Pokrov zemljišta u području sliva Vučica (Dynamic land cover)	2
Slika 3: Pokrov zemljišta u području sliva Bjelovarska (CORINE land cover)	2
Slika 4: Pokrov zemljišta u području sliva Bjelovarska (Dynamic land cover)	3
Slika 5: Događaj na slivu Bjelovarska 22.10.2014.	8
Slika 6: Grafički prikaz izmjerenih i teorijskih vremena koncentracije i vremena zakašnjenja za sliv Bjelovarska	12
Slika 7: Grafički prikaz izmjerenih i teorijskih vremena koncentracije i vremena zakašnjenja za sliv Vučica	14

POPIS TABLICA

Tablica 1: Vrijednosti korištene u proračunu za sliv Bjelovarska.....	3
Tablica 2: Vrijednosti korištene u proračunu za sliv Vučica	3
Tablica 3: Prikaz maksimalnih protoka po mjesecima za sliv Bjelovarska.....	5
Tablica 4: Prikaz potencijalnih događaja za sliv Bjelovarska	5
Tablica 5: Prikaz odabranih događaja za sliv Bjelovarska.....	6
Tablica 6: Prikaz maksimalnih protoka po mjesecima za sliv Vučica	6
Tablica 7: Prikaz potencijalnih događaja za sliv Vučica	7
Tablica 8: Prikaz odabranih događaja za sliv Vučica	7
Tablica 9: Parametri slivova za proračun teorijskih vrijednosti	10
Tablica 10: Prikaz empirijskih rezultata i osnovne statističke obrade vremena koncentracije, zakašnjenja i maksimalnog protoka za sliv Bjelovarska	11
Tablica 11: Prikaz teoretskih rezultata i osnovne statističke obrade vremena koncentracije, zakašnjenja i maksimalnog protoka za sliv Bjelovarska	12
Tablica 12: Prikaz empirijskih rezultata i osnovne statističke obrade vremena koncentracije, zakašnjenja i maksimalnog protoka za sliv Vučica	13
Tablica 13: Prikaz teretskih rezultata i osnovne statističke obrade vremena koncentracije, zakašnjenja i maksimalnog protoka za sliv Vučica	14

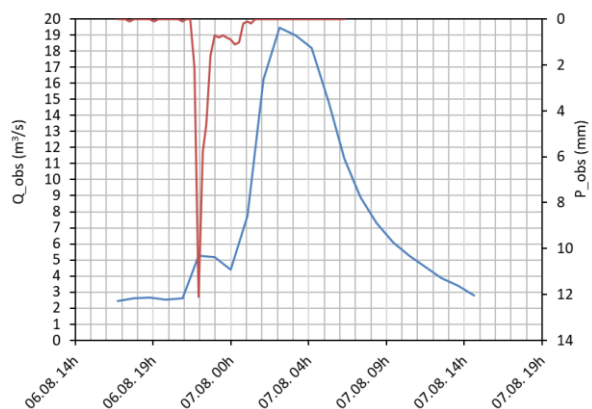
PRILOG

r.Bjelovarska 05.08.-06.08.2010.



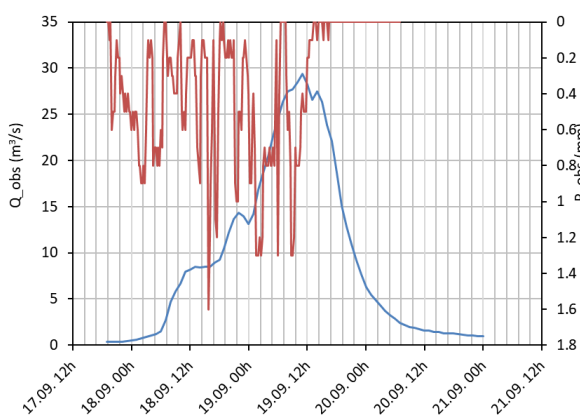
Slika 1: Događaj 06.08.2010.

r.Bjelovarska 06.08.-07.08.2010.



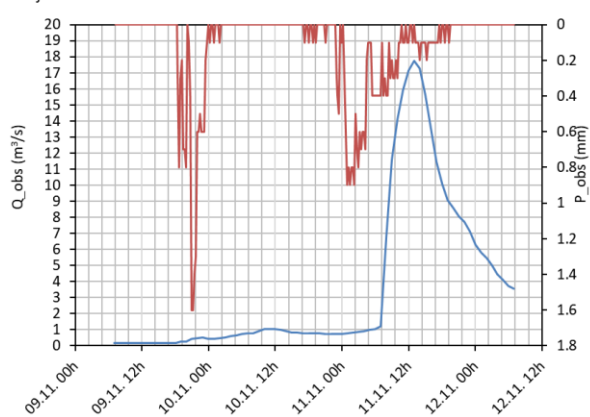
Slika 2: Događaj 07.08.2010.

r.Bjelovarska 18.09.-20.09.2010.



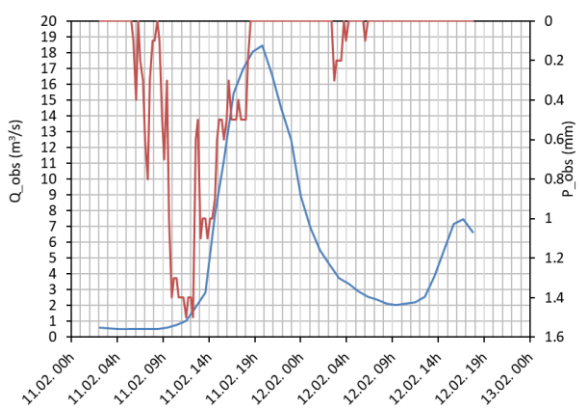
Slika 3: Događaj 19.09.2010.

r.Bjelovarska 11.11.-12.11.2013.



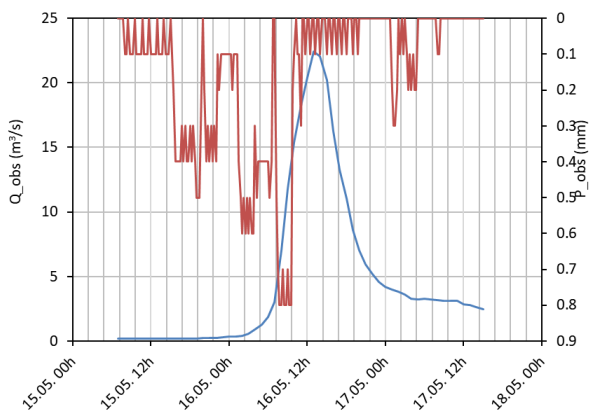
Slika 4: događaj 11.11.2013.

r.Bjelovarska 11.02.-12.02.2014.



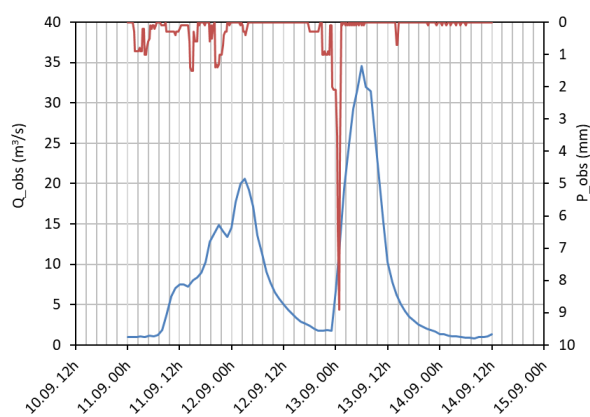
Slika 5: Događaj 11.02.2014.

r.Bjelovarska 16.05.-17.05.2014.



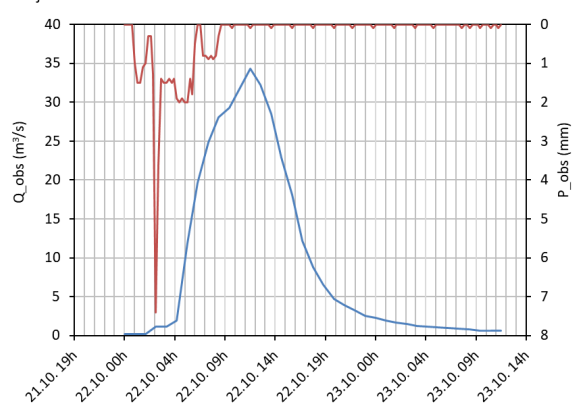
Slika 6: Događaj 16.05.2014.

r.Bjelovarska 13.09.-14.09.2014.



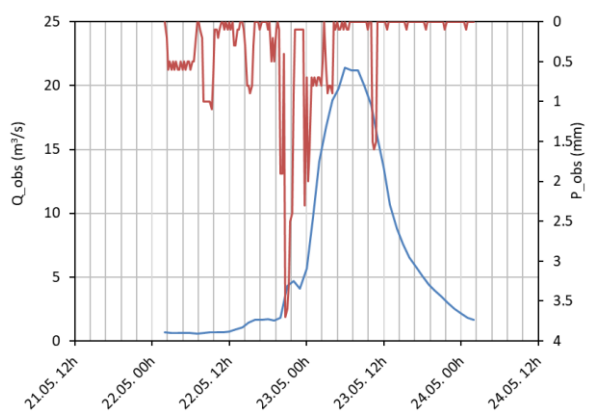
Slika 7: Događaj 13.09.2014.

r.Bjelovarska 22.10.-23.10.2014.



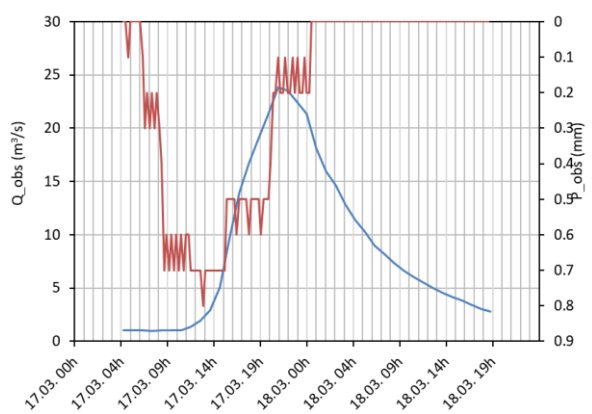
Slika 8: Događaj 22.10.2014.

r.Bjelovarska 22.05.-23.05.2015.



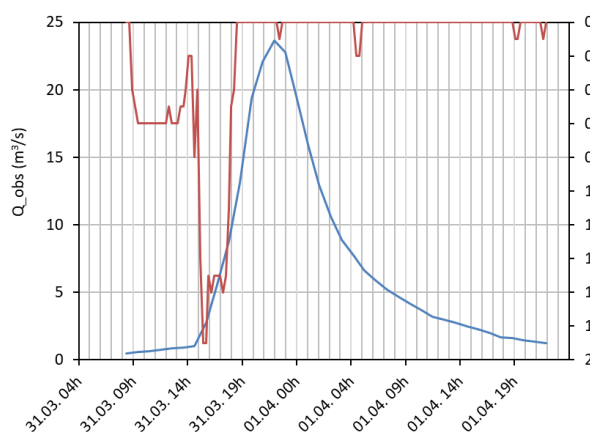
Slika 9: Događaj 23.05.2015.

r.Bjelovarska 17.03.-18.03.2018.



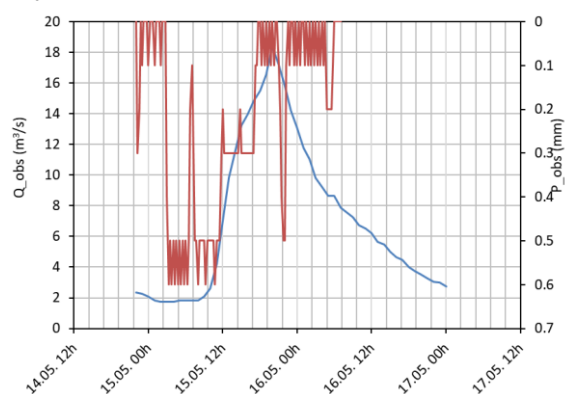
Slika 10: Događaj 18.03.2018.

r.Bjelovarska 31.03.-01.04.2018.

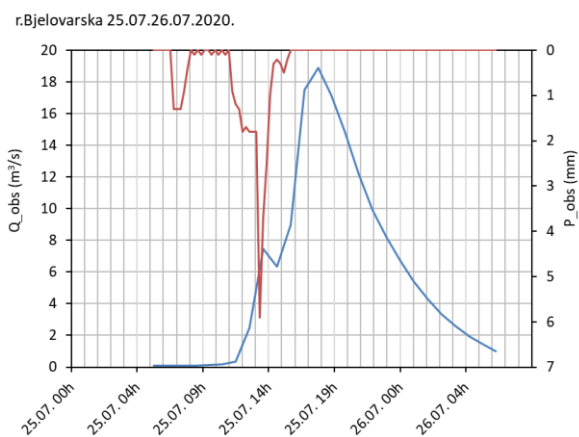


Slika 11: Događaj 31.03.2018.

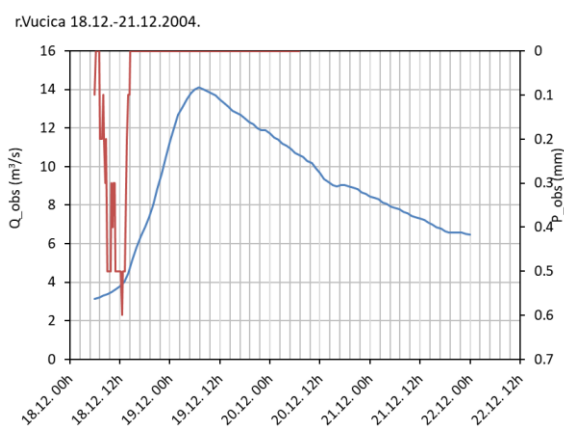
r.Bjelovarska 15.05.-16.05.2019.



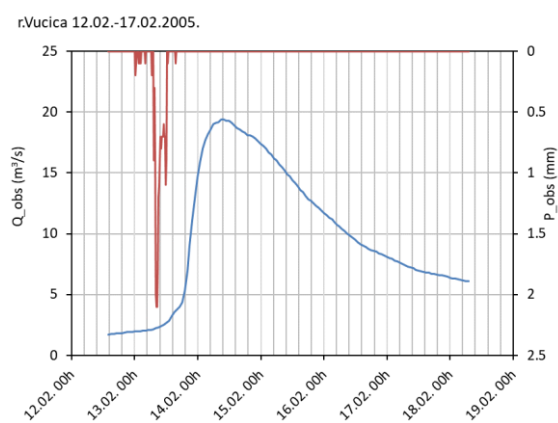
Slika 12: Događaj 15.06.2019.



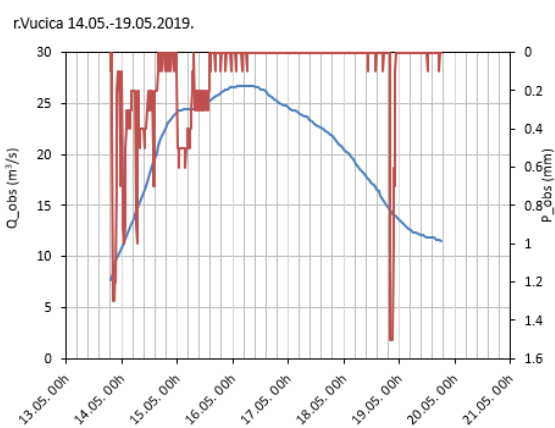
Slika 13: Događaj 25.07.2020.



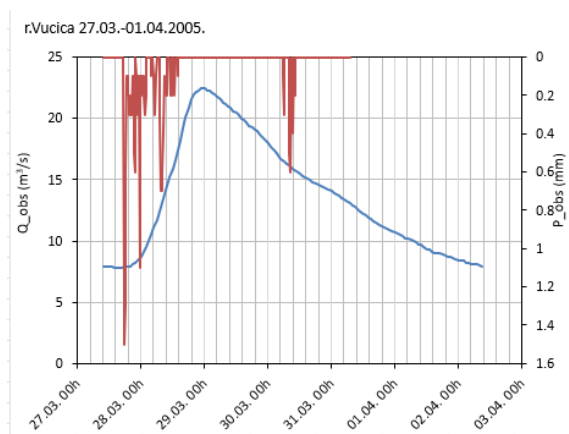
Slika 14: Događaj 19.12.2004.



Slika 15: Događaj 14.02.2005.

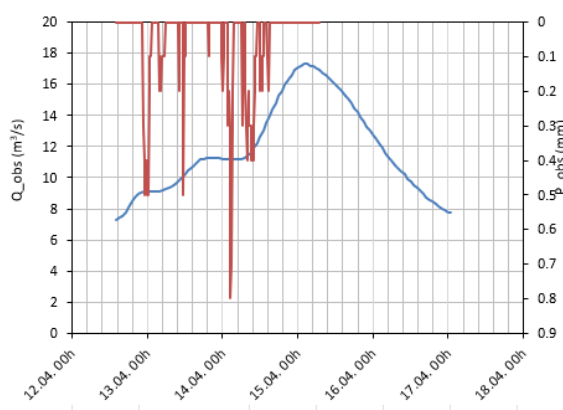


Slika 16: Događaj 16.05.2019.



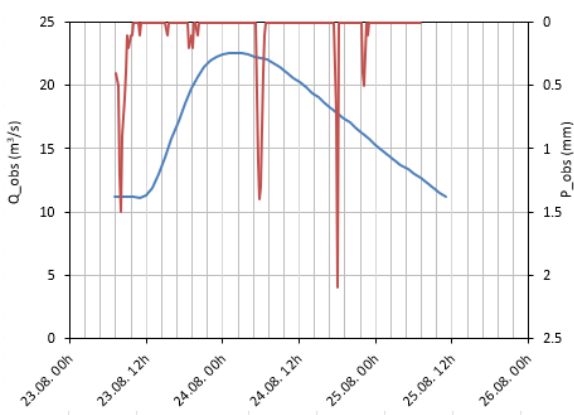
Slika 17: Događaj 29.03.2005.

r.Vucica 12.04.-17.04.2005.



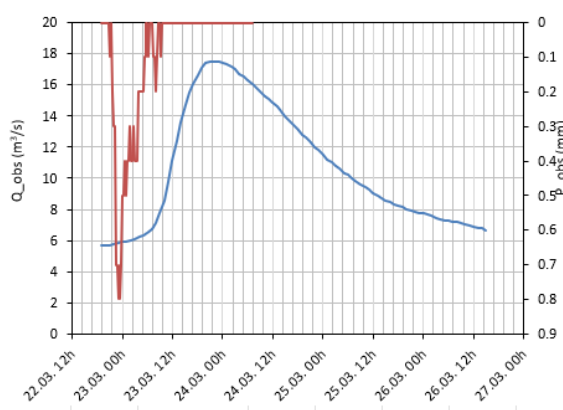
Slika 18: Događaj 15.04.2005.

r.Vucica 23.08.-25.08.2005.



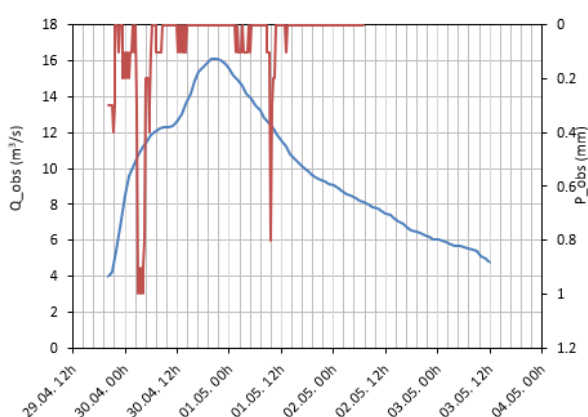
Slika 19: Događaj 24.08.2005.

r.Vucica 22.03.-25.03.2006.



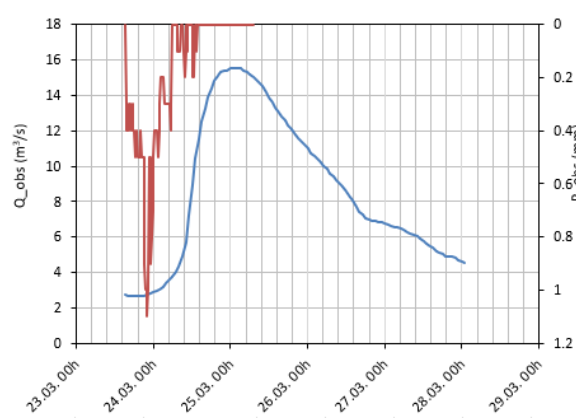
Slika 20: Događaj 24.03.2006.

r.Vucica 30.04.-03.05.2006.



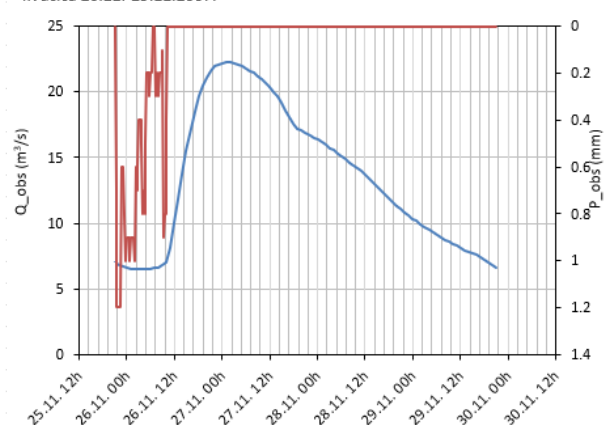
Slika 21: Događaj 01.05.2006.

r.Vucica 22.03.-25.03.2006.



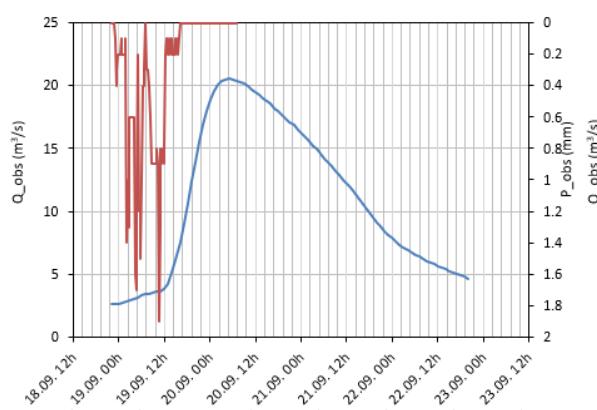
Slika 22: Događaj 25.03.2006.

r.Vucica 26.11.-29.11.2007.



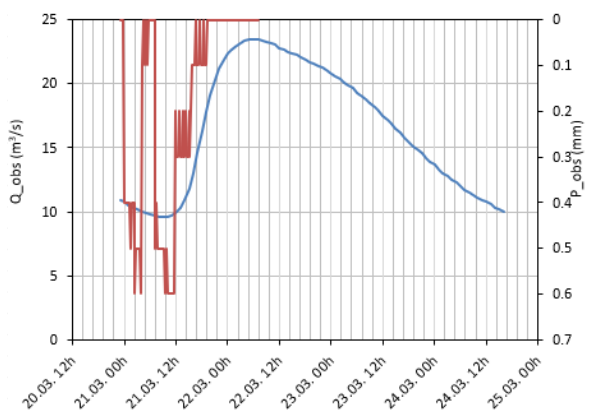
Slika 23: Događaj 27.11.2007.

r.Vucica 19.09.-22.09.2010.



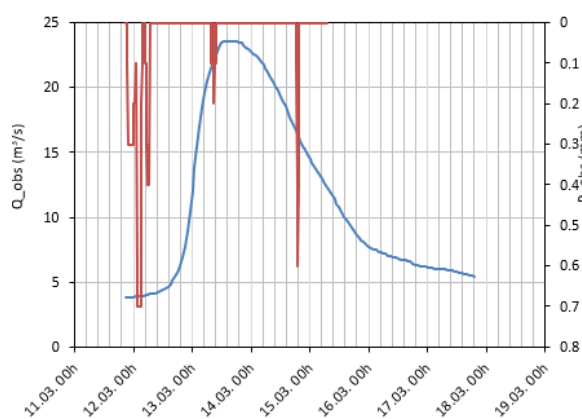
Slika 25: Događaj 20.09.2010.

r.Vucica 21.03.-24.03.2013.



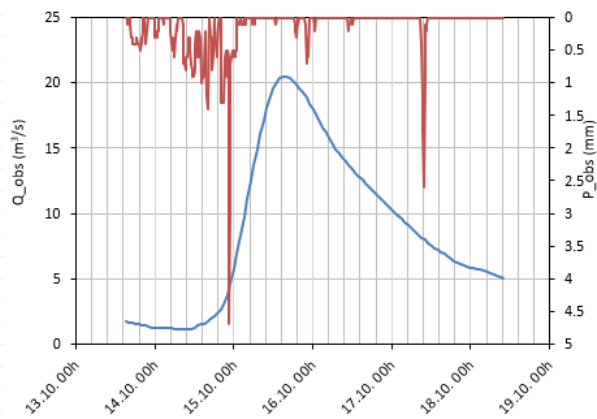
Slika 26: Događaj 22.03.2013.

r.Vucica 13.03.-17.03.2015.



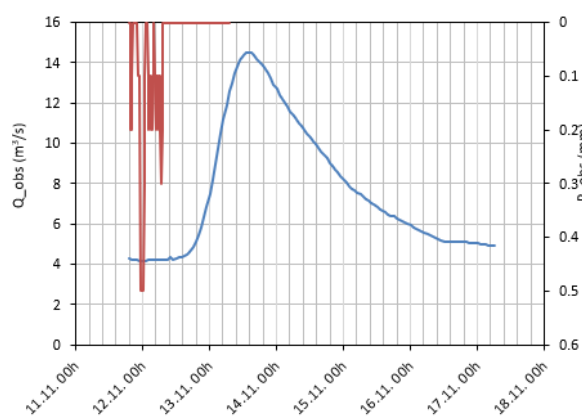
Slika 27: Događaj 14.03.2015.

r.Vucica 14.10.-18.10.2015.



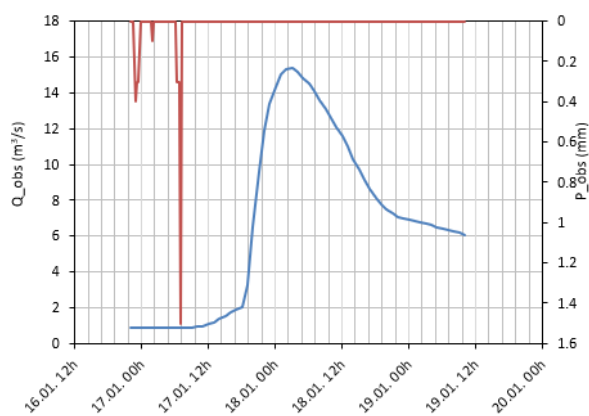
Slika 28: Događaj 16.10.2015.

r.Vucica 12.11.-17.11.2016.



Slika 29: Događaj 14.11.2016.

r.Vucica 17.01.-19.01.2018.



Slika 30: Događaj 18.01.2018.