

Analiza pojedinačnih oborinskih događaja s prekoračenjem mutnoće na krškom izvoru

Žilić, Šime

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:559285>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Šime Žilić

**Analiza pojedinačnih oborinskih događaja s prekoračenjem
mutnoće na krškom izvoru**

Diplomski rad

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij
Hidrotehnika
Inženjerska hidrologija**

**Šime Žilić
JMBAG: 0114028682**

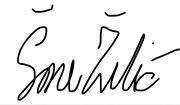
**Analiza pojedinačnih oborinskih događaja s prekoračenjem
mutnoće na krškom izvoru**

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2024.

IZJAVA

Diplomski rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom i komentorom uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.



Šime Žilić

U Rijeci, 28.08.2024.

Zahvala

Ovom prilikom želim se zahvalnosti mentorici prof. dr. sc. Nevenki Ožanić, komentorici doc. dr. sc. Ani Kadić i prof. dr.sc. Vesni Denić - Jukić za savjete, pomoć i razumijevanje koje su mi omogućili tokom izrade ovog rada.

Također se želim zahvaliti svojim prijateljima i kolegama na ogromnoj podršci tokom cijelog studija i na samom kraju neizmjernu zahvalnost dugujem svojim roditeljima Jeleni i Milanu, sestri Aniti i teti Ireni.

Hvala Vam !

Ovaj rad posvećujem nećaku Bepu.

Naslov rada: Analiza pojedinačnih oborinskih događaja s prekoračenjem mutnoće na krškom izvoru

Studij: Sveučilišni diplomski studij građevinarstvo; modul Hidrotehnika

Kolegij: Inženjerska hidrologija

SAŽETAK:

U prvom dijelu ovog rada napravljene su osnovne statističke analize protoka (Q), oborine (P) i mutnoće (T) na meteorološkim postajama Dugopolje i Bisko za krški izvor Žrnovnica. Drugi dio rada bavi se odnosom između protoka (P) i mutnoće (T) u razdobljima kada mutnoća krškog izvora Žrnovnica prelazi dopuštenu normu pitke vode od 4 NTU metodom Williams. Identificirane su, klasificirane i hidrološki objašnjene dobivene vrste histereznih petlji (kompleksna petlja i petlja u obliku osmice).

Ključne riječi: krški izvor, protok, oborine, mutnoća, histerezne petlje, Williams metoda

Thesis title: Analysis of individual rainfall events with exceeding turbidity at the karst spring

Study: University graduate study of Civil Engineering ; hydraulic engineering module

Course: Engineering Hydrology

ABSTRACT:

In the first part of this paper, the basic statistical analyzes of flow (Q), precipitation (P) and turbidity (T) at meteorological stations Dugopolje and Bisko for the karst spring Žrnovnica were analyzed. The second part of the paper deals with the relationship between flow and turbidity in periods when the turbidity of the karst spring Žrnovnica exceeds the permitted drinking water norm of 4 NTU according to the Williams method. The resulting types of hysteresis loops (complex loop and eight-shaped loop) were identified, classified and hydrologically explained.

Key words: karst spring, flow, rainfall, turbidity, hysteresis loops, Williams method

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	OPĆENITO O KRŠU.....	3
2.1	Proces karstifikacije	6
3.	HIDROLOŠKE KARAKTERISTIKE SLIVA ŽRNOVNICE.....	10
4.	HIDROGEOLOŠKA I GEOLOŠKA OBILJEŽJA SLIVA.....	11
5.	MUTNOĆA NA KRŠKIM IZVORIMA	12
5.1.	Općenito o mutnoći	12
5.2.	Mutnoća i bistrina vode	13
5.3.	Pronos suspendiranog nanosa	16
6.	OSNOVNA STATISTIČKA ANALIZA PODATAKA.....	17
6.1.	Protok - općenito.....	17
6.2.	Oborina - općenito	19
6.3.	Rezultati osnovne statističke analize podataka	21
6.3.1.	Oborine - Dugopolje	22
6.3.2.	Oborine - Bisko	24
6.3.3.	Protoci izvora Žrnovnice	26
6.3.4.	Mutnoća izvora Žrnovnice.....	28
6.4.	Koleracija i linearna regresija	30
6.4.1.	Linearna regresija.....	32
6.4.2.	Rezultati koleracijske analize i linearne regresije protoka Žrnovnice i oborina na meterološkoj postaji Dugopolje i Bisko	33
6.4.3.	Rezultati koleracijske analize i linearne regresije mutnoće izvora Žrnovnica i oborina na meterološkoj postaji Dugopolje i Bisko	34
6.4.4.	Rezultati koleracijske analiza i linearne regresije mutnoće i protoka izvora Žrnovnica.....	36
7.	WILLIAMS METODA	37
7.1.	Općenito o Williams metodi	37

7.2. Rezultati	48
7.2.1. Opće karakteristike analiziranih događaja: oborine na meteorološkoj postaji Dugopolje, protok i mutnoća izvora Žrnovnica	48
7.2.2. Opće karakteristike analiziranih događaja: oborine na meteorološkoj postaji Bisko, protok i mutnoća izvora Žrnovnica	51
7.3. Dijagrami vremenskih serija (protok, mutnoća i kumulativna oborina) i histereznih petlji za 2017. godinu.....	55
7.4. Dijagrami vremenskih serija (protok, mutnoća i kumulativna oborina) i histereznih petlji za 2018. godinu.....	62
7.5. Dijagrami vremenskih serija (protok, mutnoća i kumulativna oborina) i histereznih petlji za 2019. godinu.....	65
7.6. Rasprava	72
8. ZAKLJUČAK.....	73
9. LITERATURA.....	75

POPIS TABLICA

<i>Tablica 1: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti za Dugopolje za razdoblje 2017.g. (izradio autor).</i>	22
<i>Tablica 2: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti za Dugopolje za razdoblje 2018.g. (izradio autor).</i>	23
<i>Tablica 3: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti za Dugopolje za razdoblje 2019.g. (izradio autor).</i>	23
<i>Tablica 4: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti za Bisko za razdoblje 2017.g. (izradio autor).</i>	24
<i>Tablica 5: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti za Bisko za razdoblje 2018.g. (izradio autor).</i>	25
<i>Tablica 6: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti za Bisko za razdoblje 2019.g. (izradio autor).</i>	25
<i>Tablica 7: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti protoka za razdoblje 2017.g. (izradio autor).</i>	26
<i>Tablica 8: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti protoka za razdoblje 2018.g. (izradio autor).</i>	27
<i>Tablica 9: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti protoka za razdoblje 2019.g.</i>	28
<i>Tablica 10: Prikaz maksimuma i minimuma mutnoće za 2017.g. (izradio autor).</i>	28
<i>Tablica 11: Prikaz maksimuma i minimuma mutnoće za 2018.g. (izradio autor).</i>	29
<i>Tablica 12: Prikaz maksimuma i minimuma mutnoće za 2019.g. (izradio autor).</i>	30
<i>Tablica 13: Vrijednosti koeficijenta korelacije (r) (izradio autor).</i>	34
<i>Tablica 14: Vrijednosti koeficijenta korelacije (r) (izradio autor).</i>	35
<i>Tablica 15: Vrijednosti koeficijenta korelacije (r) (izradio autor).</i>	36
<i>Tablica 16: Opće statističke karakteristike vremenske serije (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija) za 2017. godinu. (izradio autor).</i>	41
<i>Tablica 17: Opće statističke karakteristike vremenske serije (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija) za 2018. godinu. (izradio autor).</i>	42
<i>Tablica 18: Opće statističke karakteristike vremenske serije (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija) za 2019. godinu. (izradio autor).</i>	43
<i>Tablica 19: Opće statističke karakteristike vremenske serije (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija) za 2017. godinu. (izradio autor).</i>	44
<i>Tablica 20: Opće statističke karakteristike vremenske serije (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija) za 2017. godinu. (izradio autor).</i>	45
<i>Tablica 21: Opće statističke karakteristike vremenske serije (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija) za 2017. godinu. (izradio autor).</i>	46
<i>Tablica 22: Varijable mutnoće, protoka i oborina, te puni nazivi kratica [22].</i>	47
<i>Tablica 23: Opće karakteristike analiziranih događaja za meteorološku postaju Dugopolje u 2017.g. (izradio autor).</i>	49
<i>Tablica 24: Opće karakteristike analiziranih događaja za meteorološku postaju Dugopolje u 2018.g. (izradio autor).</i>	50
<i>Tablica 25: Opće karakteristike analiziranih događaja za meteorološku postaju Dugopolje u 2019.g. (izradio autor).</i>	50
<i>Tablica 26: Opće karakteristike analiziranih događaja za meteorološku postaju Bisko u 2017.g. (izradio autor).</i>	52

<i>Tablica 27: Opće karakteristike analiziranih događaja za meteorološku postaju Bisko u 2018.g. (izradio autor).....</i>	<i>53</i>
<i>Tablica 28: Opće karakteristike analiziranih događaja za meteorološku postaju Bisko u 2019.g. (izradio autor).....</i>	<i>53</i>
<i>Tablica 29: Pregled svih tipova petlji histereze s njihovim općim karakteristikama za svaki oborinski događaj s prekoračenjem mutnoće tijekom razdoblja istraživanja 2017. - 2019. (izradio autor).</i>	<i>71</i>

POPIS SLIKA

<i>Slika 1: Prikaz pojedini krških oblika na vapnenačkom području [2];</i>	3
<i>Slika 2: Shema procesa topljenja kalcita u prirodnim uvjetima [3];</i>	7
<i>Slika 3: Srednje godišnje oborine na području Republike Hrvatske [3];</i>	8
<i>Slika 4: Prikaz geološke karte Republike Hrvatske [3];</i>	9
<i>Slika 5: Položaj sliva i izvora Rijeke Žrnovnice i Jadra [5];</i>	10
<i>Slika 6: Shematska hidrogeološka karta priljevnog područja izvora Jadra i Žrnovnice [4];</i>	11
<i>Slika 7: Nefelometar [7];</i>	14
<i>Slika 8: Dijelovi nefelometra [8];</i>	14
<i>Slika 9: Glavni dijelovi hidrograma otjecanja [9];</i>	18
<i>Slika 10: Tri slučaja dijeljenja hidrograma [9];</i>	19
<i>Slika 11. Shematski prikaz Hellmannova kišomjera [9];</i>	21
<i>Slika 12: Karakteristične vrijednosti godišnjih oborina za Dugopolje za razdoblje 2017.g. (izradio autor);</i>	22
<i>Slika 13: Karakteristične vrijednosti godišnjih oborina za Dugopolje za razdoblje 2018.g. (izradio autor);</i>	23
<i>Slika 14: Karakteristične vrijednosti godišnjih oborina za Dugopolje za razdoblje 2019.g. (izradio autor);</i>	23
<i>Slika 15: Karakteristične vrijednosti godišnjih oborina za Bisko za razdoblje 2017.g. (izradio autor);</i>	24
<i>Slika 16: Karakteristične vrijednosti godišnjih oborina za Bisko za razdoblje 2018.g. (izradio autor);</i>	24
<i>Slika 17: Karakteristične vrijednosti godišnjih oborina za Bisko za razdoblje 2019.g. (izradio autor);</i>	25
<i>Slika 18: Hidrogram otjecanja izvora Žrnovnice za 2017.g. (izradio autor);</i>	26
<i>Slika 19: Hidrogram otjecanja izvora Žrnovnice za 2018.g. (izradio autor);</i>	27
<i>Slika 20: Hidrogram otjecanja izvora Žrnovnice za 2019.g. (izradio autor);</i>	27
<i>Slika 21: Turbidograf izvora Žrnovnice za 2017.g. (izradio autor);</i>	28
<i>Slika 22: Turbidograf izvora Žrnovnice za 2018.g. (izradio autor);</i>	29
<i>Slika 23: Turbidograf izvora Žrnovnice za 2019.g. (izradio autor);</i>	29
<i>Slika 24: Povezanost varijabli [10];</i>	30
<i>Slika 25: Shematski prikaz regresijske i koleracijske analize dvodimenzionalne slučajne [10];</i>	31
<i>Slika 26: Geometrijski prikaz dvodimenzionalne slučajne varijable (X, Y) kada je riječ o linearnoj regresiji [10];</i>	32
<i>Slika 27: Koleracija srednjih dnevnih protoka (Žrnovnica) i oborina izmjerenih na meterološkoj postaji Dugopolje za razdoblje od 2017. - 2019.g. (izradio autor);</i>	33
<i>Slika 28: Koleracija srednjih dnevnih protoka (Žrnovnica) i oborina izmjerenih na meterološkoj postaji Bisko za razdoblje od 2017. - 2019.g. (izradio autor);</i>	34

<i>Slika 29: Koleracija srednje dnevne mutnoće (Žrnovnica) i oborina izmjerenih na meterološkoj postaji Dugopolje za razdoblje od 2017. - 2019.g. (izradio autor);</i>	35
<i>Slika 30: Koleracija srednje dnevne mutnoće (Žrnovnica) i oborina izmjerenih na meterološkoj postaji Dugopolje za razdoblje od 2017. - 2019.g. (izradio autor);</i>	35
<i>Slika 31: Koleracija srednje dnevne mutnoće i protoka izvora Žrnovnica za analizirano razdoblje od 2017. - 2019.g. (izradio autor);</i>	36
<i>Slika 32: Odnos C - Q, prikaz petlje sa jednom vrijednošću (linearna) [11];</i>	37
<i>Slika 33: Odnos C - Q, prikaz petlje u smjeru kazaljke na satu [11];</i>	37
<i>Slika 34: Odnos C - Q, prikaz petlje u smjeru suprotno od kazaljke na satu [11];</i>	38
<i>Slika 35: Odnos C - Q, prikaz linija s jednom vrijednošću plus petlja [11];</i>	38
<i>Slika 36: Odnos C - Q, prikaz petlje u obliku osmice [11];</i>	38
<i>Slika 37: Vremenski niz satnog protoka (Q) i mutnoće (T) izvora Žrnovnice, te dnevne količine oborina na meteorološkoj postaji Dugopolje (P) za godinu 2017. Crvena linija predstavlja dopuštene vrijednosti mutnoće (T) od 4 NTU. (izradio autor);</i>	41
<i>Slika 38: Vremenski niz satnog protoka (Q) i mutnoće (T) izvora Žrnovnice, te dnevne količine oborina na meteorološkoj postaji Dugopolje (P) za godinu 2018. Crvena linija predstavlja dopuštene vrijednosti mutnoće (T) od 4 NTU. (izradio autor);</i>	42
<i>Slika 39: Vremenski niz satnog protoka (Q) i mutnoće (T) izvora Žrnovnice, te dnevne količine oborina na meteorološkoj postaji Dugopolje (P) za godinu 2019. Crvena linija predstavlja dopuštene vrijednosti mutnoće (T) od 4 NTU. (izradio autor);</i>	43
<i>Slika 40: Vremenski niz satnog protoka (Q) i mutnoće (T) izvora Žrnovnice, te dnevne količine oborina na meteorološkoj postaji Bisko (P) za godinu 2017. Crvena linija predstavlja dopuštene vrijednosti mutnoće (T) od 4 NTU. (izradio autor);</i>	44
<i>Slika 41: Vremenski niz satnog protoka (Q) i mutnoće (T) izvora Žrnovnice, te dnevne količine oborina na meteorološkoj postaji Bisko (P) za godinu 2018. Crvena linija predstavlja dopuštene vrijednosti mutnoće (T) od 4 NTU. (izradio autor);</i>	45
<i>Slika 42: Vremenski niz satnog protoka (Q) i mutnoće (T) izvora Žrnovnice, te dnevne količine oborina na meteorološkoj postaji Bisko (P) za godinu 2019. Crvena linija predstavlja dopuštene vrijednosti mutnoće (T) od 4 NTU. (izradio autor);</i>	46
<i>Slika 43: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2017., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);</i>	55
<i>Slika 44: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za poddogađaj 1 događaja 1. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);</i>	55
<i>Slika 45: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za poddogađaj 2 događaja 1. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);</i>	56

<i>Slika 46: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2017., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);</i>	56
<i>Slika 47: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za poddogađaj 1 događaja 2. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);</i>	57
<i>Slika 48: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za poddogađaj 2 događaja 2. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);</i>	57
<i>Slika 49: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2017., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);</i>	58
<i>Slika 50: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za događaj 3. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);</i>	58
<i>Slika 51: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2017., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);</i>	59
<i>Slika 52: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za poddogađaj 1 događaja 4. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);</i>	59
<i>Slika 53: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za poddogađaj 2 događaja 4. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);</i>	60
<i>Slika 54: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za poddogađaj 3 događaja 4. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);</i>	60
<i>Slika 55: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2017., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);</i>	61
<i>Slika 56: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za događaja 5. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);</i>	61
<i>Slika 57: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2018., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);</i>	62
<i>Slika 58: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za događaj 6. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);</i>	62
<i>Slika 59: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2018., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);</i>	63
<i>Slika 60: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za poddogađaj 1 događaja 7. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);</i>	63
<i>Slika 61: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za poddogađaj 2 događaja 7. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);</i>	64

<i>Slika 62: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2018., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);</i>	<i>64</i>
<i>Slika 63: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za događaj 8. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);.....</i>	<i>65</i>
<i>Slika 64: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2019., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);</i>	<i>65</i>
<i>Slika 65: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za događaj 9. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);.....</i>	<i>66</i>
<i>Slika 66: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2019., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);</i>	<i>67</i>
<i>Slika 67: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za događaj 10. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);.....</i>	<i>67</i>
<i>Slika 68: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2019., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);</i>	<i>68</i>
<i>Slika 69: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za događaj 11. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);.....</i>	<i>68</i>
<i>Slika 70: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2019., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);</i>	<i>69</i>
<i>Slika 71: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za događaj 12.. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);.....</i>	<i>69</i>

1. UVOD

Unutar ovog diplomskog rada provesti će se istraživanje na području krškog sliva izvora Žrnovnica u Hrvatskoj. Područje izvora rijeke Žrnovnice sastavljeno je od vapnenca, dolomita i laporovitih vapnenaca mezozojske. Naslage u slivu su fliške, klastiti i paleocenski lapori. Izvor Žrnovnice nalazi se u podnožju planina Mosor (1300 m n. m.) i Kozjak (600 m n. m.). Izvorišta Žrnovnice imaju više mjesta istjecanja tako da se nalaze od 77 m n. m. do 90 m n. m. Prosječni srednji protok izvora Žrnovnice u razdoblju od 1995. do 2005. iznosi $1,9 \text{ m}^3/\text{s}$, a maksimalni protok koji je izmjeren iznosi $17,0 \text{ m}^3/\text{s}$ dok minimalni izmjereni protok iznosio je $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$

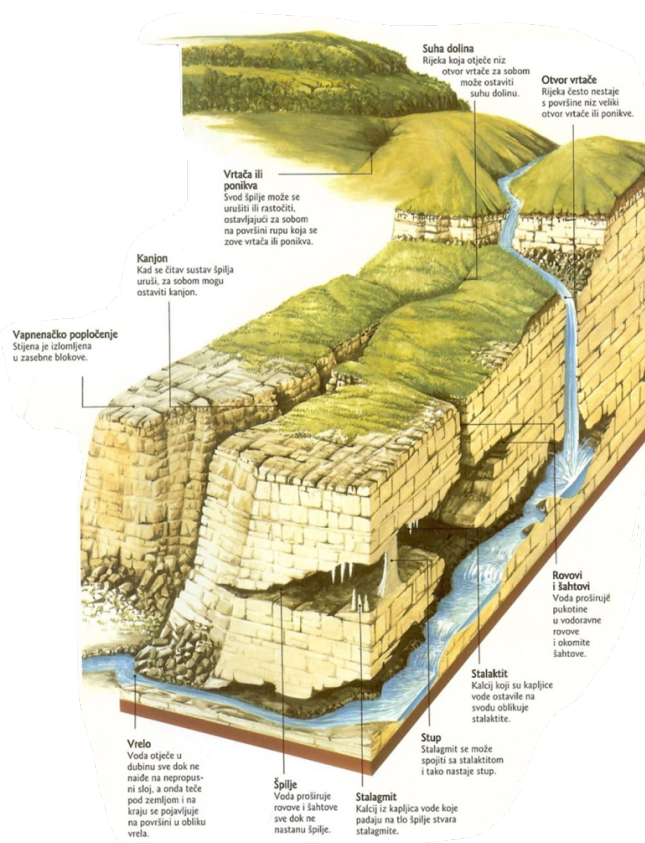
U prvom dijelu diplomskog rada fokus će biti na hidrološkim, hidrogeološkim, obilježjima sliva i mutnoći na krškom izvoru. Mutnoća je od velike važnosti iz razloga što su krški vodonosnici skloni raznim vrstama onečišćenja iz niza različitih izvora. Zbog brzog punjenja i velikih brzina transporta povezanih s krškim vodonosnicima, krški izvori obično pokazuju visoku dinamiku istjecanja, a kvaliteta vode često se pogoršava vrlo brzo nakon olujnih događaja. Uz prethodno navedene parametre koji će se obraditi unutar prvog dijela rada izvršiti će se i osnovna statistička analiza. Za izradu diplomskog rada potrebne podatke o protoku i oborinama osigurao je Hrvatski hidrometeorološki zavod (Zagreb, Hrvatska) za meteorološke postaje Dugopolje i Bisko, a za mutnoću podatke je osigurao Vodovod i kanalizacija d.o.o. Split (Split, Hrvatska). Analizirano vremensko razdoblje odnosi se od 01.01.2017. do 31.12.2019. godine. Shodno dobivenim satnim podacima o protoku, oborinama i mutnoći izračunati će se dnevne vrijednosti za svaki parametar. Dobivene dnevne vrijednosti protoka i mutnoće odrediti će se osrednjavanjem satnih vrijednosti, a dnevne vrijednosti oborina sumiranjem satnih. Dnevne vrijednosti podataka koristiti će se kao ulazni podatak u daljnjem proračunu.

U drugom dijelu rada na osnovu proračuna osnovnih statističkih podataka izvršiti će se odnos protoka i mutnoće metodom Williams u razdobljima kada mutnoća krškog izvora Žrnovnica prelazi dopuštenu normu za piće vode od 4 NTU. Williams - ova metoda prilagođena je zamjenom protoka rijeke s protokom krškog izvora, a

koncentracija sedimenata s prekomjernom mutnoćom. Identificirati će se, klasificirati i hidrološki objasniti glavne vrste petlji histereze.

2. OPĆENITO O KRŠU

Pojam krš predstavlja terene složenih geoloških obilježja i specifičnih hidrogeoloških karakteristika. Krški tereni sastoje se od topljivih stijena, uključujući vapnenac, dolomit, gips, halit i konglomerate. Kao rezultat topivosti stijena i raznih geoloških procesa koji su dali jedinstvena, specifična obilježja terenu definiranom ovim pojmom. Krš često karakteriziraju vrtače, špilje, ponori, kaverne, estavele, povremeni izvori, podmorski izvori, izgubljene rijeke, suhe riječne doline, povremeno poplavljena polja, podzemni riječni sustavi, denudirani kamenjar brda, krške ravnice i urušavanja [1].



Slika 1: Prikaz pojedini krških oblika na vapnenačkom području [2];

Teško je dati vrlo konciznu definiciju riječi krš jer je on rezultat brojnih procesa koji se odvijaju u različitim topivim stijenama i u različitim geološkim i klimatskim uvjetima. Pojam krast potječe od geografskog naziva sjeverozapadne regije Slovenije u blizini Talijanske granice. Prije više od 700 godina ljudi su na ovim prostorima koristili Slavensku riječ krast i Talijansku riječ carso. Oba izraza su indoeuropskog podrijetla,

dolaze od riječi kar, što znači stijena. Germanizacijom ovih riječi nastao je pojam karst odnosno krš. Pojam karst prihvaćen je kao međunarodni pojam. Pojam karstifikacije označava mnoštvo geoloških procesa koji razaraju topljive stijene, tvoreći tako jedinstvene morfološke značajke i specifične vrste poroznosti, odnosno specifičan hidrogeološki okoliš [1].

U krškim regijama sa složenim geološkim okruženjima prikladno je identificirati krške značajke koje dijele regionalne krške postavke na tipove i podtipove krša sa zajedničkim karakteristikama. Postoji niz parametara koji se mogu koristiti kako bi ova podjela bila izvediva. Različiti autori klasificiraju krš prema njegovim morfološkim značajkama, strukturnim čimbenicima, geografskom položaju i okolišu taloženja karbonatnih stijena, a zatim nizu drugih čimbenika. Budući da se niti jedna od ovih klasifikacija ne temelji na brojčanim vrijednostima ili parametrima koji se mogu kvantificirati ili izraziti točnim zakonima, bilo koja od ovih klasifikacija krša može se ocijeniti kao prihvatljiva ili neprihvatljiva, ovisno o individualnim preferencijama ili aspektima koje naglašava sustav klasifikacije svakog pojedinca. Godine 1926. Cvijić je dao jednu od prvih kvalifikacija krša. Korištenjem morfoloških značajki kao temelj podijelio je krš na tri tipa: potpuni krš, nepotpuni krš i prijelazni tip [1].

Potpuni krš razvija se u područjima koja se u cijelosti sastoje od topljivih karbonatnih stijena. Karakterizira ga postojanje površinskih i podzemnih krških fenomena, što omogućuje daljnji razvoj i stvaranje novih krških fenomena. Prostrano, golo i kamenito zemljište, bez obradivih površina sa ili bez prisustva vegetacije, daje vrlo specifičan izgled potpunih krških područja. Dinarski krš je tipičan primjer potpunog krša.

Nepotpuni krš ima mnogo svojstva nekrških područja. Karbonatne stijene bile su daleko manje podvrgnute procesu karstifikacije. Zbog toga su krški fenomeni rijetki, a dubina okršavanja ograničena. Karbonatni sedimenti prekriveni su obradivim tlom i vegetacijom. Gole, stjenovite kopnene površine praktički nema. Rijetke su suhe doline s nizovima vrtača, a krških polja nema. Ovaj tip krša često se naziva i pokriveni krš. Krški tereni u Belgiji, sjevernoj Francuskoj i Norveškoj pripadaju ovom tipu krša.

Prijelazni tip krša ima stupanj karstifikacije između potpunog i nepotpunog krša. Uglavnom se nalazi u vapnencima koji su izolirani nepropusnim, manje topivim

sedimentima. Podzemni krški oblici su dobro razvijeni, ali nedostaju krška polja. Tipična područja ovog tipa krša su planine Jura i središnje područje Balkanskog poluotoka. Uvelike je prisutan u sjevernoj Africi, Australiji, južnoj Kini, Francuskoj, SAD - u i mnogim drugim mjestima.

Godine 1977. M. Herak je dao najdetaljniju raščlambu krša. M. Herak je na temelju tektogeneze razlikovao dva tipa krša epikontinentalni i geosinklinalni.

Epikontinentalni tip krša raščlanio je u četiri skupine, a to su: Tabularni krš, Borani krš, Bazenski krš i Duboki krš.

Tabularni krš razvijen je približno horizontalno koji leže na nepropusnoj podini. Krški oblici koji ga čine su najčešće špilje i špiljski sustavi.

Borani krš zastupljen na terenima sa makroborama bez navlaka. Bore utječu na napredovanje okršavanja i smjera tečenja podzemnih voda.

Bazenski krš zastupljen je na područjima gdje se javljaju depresije s čestim izmjenama karbonatnih i klastičnih stijena. Kod takvog tipa krša podzemna voda u većini slučajeva je pod tlakom.

Duboki krš javlja se u karbonatnim naslagama iznimne debljine, a podinu mu čine neokršene stijene.

Geosinklinalni krš razvija se u izrazito naboranim i izlomljenim ili rasjednim karbonatnim stijenama. Uz povoljne klimatske uvjete, područja sinklinalne bore izvrsna su sredina za maksimalan razvoj procesa okršavanja. Klasično područje geosinklinalnog krša je područje Dinarida. M. Herak razvrstao je geosinklinalni krš u četiri skupine, a čine ga: Lećasti krš, Borani krš, Disecirani krš i Akumulirani krš.

Lećasti krš razvija se u karbonatnim lećama kod nekarbonatnih orogenskih struktura.

Borani krš razvija se u sredinama zajedno sa karbonatnim antiformama i klastičnim sinformama. Antiforme pogodne su za stvaranje vode temeljnice, a sinformne imaju značajnu ulogu usporivača.

Disecirani krš zastupljen za terene gdje stijenska masa je tektonski dezintegrirana. Doline koje su rasječene u nepropusnoj podlozi pogodi su za formiranje tokova.

Akumulirani krš značajan je za debele karbonatne naslage koje su izložene velikom djelovanju tektonike. Dubina nastalog okršavanja nije poznata, dok se na površini terena javljaju svi krški oblici [1].

2.1 Proces karstifikacije

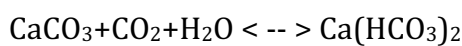
Pojam krša izravno se povezuje s karbonatnim stijenama, točnije vapnencima i dolomitima, iako se karstifikacija događa unutar tvorevina gipsa i soli. Vapnenac je najvažnija stijena u kojoj se odvija karstifikacija, podložnost dolomita karstificiranju ovisi o debljini i položaju unutar geološke strukture. Vapnenci su najreprezentativniji od svih karbonatnih stijena. Većim dijelom se sastoje od minerala kalcita (CaCO_3 , kalcijev karbonat). Vrlo rijetko se vapnenci sastoje samo od čistog kalcita, najčešće sadrže određene postotke gline, bituinoznih tvari, magnezija, silicija, pijeska i drugih manjih komponenti. Vapnenci se mogu klasificirati kao škriljasti, bitumenski, dolomitni, silikatni, pjeskoviti itd. Topljivost vapnenaca u karstifikaciji raste s njihovom čistoćom. Dolomiti su karbonatne stijene sastavljene od minerala dolomita. Mineral dolomita je dvojna karbonatna sol kalcija i magnezija. Njegov kemijski sastav može se izraziti kao $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ i sastoji se od 30% CaO, 22% MgO i 48% CO_2 . Evaporitne stijene (gips i sol) više se tope u odnosu na obične stijene. Proces karstifikacije identičan je onima koji se nalaze u karbonatnim stijenama i oblikuju iste tipove krških obilježja koji se obično nalaze u vapnencima i dolomitima. Formiranje kaverni i kanala izravan je rezultat kemijskog otapanja, koje u određenoj fazi procesa može biti podržano erozivnim djelovanjem vode. Kako se turbulencija u vodi povećava, povećava se i količina otopljene tvari [1].

Temperatura je također važan čimbenik koji kontrolira proces topljenja vapnenca. Castany je utvrdio da 1l vode na 0°C može otopiti četiri do pet puta više vapnenca nego na 30°C i šest puta više nego voda na 40°C . Nakon detaljnih istraživanja zaključeno je da je karstifikacija brža u hladnim klimama s više snježnih oborina nego u regijama s toplim vremenom. Prema Corbelu, stopa erozije uključujući mehaničku i

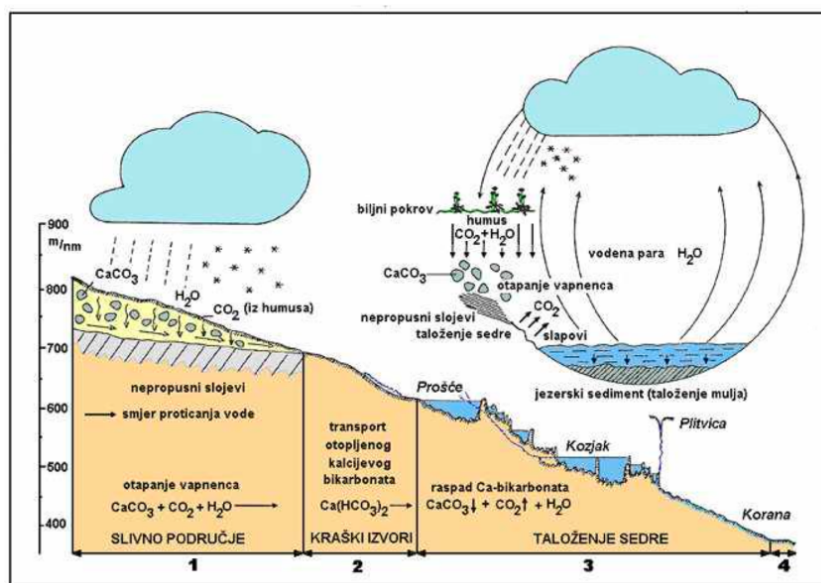
kemijsku u niskim planinama s 1000 do 1600 mm padalina i hladnom klimom iznosi 160 mm na 1000 godina. Tijekom istog razdoblja u vrućoj klimi erozija je 10 puta manja (samo 16 mm) [1].

Osim navedenog presudnu važnost u okršavanju ima pH vrijednost i prisutna biljna vegetacija. Vrijednost pH mora biti iznad 8 kako bi moglo doći do taloženja, a biljna vegetacija prilikom procesa fotosinteze uzima otopljeni CO₂ iz vode, čime utječe na prirodnu ravnotežu karbonata.

U Hrvatskoj krš nastaje izrazito u karbonatnim stijenama. Kalcit i dolomit su minerali koji čine glavni sastav karbonatnih stijena. Postotak kalcita u vapnencima i dolomita u dolomitima kreće se u rasponu od 85% do 95%. Kalcit i dolomit podložni su trošenju pod utjecajem vode. To se posebno odnosi na kalcit, pri čemu vapnenci spadaju u skupinu stijena koji su najskloniji okršavanju. Udio kalcita u stijenskom sastavu značajno ovisi o intenzitetu okršavanja. Proces trošenja kalcita odvija se na način da kalcit u dodiru sa ugljičnom kiselinom u vodi stvara sljedeću reakciju:



Reakcija se također može odvijati obrnutim redoslijedom gdje se kalcijev karbonat izlučuje pri određenim uvjetima i shodno tome nastaju tvari sedra i sigovina. [3]

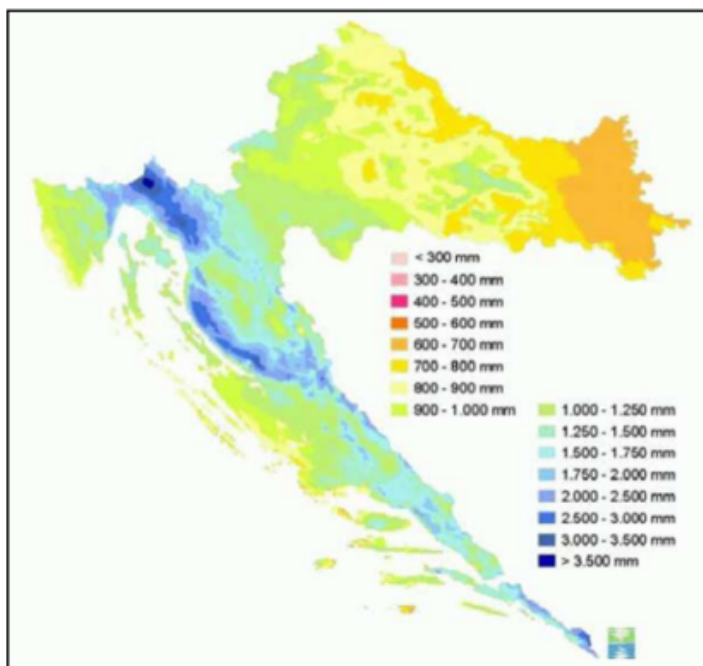


Slika 2: Shema procesa topljenja kalcita u prirodnim uvjetima [3];

Shodno shemi kemijsko okršavanje karbonatnih stijena odvija se prema fazama: stvaranje ugljične kiseline nastale otapanjem CO₂ iz atmosfere u obliku oborinskih voda;

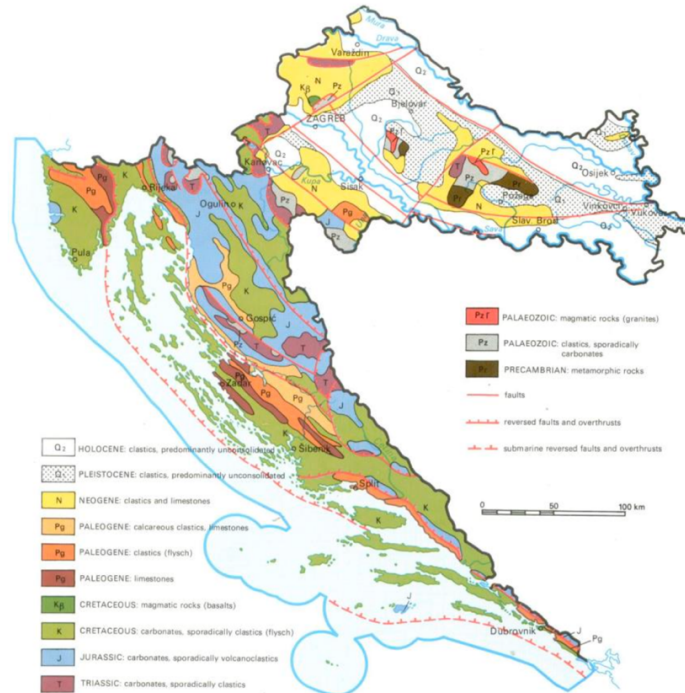
- infiltracija i disocijacija
- prodiranje H iona do karbonatne stijene;
- na površini kristala dolazi do reakcije vodikovih i karbonatnih iona i dolazi do stvaranja bikarbonatnih iona koji prelaze u granični sloj;
- difuzijom iona bikarbonata iz graničnog sloja dolazi do ponovnog vraćanja u vodenu otopinu;
- na površini kristala kalcita dolazi do oslobađanja kalcijevih iona;
- difuzijom kalcijevi ioni prolaze kroz granični sloj u vodenu otopinu.

Kada govorimo općenito o otapanju vapnenca potrebna nam je minimalna količina pale oborine. Upravo iz toga krški oblici ne mogu se razviti na područjima gdje je manje od 250 - 300 mm/god oborina. Najveće okršavanje se odvija na terenima gdje su pale velike količine oborina i gdje je velika izmjena sezonskih klima iz izrazito vlažnih razdoblja u izrazito sušna razdoblja.



Slika 3: Srednje godišnje oborine na području Republike Hrvatske [3];

Kada je riječ o Republici Hrvatskoj, najviše okršljena područja su upravo ona gdje su pale velike količine oborina i područja koja su izgrađena od karbonatnih stijena. [3] Stijene koje su podložne okršavanju čine 25% kopnenog dijela zemlje i gotovo 50% kopnene površine Republike Hrvatske [3].



Slika 4: Prikaz geološke karte Republike Hrvatske [3];

3. HIDROLOŠKE KARAKTERISTIKE SLIVA ŽRNOVNICE

Slivno područje rijeke Žrnovnice spada u jedno od većih vodovodnih sustava Dinarida. Površina slivnog područja Jadra i Žrnovnice u dosadašnjim istraživanjima zajedno zauzimaju oko 250 - 500 km².



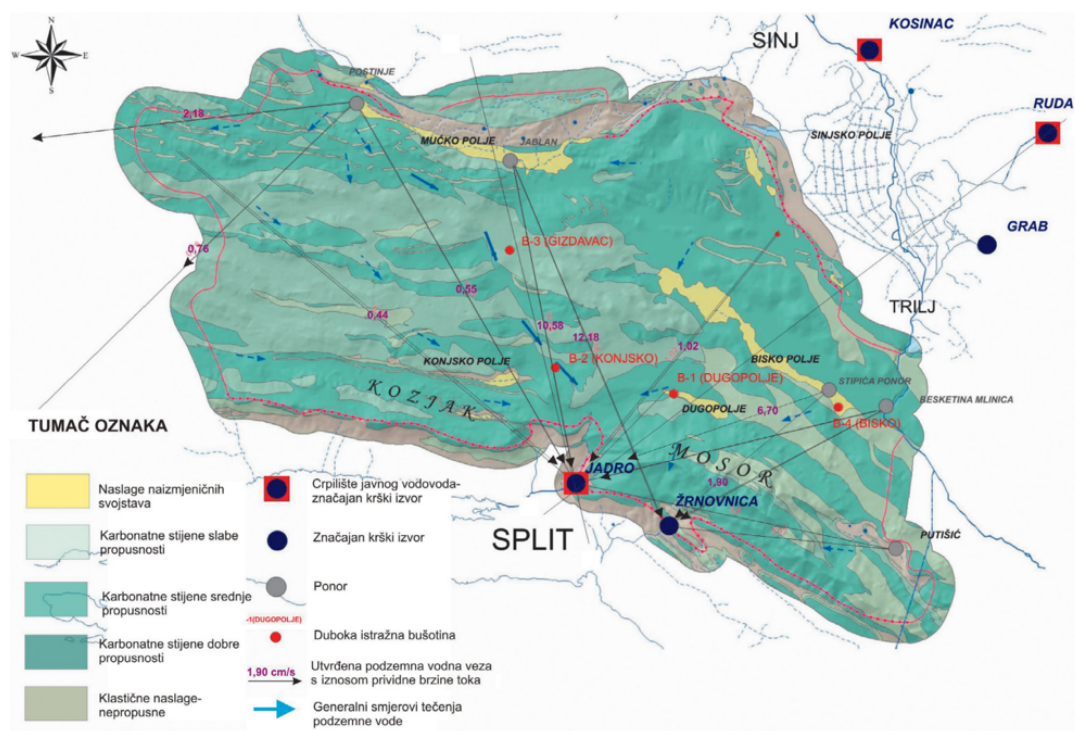
Slika 5: Položaj sliva i izvora Rijeke Žrnovnice i Jadra [5];

Prirodni uvjeti istjecanja vezani za izvor Žrnovnice izmijenili su se izgradnjom akumulacija na rijeci Cetini. Veliki utjecaj ima akumulacija Peruča, Prančevići, Đale, gdje nam je vidljivo da je izvor rijeke Žrnovnice prije izgradnje za vrijeme hidroloških minimuma presušivao, a nakon izgradnje došlo je do povećanja minimalnih protoka za razdoblje kad prevladava suša.

Izvor Žrnovnice od izvora Jadro udaljen je zračnom linijom 4200 m [3]. Izvorište Žrnovnice sačinjeno je od nekoliko malih izvora, oni se javljaju na većem području visinskog raspona od 77,0 - 90,0 m n.m. Na izvorištu Žrnovnice uočeno je 6 privremenih i 3 stalna krška vrela. Izvorišne vode koriste se djelomično za vodoopskrbu i za navodnjavanje. Rijeka Žrnovnica sadrži i nekoliko bujičnih pritoka koji su većim dijelom godine suhi. Dužina Žrnovnice od njezinog ušća do mora iznosi 4,5 km, njezini protoci variraju o količini oborina palih na sliv. Prosječni srednji protok izvora Žrnovnice u razdoblju od 1995. - 2005. iznosi 1,9 m³/s. Maksimalni protok koji je izmjeren iznosi 17.0 m³/s, a minimalni izmjereni protok iznosio je 0,31 m³/s [4].

4. HIDROGEOLOŠKA I GEOLOŠKA OBILJEŽJA SLIVA

Područje izvora rijeke Žrnovnice sastavljeno je od vapnenca, dolomita i laporovitih vapnenaca mezozojske. Naslage u slivu su fliške, klastiti i paleocenski lapori. Izvor Žrnovnice nalazi se u podnožju planina Mosor (1300 m n. m.) i Kozjak (600 m n. m.). Izvorišta Žrnovnice imaju više mjesta istjecanja tako da se nalaze od 77 - 90 m n. m. Morfološki uzdignuta područja reljefa sastavljeni su od karbonatnih stijena odnosno od vapnenca i dolomita u kojima su zastupljeni većinski elementi krške morfologije. Elemente krške morfologije čine ponori, jame, spilje, vrtače, suhe doline, škrape itd. Vapnenci mezozoika i eocena su dobro propusne stijene koje imaju ulogu vodonosnika. Ukoliko su zastupljee dolomitne i laporovite komponente dolazi do smanjenja propusnosti vapnenca u srednje propusne do slabo propusne. Naslage od eocenskog fliša, klastiti trijasa i paleocenski lapor spadaju u nepropusne stijene, stoga imaju funkciju hidrogeoloških barijera. Hidrološke barijere koje su potpune one imaju funkciju usmjerenja tokova podzemne vode. Područje sliva Žrnovnice karakteriziran je tektonskom aktivnošću odnosno stalnom pojavom potresa. Tektonska aktivnost uzrokuje promjene strukturnih odnosa [4].



Slika 6: Shematska hidrogeološka karta priljevnog područja izvora Jadra i Žrnovnice [4];

5. MUTNOĆA NA KRŠKIM IZVORIMA

5.1. Općenito o mutnoći

Poznato je da su krški vodonosnici skloni raznim vrstama onečišćenja iz niza različitih izvora. Zbog brzog punjenja i velikih brzina transporta povezanih s krškim vodonosnicima, krški izvori obično pokazuju visoku dinamiku istjecanja, a kvaliteta vode često se pogoršava vrlo brzo nakon olujnih događaja zbog prisutnosti kontaminanata kao što su patogeni, teški metali ili pesticidi. Često se navodi da mutnoća varira u odnosu na koncentraciju kontaminanata u krškoj izvorskoj vodi, te se stoga predlaže njezina uporaba za otkrivanje razdoblja kontaminacije. Sustavan odnos između tako lako mjerljivog parametra i zagađivača bio bi koristan za održivo upravljanje izvorima sirove vode u krškim vodonosnicima, posebno u zemljama gdje je voda rijetka i ako se voda ne može lako odbaciti.

Krški se vodonosnici uvelike koriste diljem svijeta kao izvori pitke vode, a voda se često crpi iz krških izvora. U nekim krškim izvorima utvrđeno je da je mutnoća u dobroj korelaciji s prisutnošću onečišćenja. Mutnoća obično uključuje složenu mješavinu različitih tipova čestica iz različitih izvora, a razlikovanje podrijetla različitih čestica nije jednostavno međutim, vrlo je relevantan za otkrivanje potencijalne kontaminacije. Brojna su istraživanja posljedično izvijestila o nejasnoćama u odnosu između ispuštanja mutnoće vode i onečišćenja krških izvora.

Brojni autori predložili su korištenje mutnoće za označavanje prisutnosti kontaminanata (u mnogim slučajevima bakterija) u vodi krških izvora. Taj se parametar ponekad bilježi jednostavno kao osnovni parametar, bez namjere da se koristi kao pokazatelj kontaminacije. Većina pregledanih istraživanja odnosila se na procjenu promjena kvalitete vode i potencijala onečišćenja krških izvora, te na razumijevanje načina na koji je prijenos onečišćujućih tvari povezan s protokom krških izvora. Neka od tih istraživanja bilježe izvrsne inverzne korelacije između mutnoće i kakvoće krške izvorske vode. Drugi su istraživači izvijestili o nejasnoćama u odnosu između mutnoće i koncentracija onečišćenja, ili čak o nepostojanju sustavnog odnosa.

Većina tih istraživanja temeljila se na terenskim programima dovršenim tijekom i nakon olujnih događaja, a ne na eksperimentalnim terenskim istraživanjima [6].

5.2. Mutnoća i bistrina vode

Mutnoća fluida definira se kao smanjena prozirnost otopine u kojoj su prisutne neke otopljene supstance koje omogućuju da prolazna svjetlost bude reflektirana i smanjena umjesto da bude prenesena u ravnu liniju. (Ziegler, 2002.).

Čimbenici koji djeluju na sam proces mutnoće vode su:

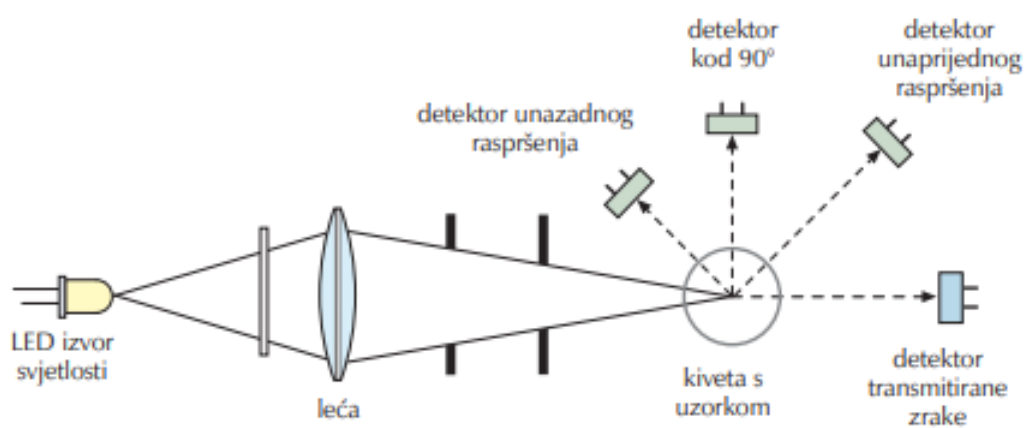
- razina koncentracije čestica koje se nalaze u vodi;
- oblik i promjer čestica;
- valna duljina prisutnog zračenja.

Mutnoća vode javlja se kada suspendirane čestice pijeska, gline, raznih mikroskopskih organizama budu pokupljeni prilikom prolaska vode kroz sliv. Voda pri prolasku kroz sliv kupi površinski i podzemni dio suspendiranih čestica. Važnu ulogu pri nastanku mutnoće vode u krškim izvorima ima cirkulacija vode.

Instrument kojim se mjeri zastupljenost mutnoće naziva se nefelometar. Nefelometar nam služi za mjerenje intenziteta raspršenosti zračenja na česticama. Uglavnom se mjeri pod kutom od 90° na smjer inicijalne zrake svjetlosti. Ukoliko je intenzitet raspršenosti i opadanja svjetla veći shodno tome je i mutnoća vode veća [6].



Slika 7: Nefelometar [7];



Slika 8: Dijelovi nefelometra [8];

Postoje razne mjerne jedinice koje se koriste za mutnoću. Najčešće korištena mjerna jedinica je NTU (engleski naziv „Nephelometric Turbidity Unit“ – hrvatski prijevod „Nefelometarska jedinica mutnoće“). Prema kanadskim propisima imamo definiran indeks mutnoće. Ako je $NTU < 1$ indeks mutnoće je dobar. Za slučaj kada nam se NTU kreće u rasponu od 1 do 5 tada se smatra pogodnim, a kada nam je $NTU > 5$ tada ga tretiramo kao loš. Prema hrvatskim propisima nešto je malo drugačije. Ako je $NTU > 4$ tada nam je indeks mutnoće loš. Ukoliko nam se NTU kreće u rasponu od 1 do 4 tada se indeks smatra pogodnim, a ako je $NTU < 1$ tada nam je indeks mutnoće dobar [6].

Bistrina vode je mjera koliko duboko zrake svjetlosti prodiru kroz nju. Što nam je veće prodiranje svjetlosti to nam je voda bistrija. Bistrina vode je ključan čimbenik koji je vezan za proces fotosinteze. Prodor svjetlosti kroz vodu utječe na ekološke segmente vodnih sustava, naročito i na one koji su vezane s rekreacijom i drugim korištenjem u turističke svrhe. Prodiranje svjetlosti biti će dublje u mirnijoj vodi nego u turbulentnoj. Iskazana vrijednost bistrine vode može se izraziti milimetrima, centimetrima i metrima. Ukoliko su vrijednosti ispod 1 m to nam ukazuje na visoku koncentraciju suspendiranih čestica. Jako čista jezera koja su nisko produktivna mogu doseći prozirnost od 30 - 40 m. Vizualni izgled bistrine vode utječe na ponašanje organizama koji se nalaze u vodi. Kako vizualni izgled bistrine vode utječe na organizme tako utječe i na čovjekovu predodžbu kakvoće vode. Mutnoća vode se često, ali ne i uvijek uzima kao mjera bistrine vode [6].

5.3. Pronos suspendiranog nanosa

Suspendirane čestice imaju važnu ulogu kada je riječ o mutnoći vode, stoga fenomen mutnoće vode s količinama pronosa suspendiranog nanosa možemo povezati. Interakcija između mutnoće koja je izražena u NTU koristi se kao efikasan, ali ne i toliko pouzdan postupak za utvrđivanje razine koncentracije suspendiranog nanosa u vodotocima. Razni autori naglašavaju da nema dovoljno znanstvenih objašnjenja kada je riječ o odnosu mutnoće i bistrine vode s količinom prenošenja suspendiranog nanosa. Napominju da još uvijek nije točno određen odnos između mutnoće, bistrine i suspendiranog nanosa. Odnos razine koncentracije mutnoće i suspendiranih nanosa postoji, međutim ona se mijenja po funkciji vremena i na nju utječu razni drugih čimbenici [6].

Čimbenici koji utječu su:

- veličina protoka;
- vrijeme proteklo od pojave oborina, jačina oborina;
- odeđeni dio sliva koji je zahvaćen oborinama;
- geološka i hidrogeološka svojstva sliva;
- vegetacijska i pedološka svojstva tla;
- agrotehničke mjere na slivu;
- namjena zemljišta na slivu;
- sezona u godini;
- klimatski faktori;

6. OSNOVNA STATISTIČKA ANALIZA PODATAKA

Izradom ovog rada prikupljeni su satni podaci o oborinama, protoku i mutnoći. Temeljem dobivenih satnih podataka dobivene su dnevne vrijednosti svakog pojedinog parametra, stoga su one ulazna veličina za daljnji proračun. Dnevne vrijednosti protoka i mutnoće dobiveni su srednjom vrijednošću satnih vrijednosti, a dnevne vrijednosti za oborine dobivene su sumiranjem satnih podataka. Osim dnevnih vrijednosti mutnoća izrađeni su tabelarni prikazi sa osnovnim statističkim podacima (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija). Analiza je provedena za izvor rijeke Žrnovnice na osnovu dobivenih vrijednosti protoka, mutnoće i oborina prikupljenih na meteorološkim postajama Dugopolje i Bisko za promatrano razdoblje od 01.siječnja 2017. godine do 31. prosinca 2019. godine.

6.1. Protok - općenito

Protok je naziv za količinu vode koja prolazi kroz poprečni presjek vodotoka i iskazana je u jedinici vremena. Protok možemo razlikovati prema odabranoj jedinici vremena na:

- sekundni protok;
- minutni protok;
- satni protok i
- dnevni protok.

Ukoliko su nam veće količine vode onda koristimo mjernu jedinicu m^3/s , a za manje količine koristimo l/s .

Hidrogram je prikaz protoka vode u odnosu na vrijeme. Pokazuje nam količine vode koja je otekla vodotokom prije, za vrijeme kiše i poslije kiše. Sastoji se od četiri glavne komponente i one ovise o uvjetima otjecanja na slivu.

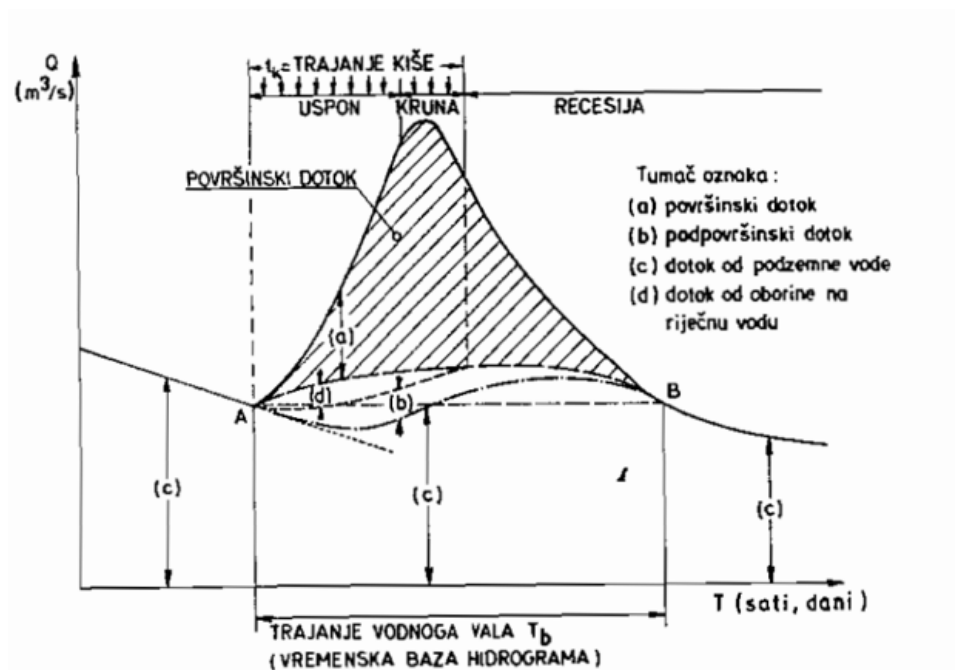
Četiri glavne komponente hidrograma su:

- površinski ili izravni dotok;
- međudotok ili potpovršinski;
- podzemni i
- oborina koja je pala na korito vodotoka.

Hidrogram se sastoji od osnovnih elemenata:

- uspon;
- kruna i
- recesija.

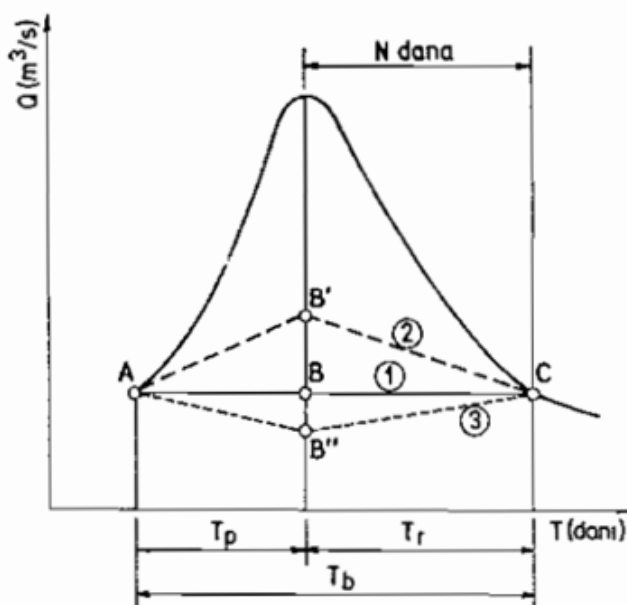
Na oblik hidrograma ovisi trajanje kiše, mjesto zahvaćenosti sliva kišom, izmjene intenziteta kiše i oblik sliva [9].



Slika 9: Glavni dijelovi hidrograma otjecanja [9];

Vremenska baza hidrograma T_b je vrijeme od početka gdje nam je hidrogram krenuo rasti do vremena kada površinsko otjecanje bude skoro jednako nuli. Vrijeme uzdizanja vodnog vala T_p je vrijeme početka dotoka iz oborine do maksimalnog protoka

vodnog vala. Vrijeme recesije (opadanje) T_r je vrijeme od maksimalnog protoka vodnog vala do samog kraja tog istog vala [9].



- ① PRAVOCRITNO DIJELJENJE BAZNOGA I IZRAVNOGA DOTOKA
- ② JAKI DOTOK IZ PODZEMLJA
- ③ IZRAVNI DOTOK PRIJE BAZNOGA

Slika 10: Tri slučaja dijeljenja hidrograma [9];

6.2. Oborina - općenito

Oborina ili padalina nastala kondenzacijom vodene pare koja pada iz oblaka ili se iz zraka taloži na tlo. Oborina ili padalina može biti u tekućem ili čvrstom stanju.

Oborine možemo podijeliti na horizontalne i vertikalne. Horizontalne oborine pojavljuju se u obliku mraza, magle, rose i inja. Horizontalne oborine nisu nam od značaja za otjecanje vode u vodotocima, ali u nekim određenim trenucima mogu nam biti značajne za vodoopskrbu. Vertikalne oborine one se javljaju u obliku kiše, tuče i snijega. Jako zanimljiva nam je sitna jednolika kiša koja ima promjer do 0,5 mm. Brzina padanja takvih kiša je manja od 0,7 m/s. Ukoliko takva kiša dugo traje može utjecati na otjecanje.

Za otjecanje vode bitna nam je kiša koja ima promjer kapi veći od 0,5 mm. Prema intenzitetu takvu kišu možemo podijeliti u tri vrste:

- slaba kiša - tu nam se javljaju satni intenzitet do 2,5 mm,
- umjerena kiša - intenzitet se kreće od 2,5 - 8,0 mm/h
- jaka kiša - intenzitet koji je preko 8,0 mm/h

Oborine možemo podijeliti u tri tipa:

Ciklonske oborine - nastaju kada dođe do jakih vrtložnih strujanja u atmosferi. Jako velikog su intenziteta i olujnog su karaktera.

Konvektivne oborine - nastaju kada topli zrak koji je bogat vlagom podigne iznad zemlje. Kada dođe do procesa hlađenja, dolazi do brze kondenzacije i samim tim dolazi do stvaranja oborina. Glavni pokretač ovakvih oborina je radijacija Sunca i reradijacija sa Zemlje. Intenzitet im može biti veći od ciklonskih.

Orografske oborine - nastaju kada se toplinski zrak podiže uz planinske zapreke. Uvijek su jače na ulaznoj strani planine nego na stražnjoj.

Mjerenje oborina:

Količina oborina koja padne na tlo iskazuje se u milimetrima (mm). Instrumenti za mjerenje oborina su: kišomjer, ombrograf ili pluviograf i totalizator.

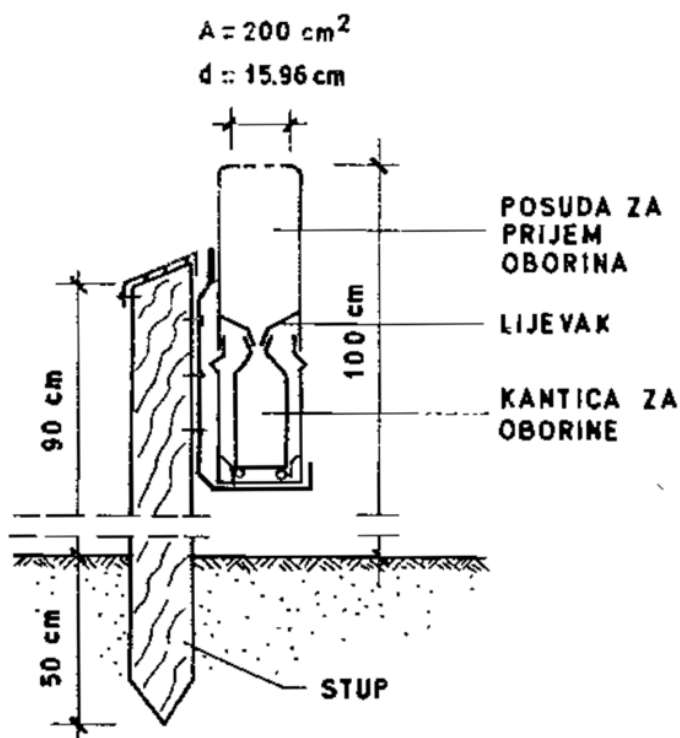
Kišomjer - naziv za svaki uređaj kojim se mjeri količina pale oborine. Mjerenje oborina vrši se jedanput dnevno u sedam sati gdje se izmjeri količina oborina od prethodnog dana.

Ombrograf - naziv za zajedničke instrumente pomoću kojega se bilježe količina i trajanje oborine. Pluvioraf se koristi za bilježenje oborina koje su tekuće, a za krute oborine koristi se nifograf.

Kako znamo da postoji veliki broj različitih kišomjera koji se koriste. Svaki kišomjer se sastoji od tri osnovna dijela:

- lijevak;
- posuda za oborine i
- menzura za mjerenje oborina.

U Hrvatskoj najviše se koristi Hellmannov kišomjer [9].

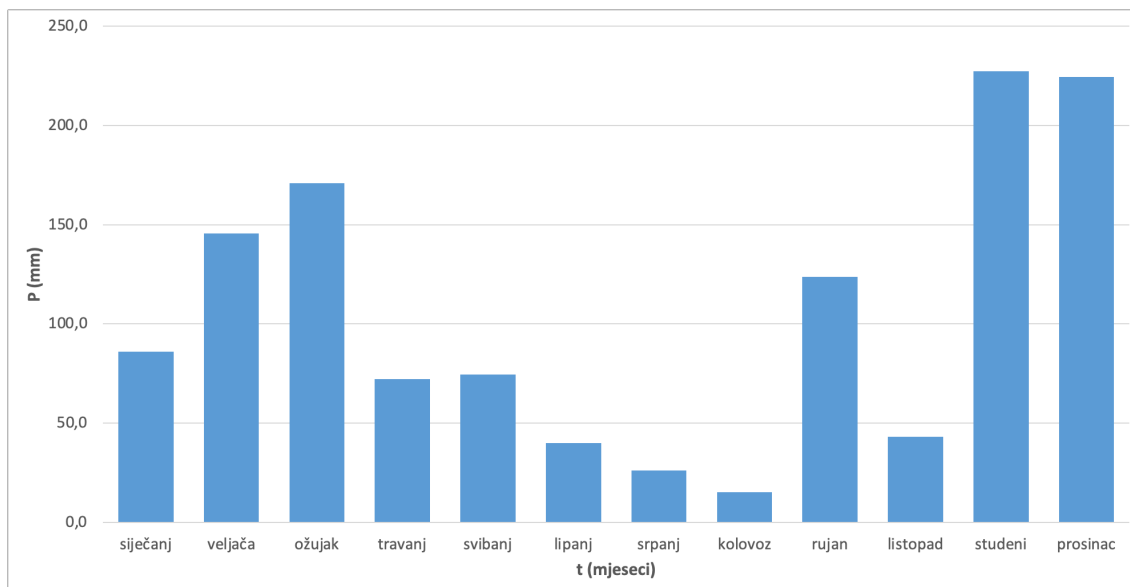


Slika 11. Shematski prikaz Hellmannova kišomjera [9];

6.3. Rezultati osnovne statističke analize podataka

U sljedećim potpoglavljima biti će prikazani svi analizirani parametri, te njihove osnovne statističke vrijednosti (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija).

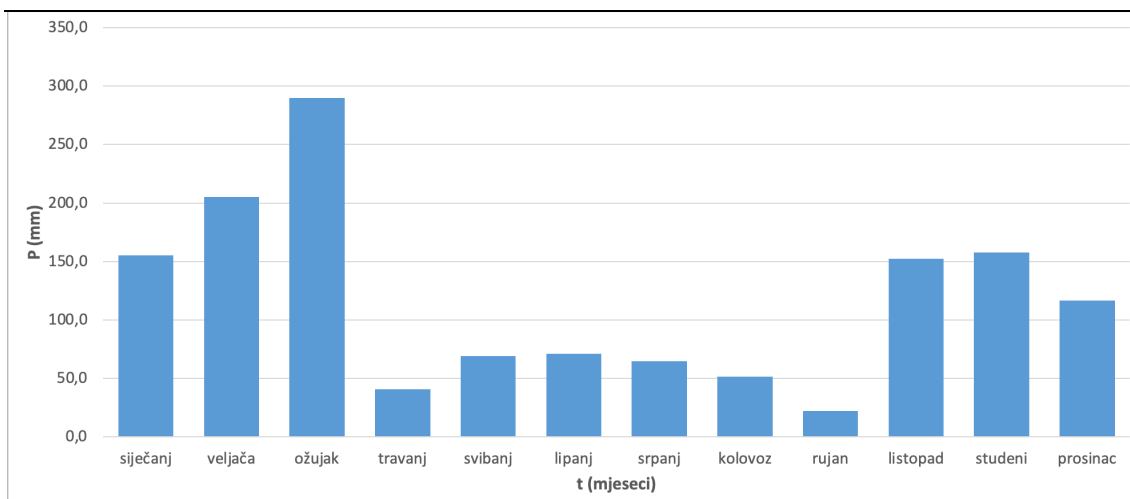
6.3.1. Oborine - Dugopolje



Slika 12: Karakteristične vrijednosti godišnjih oborina za Dugopolje za razdoblje 2017.g. (izradio autor);

Tablica 1: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti za Dugopolje za razdoblje 2017.g. (izradio autor).

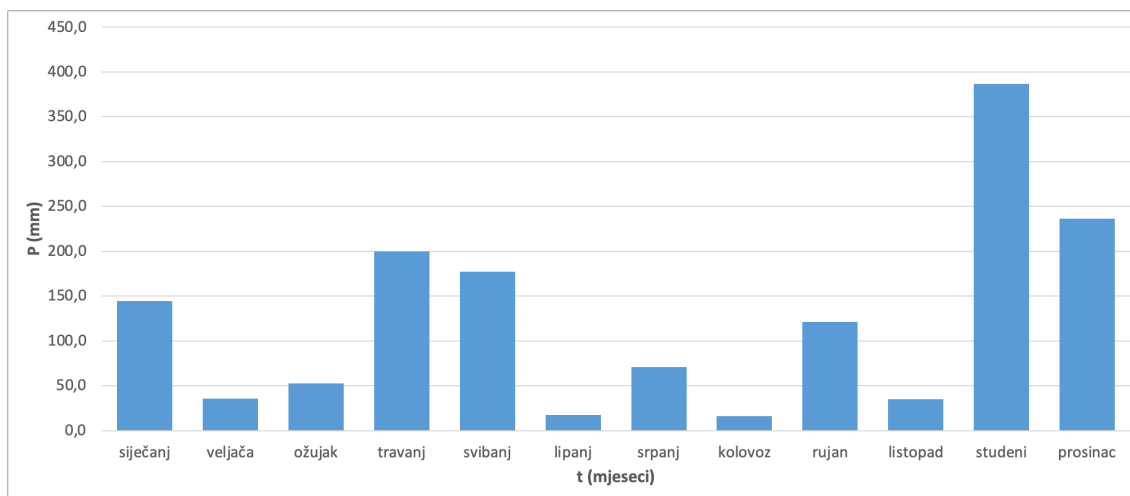
	SIJEČANJ	VELJAČA	OŽUJAK	TRAVANJ	SVIBANJ	LIPANJ	SRPANJ	KOLOVOZ	RUJAN	LISTOPAD	STUDENI	PROSINAC	GODIŠNJE
SUM	86,00	145,43	170,87	72,30	74,50	40,00	26,00	15,20	123,70	43,10	227,17	224,53	1248,80
MAX	39,10	29,68	47,04	22,30	19,20	13,80	8,07	10,13	23,37	18,53	76,73	48,07	76,73
MIN	0,38	0,32	0,32	0,17	0,80	0,37	1,30	5,07	0,40	0,27	0,33	0,57	0,17
STDV	14,20	7,75	20,20	6,36	5,55	5,41	2,62	3,58	5,56	6,40	20,04	14,26	12,30
SRED.	12,29	10,39	18,99	6,57	8,28	5,71	5,20	7,60	7,28	5,39	13,36	14,03	10,24



Slika 13: Karakteristične vrijednosti godišnjih oborina za Dugopolje za razdoblje 2018.g. (izradio autor);

Tablica 2: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti za Dugopolje za razdoblje 2018.g. (izradio autor).

	SIJEČANJ	VELJAČA	OŽUJAK	TRAVANJ	SVIBANJ	LIPANJ	SRPANJ	KOLOVOZ	RUJAN	LISTOPAD	STUDENI	PROSINAC	GODIŠNJE
SUM	155,30	205,40	289,77	40,63	69,10	70,90	64,90	51,60	22,20	152,50	157,90	116,50	1396,70
MAX	32,53	41,27	34,37	17,70	14,33	10,73	32,33	19,53	6,07	49,17	51,40	37,07	51,40
MIN	1,77	0,20	2,23	0,47	1,00	0,40	1,67	0,57	1,13	2,73	0,17	0,40	0,17
STDV	10,03	10,05	9,94	4,93	4,07	3,56	12,26	5,28	1,56	15,44	15,90	9,25	9,99
SRED.	11,09	9,34	13,17	3,69	5,32	4,73	12,98	3,97	2,47	19,06	13,16	7,77	8,78

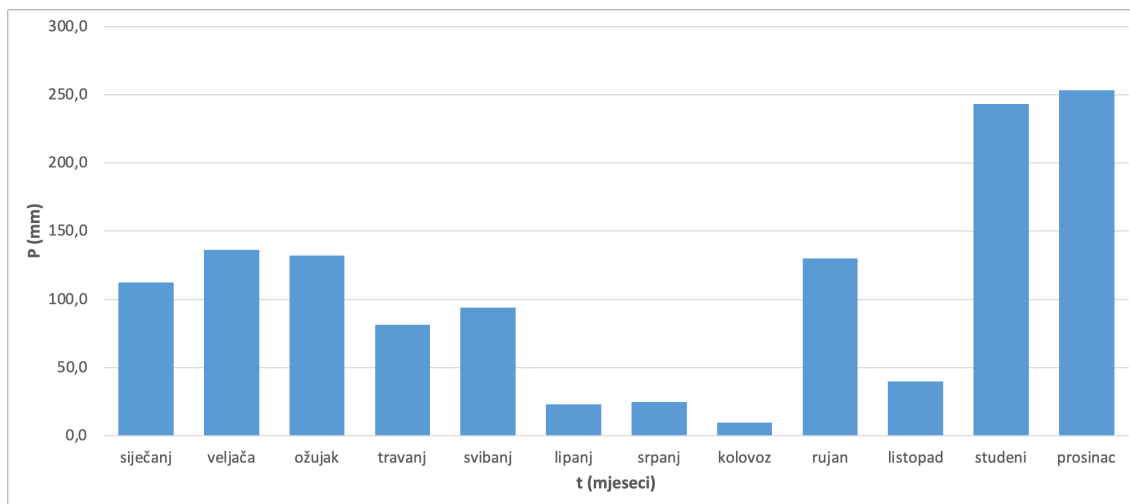


Slika 14: Karakteristične vrijednosti godišnjih oborina za Dugopolje za razdoblje 2019.g. (izradio autor);

Tablica 3: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti za Dugopolje za razdoblje 2019.g. (izradio autor).

	SIJEČANJ	VELJAČA	OŽUJAK	TRAVANJ	SVIBANJ	LIPANJ	SRPANJ	KOLOVOZ	RUJAN	LISTOPAD	STUDENI	PROSINAC	GODIŠNJE
SUM	144,57	36,03	52,60	200,17	177,33	17,40	70,70	16,40	121,30	35,10	386,50	236,10	1494,20
MAX	27,20	16,13	10,13	49,87	23,93	9,00	20,80	5,53	30,40	16,67	52,24	47,74	52,24
MIN	1,17	0,32	0,12	0,70	0,43	0,37	0,37	0,10	0,27	3,37	0,38	0,35	0,10
STDV	6,48	5,39	3,02	13,60	7,08	3,62	6,89	2,20	9,50	7,26	14,02	16,51	10,76
SRED.	8,03	5,15	3,76	12,51	7,71	3,48	5,89	3,28	9,33	11,70	13,80	15,74	9,40

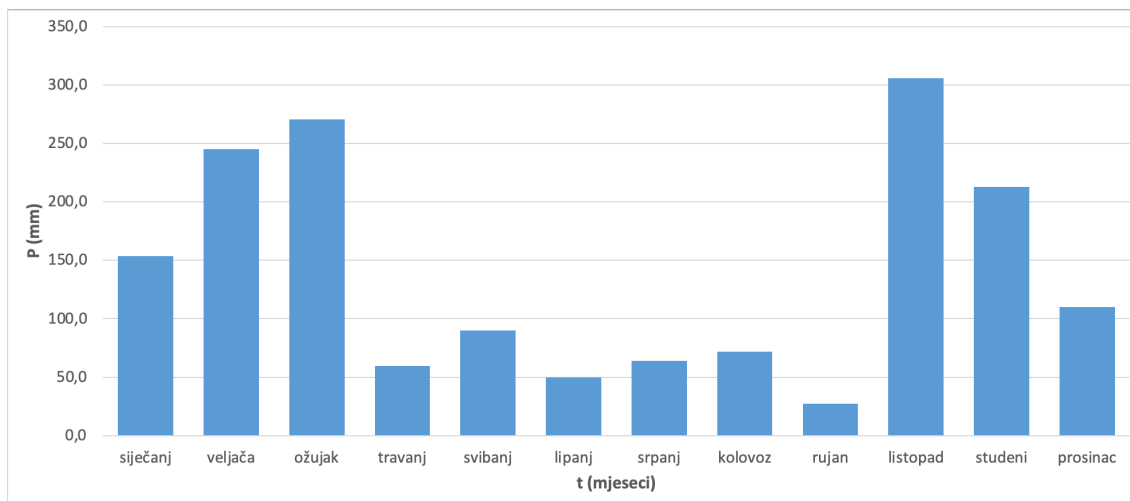
6.3.2. Oborine - Bisko



Slika 15: Karakteristične vrijednosti godišnjih oborina za Bisko za razdoblje 2017.g. (izradio autor);

Tablica 4: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti za Bisko za razdoblje 2017.g. (izradio autor).

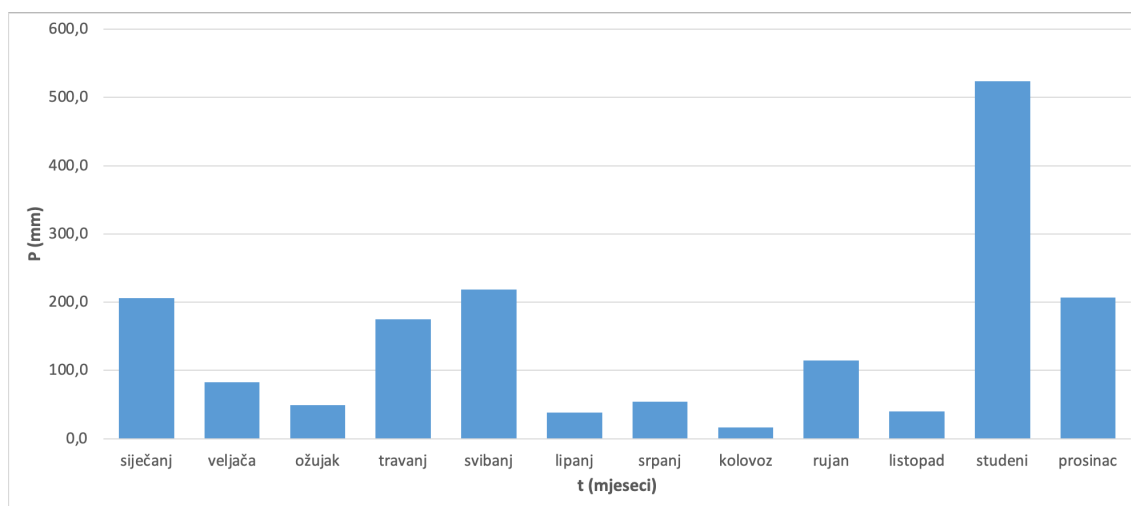
	SIJEČANJ	VELJAČA	OŽUJAK	TRAVANJ	SVIBANJ	LIPANJ	SRPANJ	KOLOVOZ	RUJAN	LISTOPAD	STUDENI	PROSINAC	GODIŠNJE
SUM	112,50	136,26	132,14	81,40	94,10	23,20	24,60	9,80	130,20	39,80	243,23	253,27	1280,50
MAX	66,51	27,17	42,08	23,07	18,00	11,80	8,40	6,00	19,03	17,73	61,67	73,67	73,67
MIN	0,09	0,09	0,32	0,09	0,17	0,67	4,00	0,27	0,07	0,07	0,20	0,50	0,07
STDV	25,34	8,27	16,83	7,49	5,38	4,17	2,37	2,67	5,18	6,15	20,93	20,12	13,58
SRED.	18,75	8,02	14,68	8,14	7,24	3,31	6,15	2,45	6,51	4,97	15,20	18,09	10,00



Slika 16: Karakteristične vrijednosti godišnjih oborina za Bisko za razdoblje 2018.g. (izradio autor);

Tablica 5: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti za Bisko za razdoblje 2018.g. (izradio autor).

	SIJEČANJ	VELJAČA	OŽUJAK	TRAVANJ	SVIBANJ	LIPANJ	SRPANJ	KOLOVOZ	RUJAN	LISTOPAD	STUDENI	PROSINAC	GODIŠNJE
SUM	153,70	245,30	270,53	59,87	89,80	50,00	64,20	72,00	27,10	305,50	212,60	109,80	1660,40
MAX	27,07	29,87	27,87	17,20	17,03	12,93	29,93	39,77	7,80	97,73	48,77	38,33	97,73
MIN	0,10	0,33	0,47	0,67	0,07	0,13	0,17	0,03	1,10	0,03	0,30	0,33	0,03
STDV	8,86	9,12	8,67	5,26	5,28	3,43	10,98	11,56	2,74	32,01	16,71	9,97	13,07
SRED.	9,04	11,15	11,76	5,44	5,99	2,78	9,17	5,54	3,87	25,46	15,19	7,32	9,54



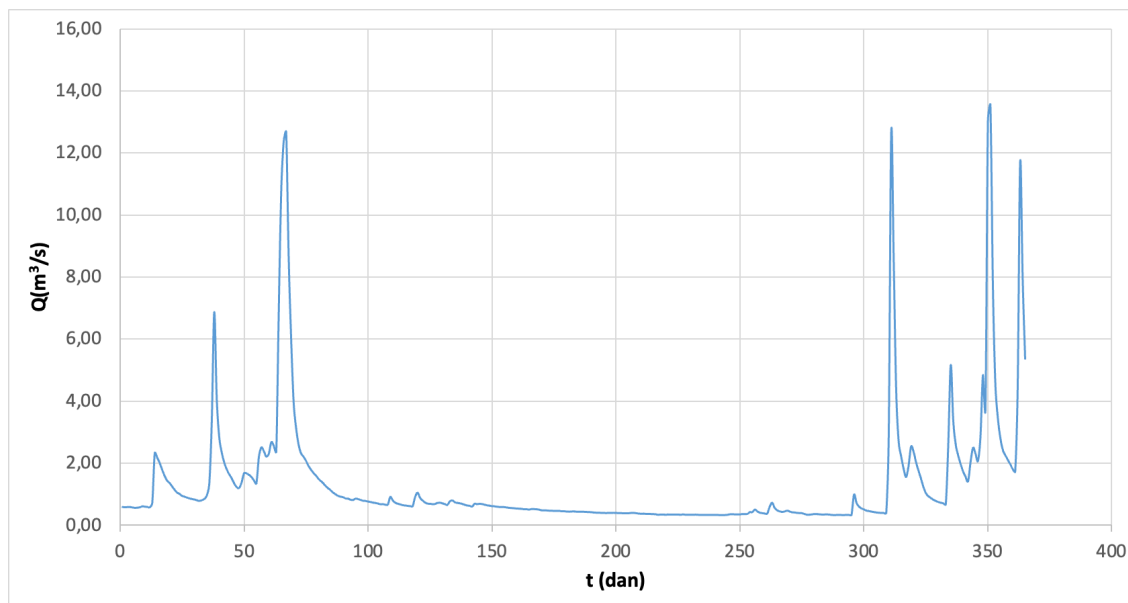
Slika 17: Karakteristične vrijednosti godišnjih oborina za Bisko za razdoblje 2019.g. (izradio autor);

Tablica 6: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti za Bisko za razdoblje 2019.g. (izradio autor).

	SIJEČANJ	VELJAČA	OŽUJAK	TRAVANJ	SVIBANJ	LIPANJ	SRPANJ	KOLOVOZ	RUJAN	LISTOPAD	STUDENI	PROSINAC	GODIŠNJE
SUM	205,57	82,93	48,70	174,60	218,20	38,30	54,40	16,00	114,50	39,50	523,80	206,70	1723,20
MAX	27,80	32,58	10,82	35,53	29,93	13,60	15,17	7,73	28,67	16,73	81,60	52,61	81,60
MIN	1,05	0,79	0,64	0,70	1,10	0,53	0,03	0,20	1,20	0,14	0,14	1,69	0,03
STDV	8,15	10,82	3,14	10,86	7,78	4,68	5,78	2,84	9,33	7,00	19,75	15,74	12,33
SRED.	11,42	11,85	4,43	10,91	9,49	4,26	4,95	2,67	10,41	4,94	18,06	14,76	10,57

Usporedbom dobivenih rezultata za dvije meteorološke postaje Dugopolje i Bisko uočavamo da je najveća pala oborina zabilježena na postaji Bisko 2019. godine te je iznosila $P_{\max}=1723,20$ mm, a najmanja pala oborina zabilježena je na postaji Dugopolje 2017. godine i iznosila je $P_{\min}=1248,80$ mm.

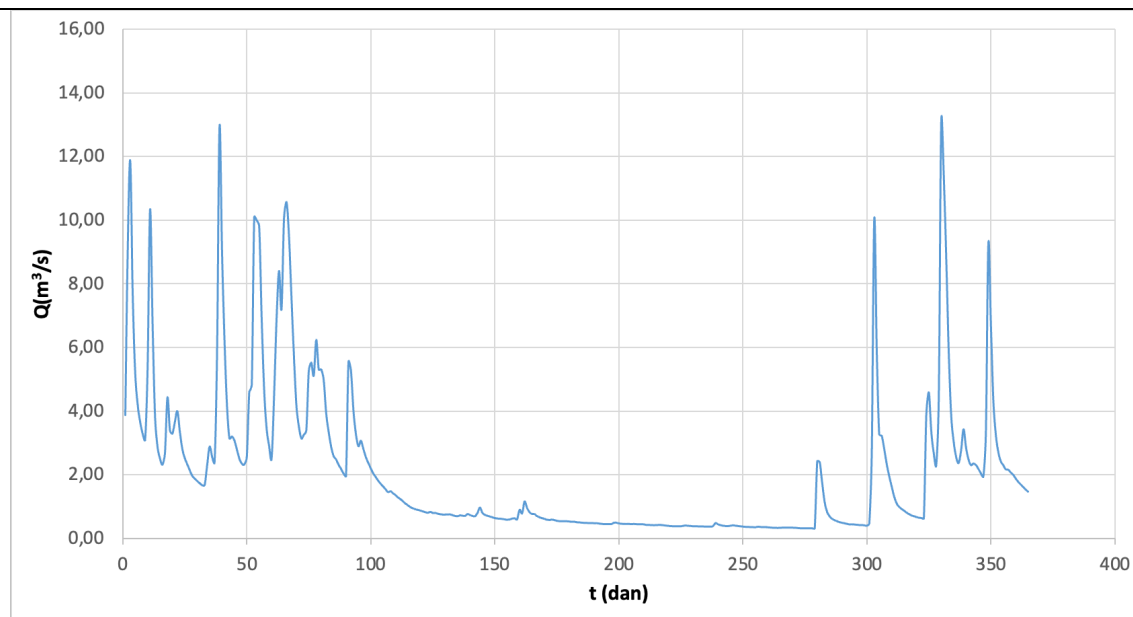
6.3.3. Protoci izvora Žrnovnice



Slika 18: Hidrogram otjecanja izvora Žrnovnice za 2017.g. (izradio autor);

Tablica 7: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti protoka za razdoblje 2017.g. (izradio autor).

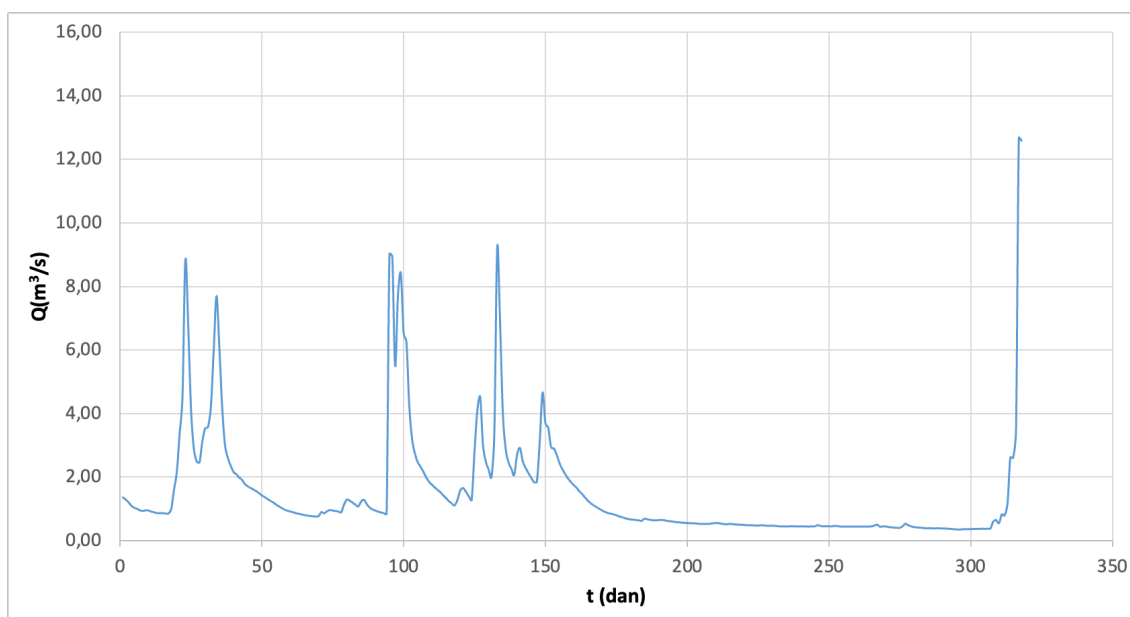
	SIJEČANJ	VELJAČA	OŽUJAK	TRAVANJ	SVIBANJ	LIPANJ	SRPANJ	KOLOVOZ	RUJAN	LISTOPAD	STUDENI	PROSINAC	GODIŠNJE
SUM	31,28	55,29	103,47	23,02	21,85	15,67	12,88	10,92	13,02	13,12	62,25	127,56	490,33
MAX	2,33	6,87	12,66	1,06	0,89	0,61	0,46	0,38	0,73	1,00	12,66	13,54	13,54
MIN	0,57	0,80	0,91	0,63	0,61	0,45	0,38	0,34	0,34	0,34	0,40	1,43	0,34
STDV	0,51	1,22	3,38	0,10	0,06	0,05	0,02	0,01	0,09	0,14	2,56	3,32	2,00
SRED.	1,01	1,97	3,34	0,77	0,70	0,52	0,42	0,35	0,43	0,42	2,07	4,11	1,34



Slika 19: Hidrogram otjecanja izvora Žrnovnice za 2018.g. (izradio autor);

Tablica 8: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti protoka za razdoblje 2018.g. (izradio autor).

	SIJEČANJ	VELJAČA	OŽUJAK	TRAVANJ	SVIBANJ	LIPANJ	SRPANJ	KOLOVOZ	RUJAN	LISTOPAD	STUDENI	PROSINAC	GODIŠNJE
SUM	127,91	130,88	151,88	60,75	23,22	19,70	14,43	12,29	10,62	37,32	90,43	85,43	764,87
MAX	11,86	12,94	10,57	5,55	0,97	1,16	0,52	0,48	0,41	10,03	13,08	9,25	13,08
MIN	1,73	1,67	1,96	0,87	0,62	0,52	0,42	0,37	0,32	0,32	0,63	1,47	0,32
STDV	2,53	3,06	2,44	1,22	0,07	0,15	0,02	0,02	0,02	2,00	3,15	1,57	2,43
SRED.	4,13	4,67	4,90	2,03	0,75	0,66	0,47	0,40	0,35	1,20	3,01	2,76	2,10



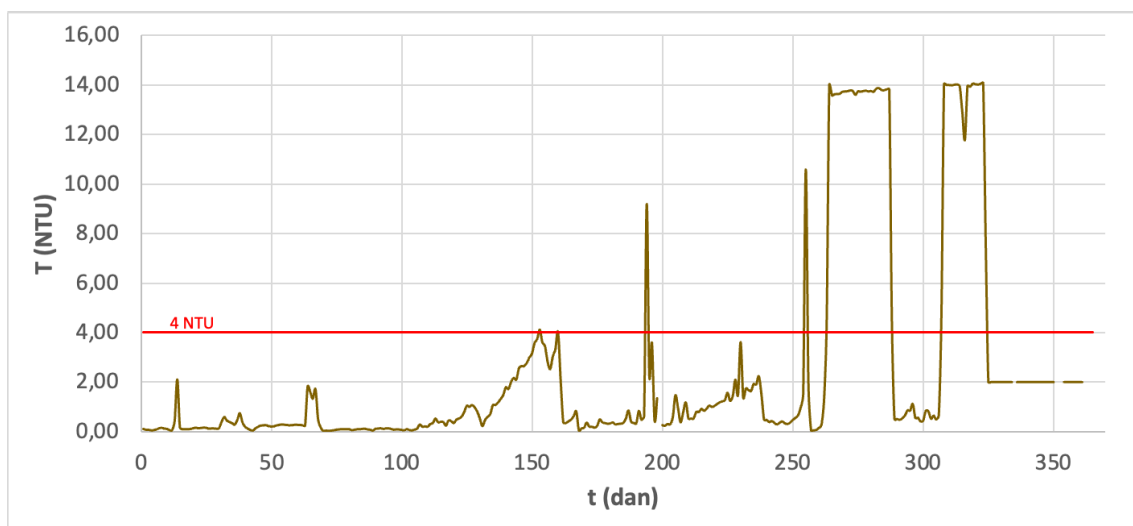
Slika 20: Hidrogram otjecanja izvora Žrnovnice za 2019.g. (izradio autor);

Tablica 9: Prikaz osnovnih statističkih vrijednosti protoka za razdoblje 2019.g.

	SIJEČANJ	VELJAČA	OŽUJAK	TRAVANJ	SVIBANJ	LIPANJ	SRPANJ	KOLOVOZ	RUJAN	LISTOPAD	STUDENI	PROSINAC	GODIŠNJE
SUM	67,65	65,96	30,27	92,74	93,60	42,11	18,48	14,91	13,66	12,41	39,73	NEMA PODATAKA	491,52
MAX	8,83	7,70	1,30	9,03	9,21	2,95	0,70	0,53	0,51	0,54	12,68	NEMA PODATAKA	12,68
MIN	0,86	0,95	0,77	0,85	1,29	0,67	0,53	0,45	0,41	0,35	0,38	NEMA PODATAKA	0,35
STDV	1,90	1,73	0,16	2,65	1,64	0,70	0,05	0,03	0,02	0,04	4,26	NEMA PODATAKA	1,84
SRED.	2,18	2,36	0,98	3,09	3,02	1,40	0,60	0,48	0,46	0,40	2,84	NEMA PODATAKA	1,55

Maksimalni zabilježeni dnevni protok izvora Žrnovnica za vremensko razdoblje od 01.01.2017. do 31.12.2019.g. iznosio je 13,54 m³/s dana 17. prosinca 2017.g., a minimalni dnevni iznosio je 0,32 m³/s dana 29.rujna 2018.g.

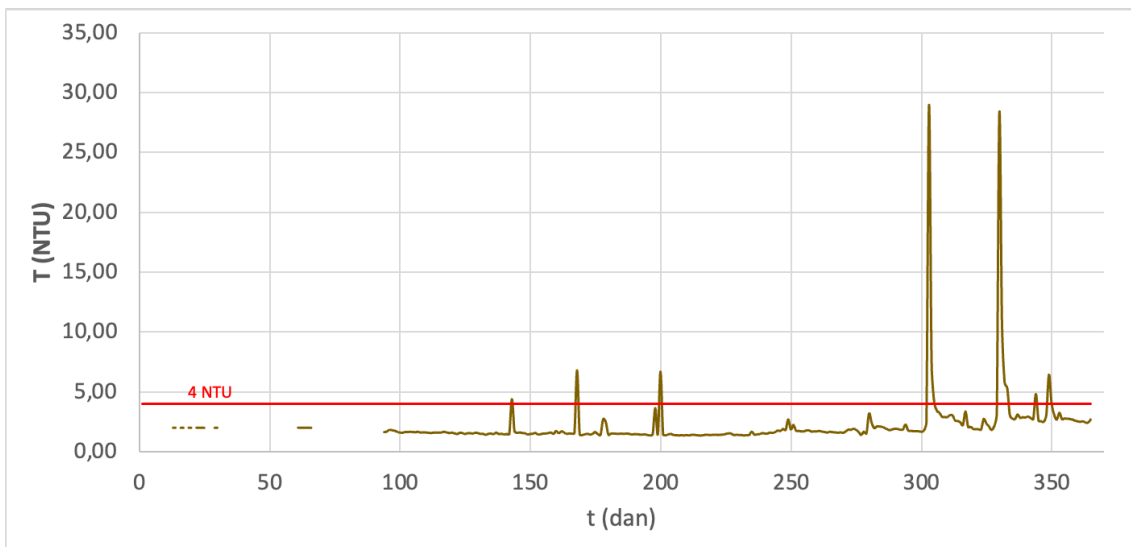
6.3.4. Mutnoća izvora Žrnovnice



Slika 21: Turbidograf izvora Žrnovnice za 2017.g. (izradio autor);

Tablica 10: Prikaz maksimuma i minimuma mutnoće za 2017.g. (izradio autor).

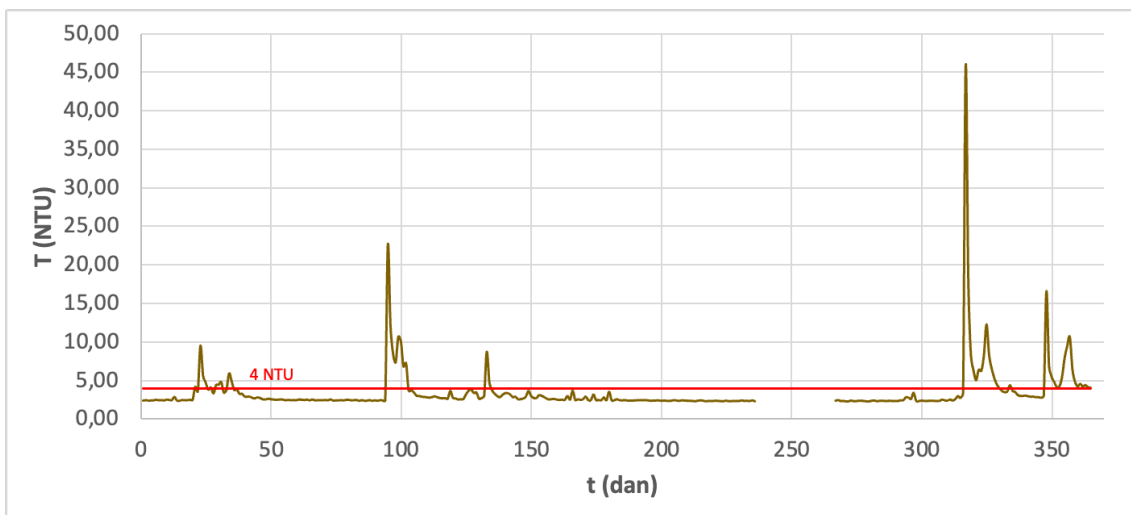
	SIJEČANJ	VELJAČA	OŽUJAK	TRAVANJ	SVIBANJ	LIPANJ	SRPANJ	KOLOVOZ	RUJAN	LISTOPAD	STUDENI	PROSINAC	GODIŠNJE
SUM	6,09	7,93	9,78	6,22	46,08	39,50	30,54	39,71	162,35	207,67	254,38	48,00	858,25
MAX	2,11	0,74	1,83	0,53	3,58	4,12	9,19	3,62	14,00	13,89	14,09	2,00	14,09
MIN	0,04	0,04	0,03	0,05	0,22	0,04	0,24	0,35	0,05	0,41	0,49	2,00	0,03
STDV	0,36	0,15	0,52	0,14	0,93	1,46	1,69	0,67	6,30	6,57	5,93	0,00	2,59
SRED.	0,20	0,28	0,32	0,21	1,49	1,32	1,02	1,28	5,41	6,70	8,48	2,00	2,39



Slika 22: Turbidograf izvora Žrnovnice za 2018.g. (izradio autor);

Tablica 11: Prikaz maksimuma i minimuma mutnoće za 2018.g. (izradio autor).

	SIJEČANJ	VELJAČA	OŽUJAK	TRAVANJ	SVIBANJ	LIPANJ	SRPANJ	KOLOVOZ	RUJAN	LISTOPAD	STUDENI	PROSINAC	GODIŠNJE
SUM	102,76	85,37	76,80	149,85	102,37	81,78	75,67	57,12	16,72	76,10	192,09	152,81	1169,44
MAX	2,00	2,00	2,00	2,00	4,39	6,79	6,67	1,67	2,69	28,92	28,33	6,42	28,92
MIN	2,00	2,00	2,00	1,56	1,41	1,39	1,36	1,36	1,58	1,40	1,81	2,42	1,36
STDV	0,00	0,00	0,00	0,09	0,52	0,99	1,01	0,08	0,22	4,93	4,91	0,80	1,81
SRED.	2,00	2,00	2,00	1,65	1,61	1,77	1,68	1,45	1,76	2,97	3,93	2,97	2,15



Slika 23: Turbidograf izvora Žrnovnice za 2019.g. (izradio autor);

Tablica 12: Prikaz maksimuma i minimuma mutnoće za 2019.g. (izradio autor).

	SIJEČANJ	VELJAČA	OŽUJAK	TRAVANJ	SVIBANJ	LIPANJ	SRPANJ	KOLOVOZ	RUJAN	LISTOPAD	STUDENI	PROSINAC	GODIŠNJE
SUM	88,24	76,94	92,77	74,67	83,67	59,05	79,51	79,73	80,35	92,93	81,52	234,52	1123,89
MAX	9,53	5,93	2,58	22,56	8,74	3,71	2,60	2,45	2,49	3,43	45,85	16,56	45,85
MIN	2,40	2,47	2,38	2,40	2,57	2,44	2,38	2,33	2,32	2,32	2,37	2,80	2,32
STDV	1,49	0,45	0,97	0,96	0,92	1,23	1,42	1,49	6,14	2,01	4,94	2,26	1,73
SRED.	1,13	0,37	0,69	0,81	2,08	0,91	1,29	1,70	6,92	1,52	5,47	2,85	2,14

Maksimalna zabilježena mutnoća izvora Žrnovnica za vremensko razdoblje od 01.01.2017. do 31.12.2019.g. javlja se dana 04. prosinca 2017.g. i iznosi 35,09 NTU, a minimalna zabilježena mutnoća javlja se 04. siječnja 2017.g. i iznosi 0,04 NTU.

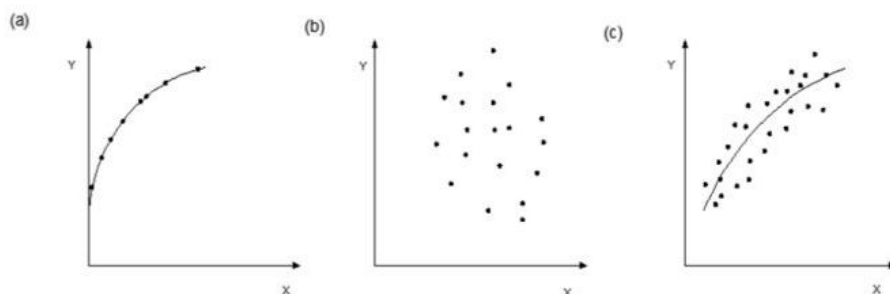
6.4. Koleracija i linearna regresija

U hidrološkoj praksi često se susrećemo s pojavama koje su opisane sa dva zajednička izvorišta tj. sa konceptom dviju slučajnih varijabli X i Y (dvodimenzionalne slučajne varijable).

Samim tim se samo promatranje otežava i to usmjerava do teorijskog proučavanja koje se naziva teorija korelacije.

Po vidu srodnosti razlikujemo:

- funkcionalnu povezanost (a)
- stohastičku povezanost (b)
- nema povezanosti (c)



Slika 24: Povezanost varijabli [10];

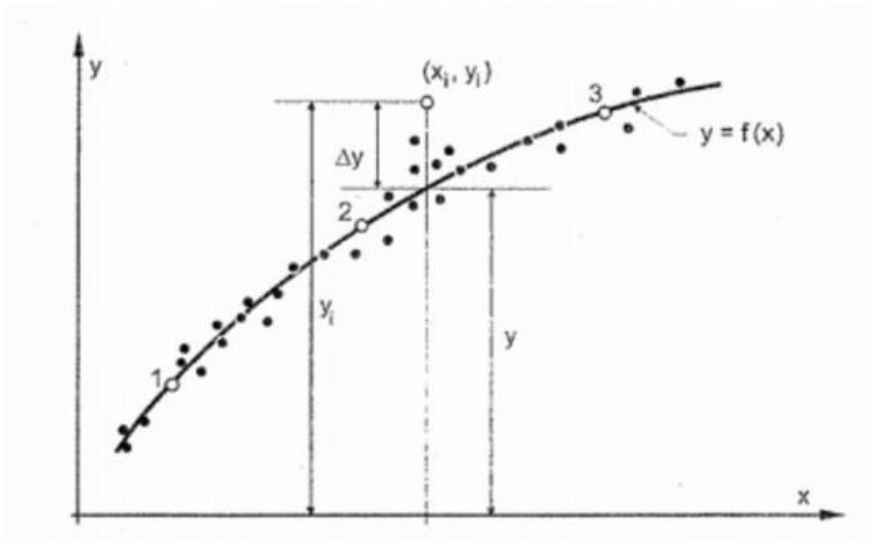
Osnovna razlika između stohastičke i funkcionalne povezanosti varijable x i y je ta da kod stroge funkcionalne veze, jednoj vrijednosti od x pristaje jedna ili više sasvim određenih vrijednosti varijable y , iako kod stohastičkih povezanosti varijabli vrijednosti od x odgovara više vrijednosti od y , raspoređeni po zakonu vjerojatnosti.

Pri stohastičkoj vezi ne može se za ranije dan x predvidjeti vrijednost za y , već se može samo odrediti interval u kojem će se ta vrijednost odvijati, uz izvjesnu vjerojatnost.

U praksi se često uz pojam korelacije koristi sinonim regresija pri čemu se implicira postupak kojim se uspostavlja veza između jedne zavisne i jedne ili više nezavisnih varijabli [10].

Pod pojmom korelacija definira se stohastička povezanost dvije ili više varijabli, dok se pod pojmom regresija podrazumijeva statistička metoda odnosno matematičko izražavanje korelacijskog odnosa.

Ciljevi tih analiza su procjene jedne varijable na temelju jedne ili više njih ujedno i nadopunjavanje podataka koji zbog nekog motiva nedostaju na nekoj postaji [10].



Slika 25: Shematski prikaz regresijske i koleracijske analize dvodimenzionalne slučajne [10];

Na slici su dvije varijable X i Y koje su zadane kao serija istovremenih vrijednosti (x_i, y_i) , one ukazuju koncentraciju oko jedne fiktivne krivulje.

Za veliki uzorak će uvijek postojati raspodjela vrijednosti y za vrijednost x_i tj. raspodjele vrijednosti y za neki interval Δx oko x_i .

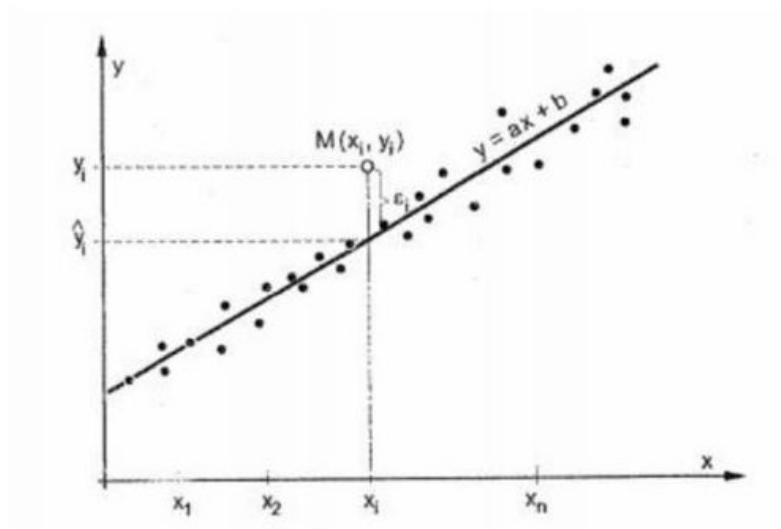
Srednja vrijednost y_o , za sve vrijednosti y za taj interval Δx oko x_i je izvjesna vrijednost y za $x=x_i$.

Krivulja koja se oblikuje ovim srednjim vrijednostima zove se krivulja regresije y u funkciji x , ako ta krivulja ima oblik pravca govorimo o lineranoj regresiji, a ukoliko je to bilo koja druga krivulja radi se o nelinearnoj regresiji.

Ako postoji stohastička zavisnost isključuje se funkcionalna regresijska krivulja, tj, ne daje funkcionalnu zavisnost, samo označava stupanj stohastičke zavisnosti [10].

6.4.1. Linearna regresija

Linearna regresijska veza za varijablu Y u funkciji X određuje se kao pravac koji daje najbolju procjenu y za danu vrijednost x . Najkvalitetnija procjena x za dani y daje se uz pomoć pravca regresije u funkciji y [10].



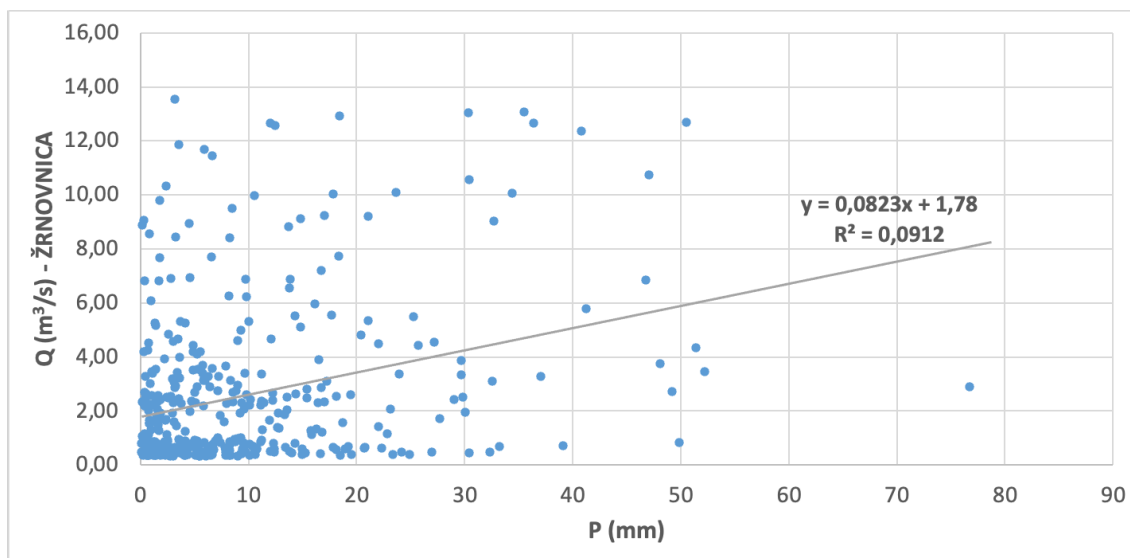
Slika 26: Geometrijski prikaz dvodimenzionalne slučajne varijable (X, Y) kada je riječ o linearnoj regresiji [10];

Na slici je priložena dvodimenzionalna slučajna varijabla gdje je skup točaka raspodijeljen oko pravca $y = ax + b = f(x)$. Za svaku točku postoji vertikalno odstupanje $y_i - \hat{y}_i = y_i - (ax_i + b) = \varepsilon_i$ za koje vrijedi normalni zakon raspodjele. U hidrološkoj se praksi oblik

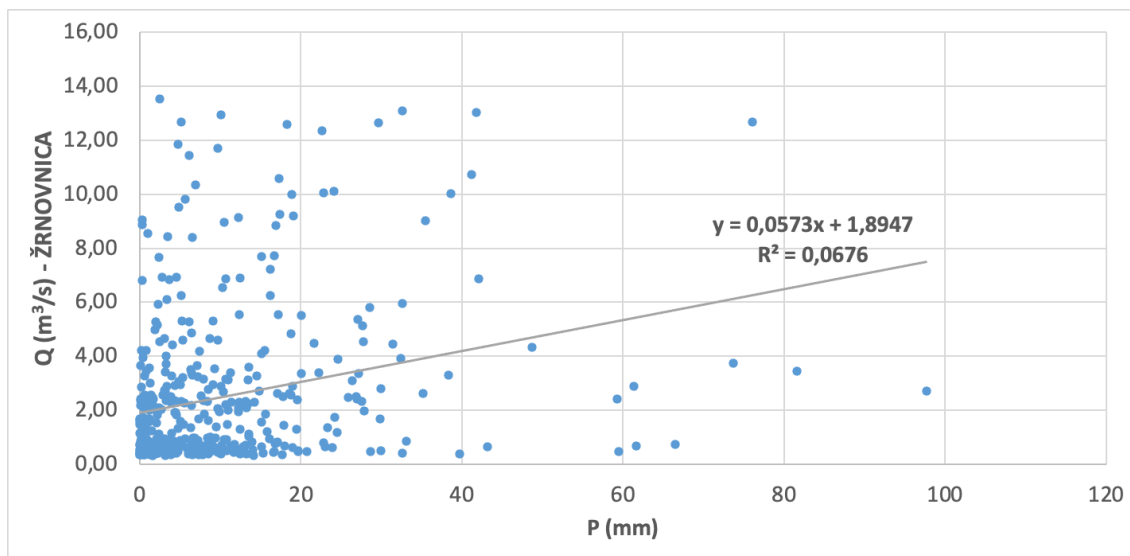
modela samo pretpostavlja te je cilj da se parametri a i b definiraju tako da se pravac najbolje prilagodi promatranim vrijednostima x_i i y_i . Y označava stvarnu vrijednost varijable, a y vrijednost koja se dobiva pomoću linearne funkcije. Odstupanje je razlika te dvije vrijednosti i iznosi $\varepsilon = y - Y$. Odstupanje se može pridodati pogrešci u ulaznim podacima, x ili y ili činjenici da y ne zavisi samo o x [10].

6.4.2. Rezultati koleracijske analize i linearne regresije protoka Žrnovnice i oborina na meterološkoj postaji Dugopolje i Bisko

Prikazani grafovi prikazuju srednju dnevnu koleraciju između protoka Žrnovnice i oborina koje su izmjerene na meterološkim postajama Dugopolje i Bisko za analizirano razdoblje od 2017. - 2019.godine.



Slika 27: Koleracija srednjih dnevnih protoka (Žrnovnica) i oborina izmjerenih na meterološkoj postaji Dugopolje za razdoblje od 2017. - 2019.g. (izradio autor);



Slika 28: Koleracija srednjih dnevnih protoka (Žrnovnica) i oborina izmjerenih na meterološkoj postaji Bisko za razdoblje od 2017. - 2019.g. (izradio autor);

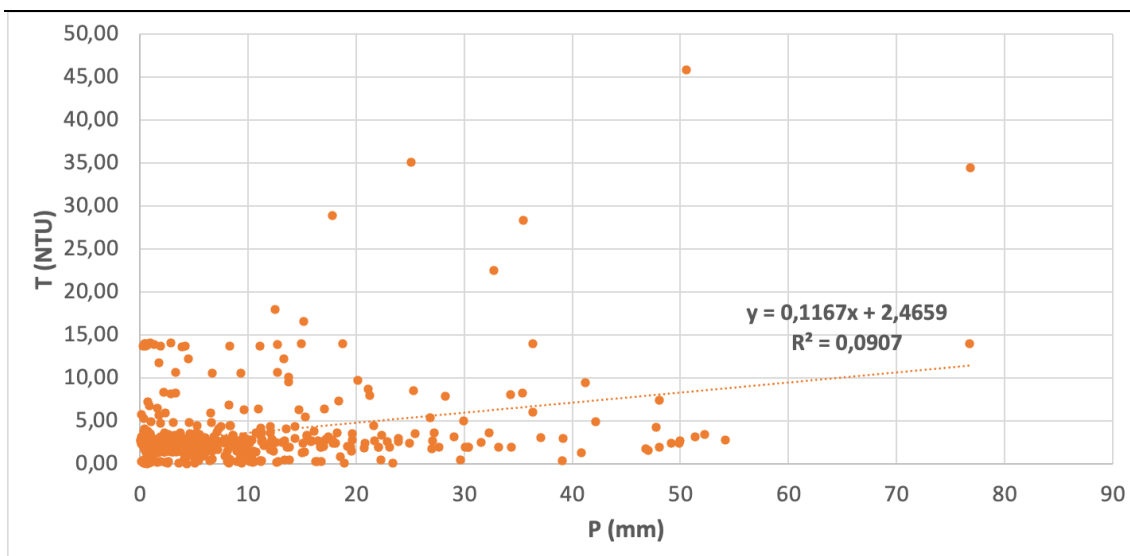
Tablica 13: Vrijednosti koeficijenta korelacije (r) (izradio autor).

r	
Žrnovnica	
Dugopolje	0,302 (slaba koleracija)
Bisko	0,260 (slaba koleracija)

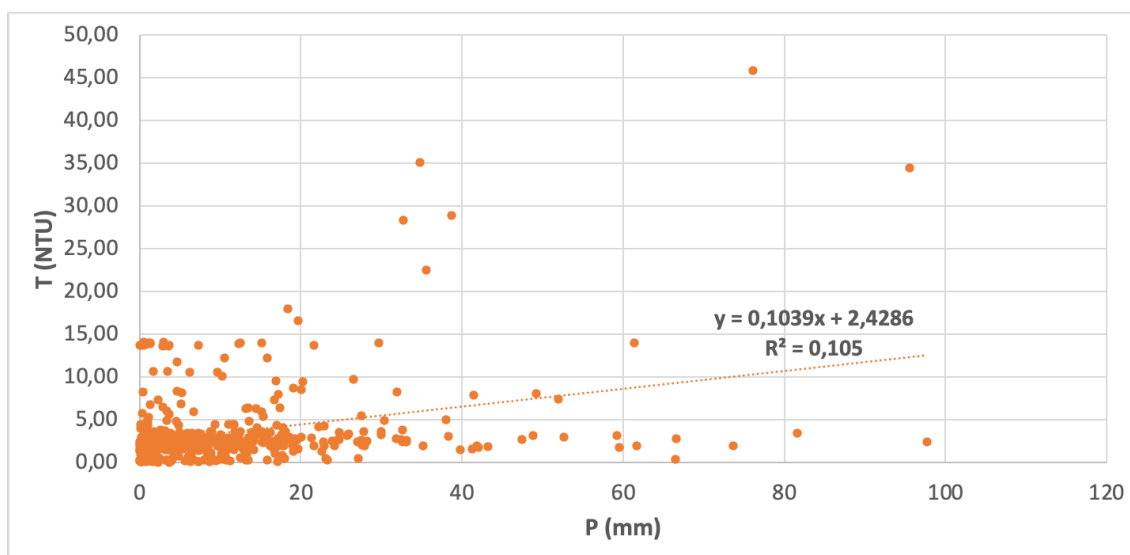
6.4.3. Rezultati koleracijske analize i linearne regresije mutnoće

izvora Žrnovnica i oborina na meterološkoj postaji Dugopolje i Bisko

Prikazani grafovi prikazuju srednju dnevnu koleraciju između mutnoće izvora Žrnovnica i oborina koje su izmjerene na meterološkim postajama Dugopolje i Bisko za analizirano razdoblje od 2017. - 2019.godine.



Slika 29: Koleracija srednje dnevne mutnoće (Žrnovnica) i oborina izmjerenih na meterološkoj postaji Dugopolje za razdoblje od 2017. - 2019.g. (izradio autor);



Slika 30: Koleracija srednje dnevne mutnoće (Žrnovnica) i oborina izmjerenih na meterološkoj postaji Dugopolje za razdoblje od 2017. - 2019.g. (izradio autor);

Tablica 14: Vrijednosti koeficijenata korelacije (r) (izradio autor).

r

Žrnovnica

Dugopolje

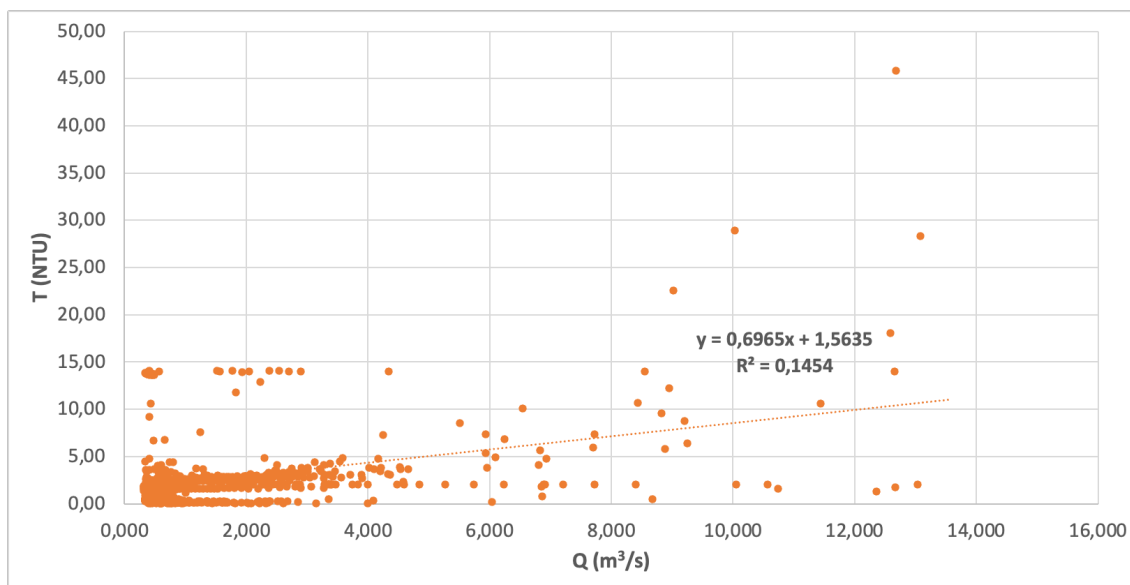
0,301 (slaba koleracija)

Bisko

0,324 (slaba koleracija)

6.4.4. Rezultati koleracijske analiza i linearne regresije mutnoće i protoka izvora Žrnovnica

Prikazani graf prikazuje srednju dnevnu koleraciju između mutnoće i protoka rijeke Žrnovnice za analizirano razdoblje od 2017. - 2019.godine.



Slika 31: Koleracija srednje dnevne mutnoće i protoka izvora Žrnovnica za analizirano razdoblje od 2017. - 2019.g. (izradio autor);

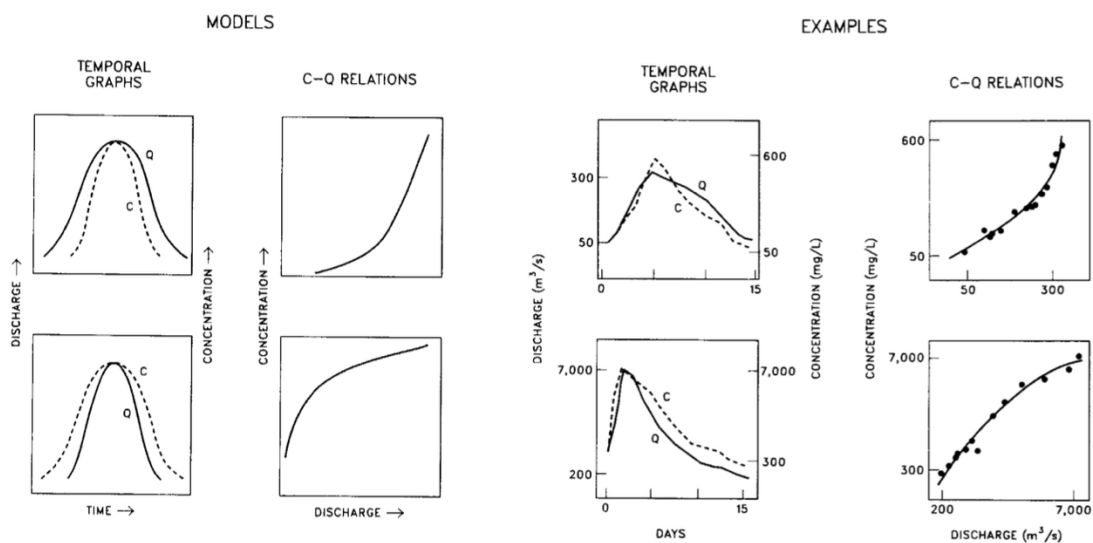
Tablica 15: Vrijednosti koeficijenta korelacije (r) (izradio autor).

r	
Protok (Žrnovnica)	
Mutnoća (Žrnovnica)	0,381 (slaba koleracija)

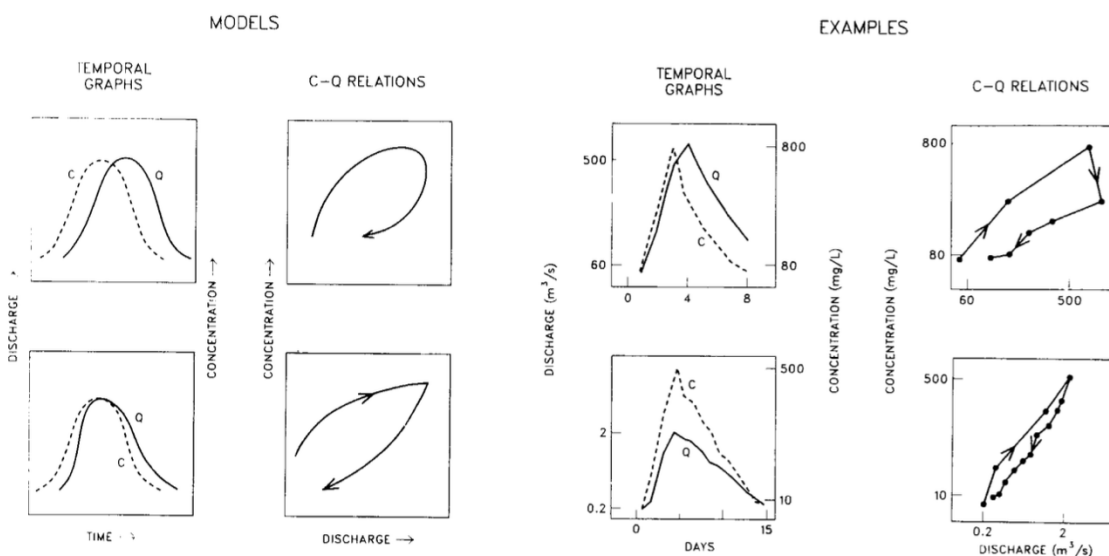
7. WILLIAMS METODA

7.1. Općenito o Williams metodi

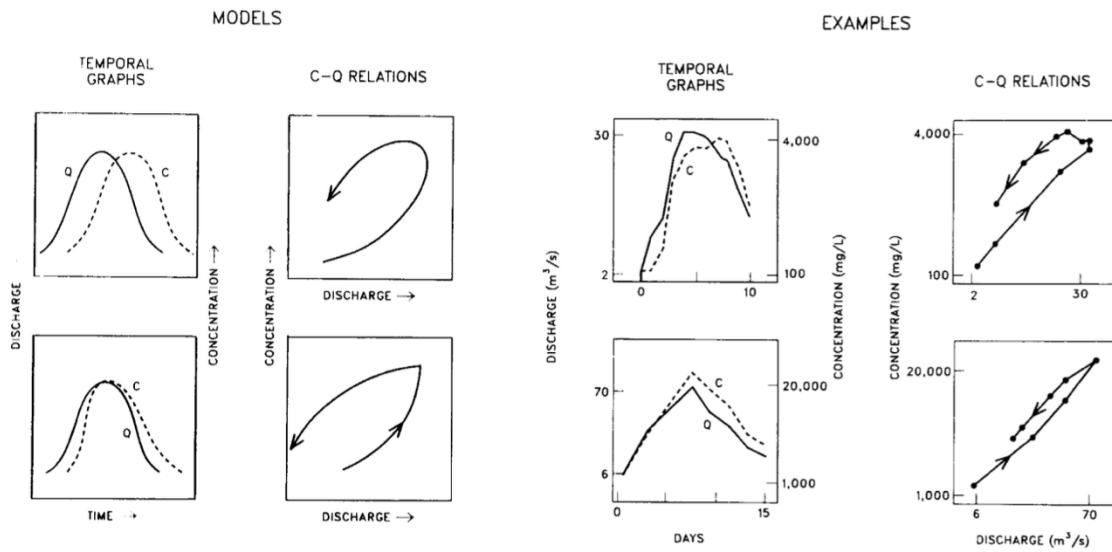
Williams je ustanovio pet najčešćih klasa histerezne petlje s odgovarajućim objašnjenjima. Dije se na petlje sa jednom vrijednošću (linearna) (slika 32), u smjeru kazaljke na satu (slika 33), suprotno od kazaljke na satu (slika 34), linija s jednom vrijednošću plus petlja (slika 35) i petlja u obliku broja osam (slika 36).



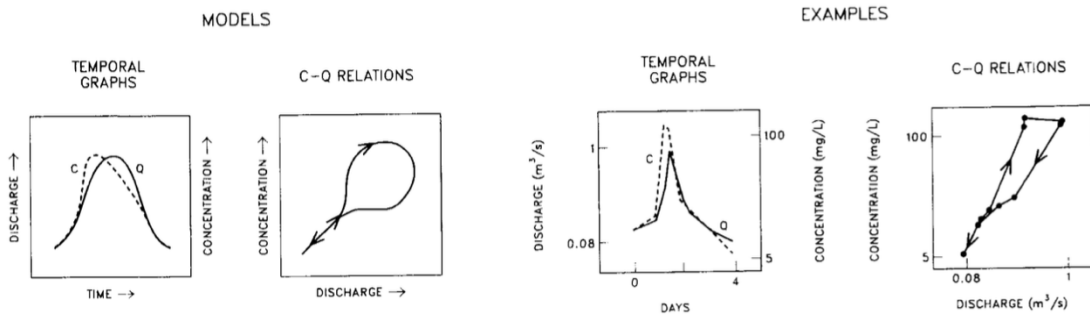
Slika 32: Odnos C - Q, prikaz petlje sa jednom vrijednošću (linearna) [11];



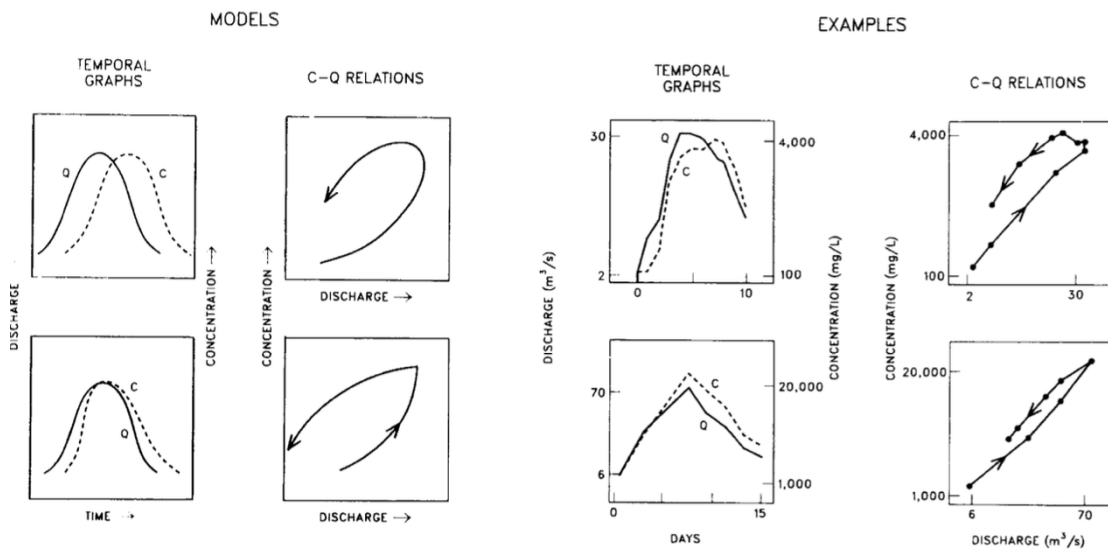
Slika 33: Odnos C - Q, prikaz petlje u smjeru kazaljke na satu [11];



Slika 34: Odnos C - Q, prikaz petlje u smjeru suprotno od kazaljke na satu [11];



Slika 35: Odnos C - Q, prikaz linija s jednom vrijednošću plus petlja [11];

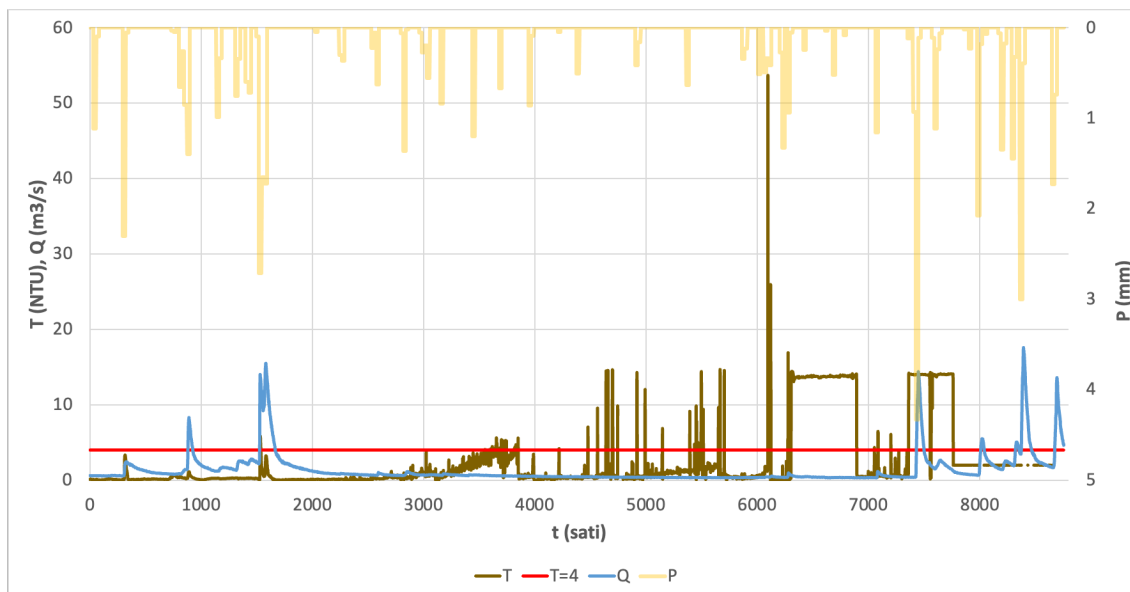


Slika 36: Odnos C - Q, prikaz petlje u obliku osmice [11];

Dobivaju se analizom odnosa između koncentracije sedimenata (C_w) i protoka (Q_w) tijekom pojedinačnih poplava u rijekama, gdje se vremenski grafovi $Q_w - t$ i $C_w - t$ uspoređuju s petljama histereze $C_w - Q_w$. Linija s jednom vrijednošću (Klasa I) opisuje se kao najjednostavniji odnos, gdje postoji funkcionalni odnos između C_w i Q_w (za svaki Q_w postoji jedinstvena vrijednost C_w). Petlja u smjeru kazaljke na satu (Klasa II) najčešći je tip petlje histereze. Dva su najvjerojatnija uzroka petlje u smjeru kazaljke na satu. Prvi je brzo trošenje raspoloživog sedimenta prije nego što se postigne maksimalni protok vode, a drugi je da je do stvaranja oklopnog sloja došlo prije nego što je postignut maksimalni protok vode. Najčešća petlja u smjeru kazaljke na satu nastaje kada koncentracija sedimenata dostigne vrhunac prije maksimalnog protoka, međutim petlje u smjeru kazaljke na satu mogu se pojaviti i kada su koncentracija sedimenta i maksimalni protok događaju istovremeno. Petlje u smjeru suprotnom od kazaljke na satu (Klasa III) nastaju uglavnom iz tri moguća uzroka. Prvi mogući uzrok je razlika između vremena prolaza vode i suspendiranih sedimenata, drugi mogući uzrok je velika erodibilnost tla u kombinaciji s dugotrajnom erozijom tijekom poplave i treći mogući uzrok petlji u smjeru suprotnom od kazaljke na satu je sezonska varijabilnost padalina i koncentracije sedimenta. Posljedica ovih mogućih uzroka je da koncentracija sedimenta zaostaje za ispuštanjem vode. Petlje u smjeru suprotnom od kazaljke na satu mogu se pojaviti čak i kada koncentracija sedimenta i maksimalni protok događaju istovremeno. Jednostruka linija plus petlja (Klasa IV) definirana je kao kombinacija Klase I i Klase II ili Klase III zbog promjena u odnosu tijekom poplave zbog dostupnog sedimenta, transporta sedimenta i skladištenja. Petlja u obliku osmice (Klasa V) kombinacija je Klase II i III s petljom u smjeru kazaljke na satu pri velikim protocima i petljom u smjeru suprotnom od kazaljke na satu pri niskim protocima. Nije uvijek moguće jednostavno definirati klasu histerezne petlje [12, 13], a petlje histereze iste klase ponekad se mogu pojaviti iz nekoliko razloga [12]. Prve tri klase su najčešće, neovisno o tome je li analizirani resurs krški izvor ili rijeka. Klasa V se rijetko pojavljuje [14]. Kombinacija klasa ili kompleksnih petlji histereze javljaju se uglavnom tijekom duljih razdoblja velikih oborina. Williams - ova metoda poslužila je kao osnova za sljedeća istraživanja histereze između ispuštanja i suspendiranog sedimenta ili otopljenih tvari [11].

Odnos između protoka krških izvora i mutnoće u razdobljima kada mutnoća prelazi dopuštenu vrijednost od 4 NTU analiziran je klasičnim hidrološkim metodama uključujući histerezne petlje. Williams - ova metoda prilagođena je zamjenom protoka rijeke s protokom krških izvora, a koncentraciju sedimenta s prekomjernom mutnoćom. Prvi dio usredotočen je na opće hidrološke karakteristike kumulativne količine oborina, mutnoće i protoka tijekom svakog razdoblja. U drugom dijelu identificirane su, klasificirane i hidrološki objašnjene četiri glavne vrste petlji histereze. Područje istraživanja je krški sliv izvora Žrnovnice u Hrvatskoj.

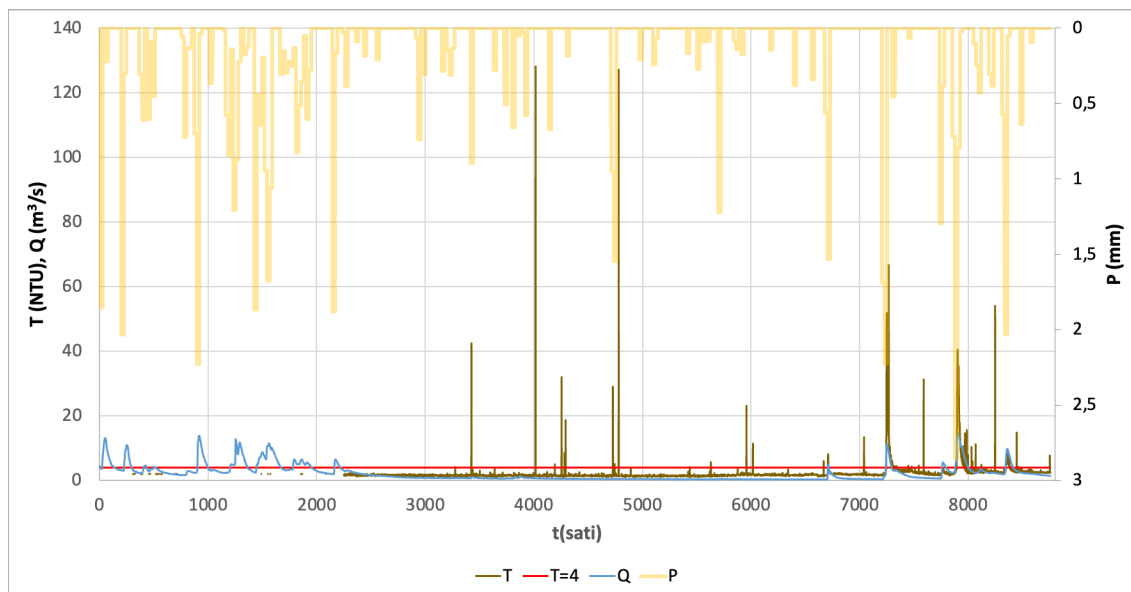
U nastavku na slikama 37 - 42 prikazan je vremenski niz satnog protoka i mutnoće izvora Žrnovnica, te dnevne količine oborina na meteorološkim postajama Dugopolje i Bisko. U tablicama 16 - 21 prikazane su opće statističke karakteristike vremenskih serija (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija).



Slika 37: Vremenski niz satnog protoka (Q) i mutnoće (T) izvora Žrnovnice, te dnevne količine oborina na meteorološkoj postaji Dugopolje (P) za godinu 2017. Crvena linija predstavlja dopuštene vrijednosti mutnoće (T) od 4 NTU. (izradio autor);

Tablica 16: Opće statističke karakteristike vremenske serije (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija) za 2017. godinu. (izradio autor).

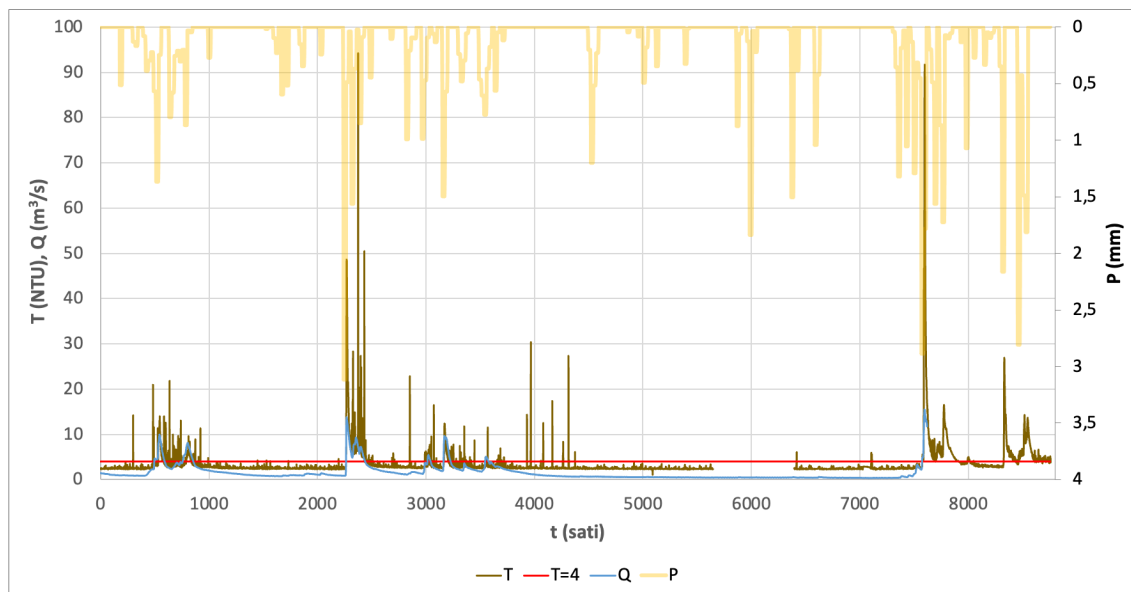
		Min.	Max.	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
Oborine P (mm)	Dugopolje	0,17	76,73	10,24	12,30
Mutnoća T (NTU)	Žrnovnica	0,03	53,40	2,39	4,41
Protok Q (m³/s)		0,32	17,60	1,34	2,06



Slika 38: Vremenski niz satnog protoka (Q) i mutnoće (T) izvora Žrnovnice, te dnevne količine oborina na meteorološkoj postaji Dugopolje (P) za godinu 2018. Crvena linija predstavlja dopuštene vrijednosti mutnoće (T) od 4 NTU. (izradio autor);

Tablica 17: Opće statističke karakteristike vremenske serije (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija) za 2018. godinu. (izradio autor).

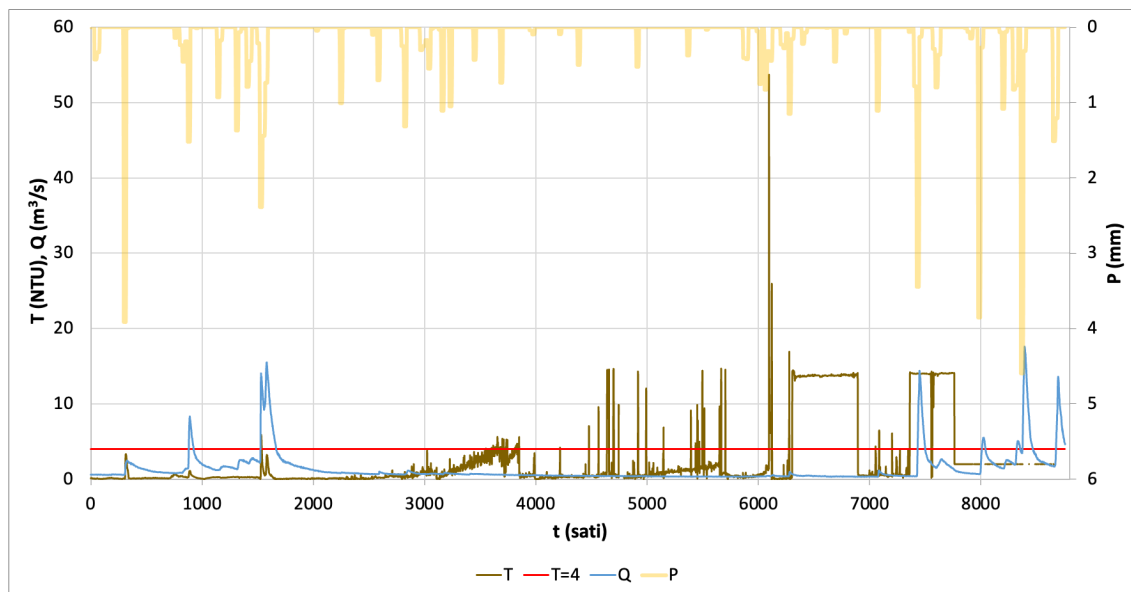
		Min.	Max.	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
Oborine P (mm)	Dugopolje	0,17	51,40	8,78	9,99
Mutnoća T (NTU)	Žrnovnica	1,02	128,14	2,20	3,63
Protok Q (m³/s)		0,30	14,50	2,10	2,48



Slika 39: Vremenski niz satnog protoka (Q) i mutnoće (T) izvora Žrnovnice, te dnevne količine oborina na meteorološkoj postaji Dugopolje (P) za godinu 2019. Crvena linija predstavlja dopuštene vrijednosti mutnoće (T) od 4 NTU. (izradio autor);

Tablica 18: Opće statističke karakteristike vremenske serije (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija) za 2019. godinu. (izradio autor).

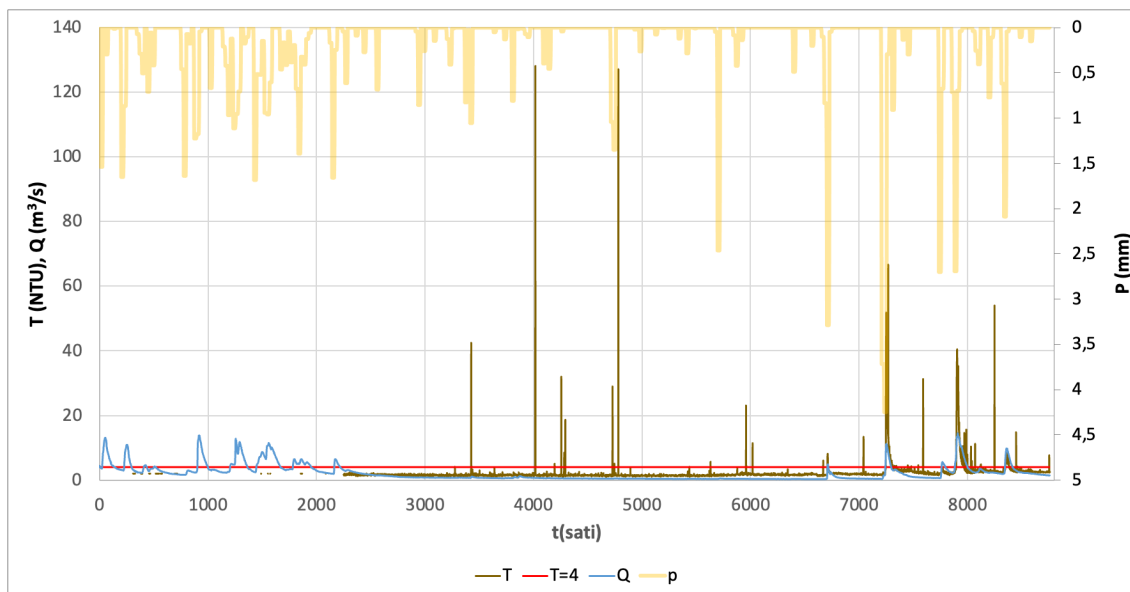
		Min.	Max.	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
Oborine P (mm)	Dugopolje	0,10	52,24	9,40	10,76
Mutnoća T (NTU)	Žrnovnica	1,06	94,26	3,49	3,98
Protok Q (m³/s)		0,34	15,50	1,53	1,84



Slika 40: Vremenski niz satnog protoka (Q) i mutnoće (T) izvora Žrnovnice, te dnevne količine oborina na meteorološkoj postaji Bisko (P) za godinu 2017. Crvena linija predstavlja dopuštene vrijednosti mutnoće (T) od 4 NTU. (izradio autor);

Tablica 19: Opće statističke karakteristike vremenske serije (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija) za 2017. godinu. (izradio autor).

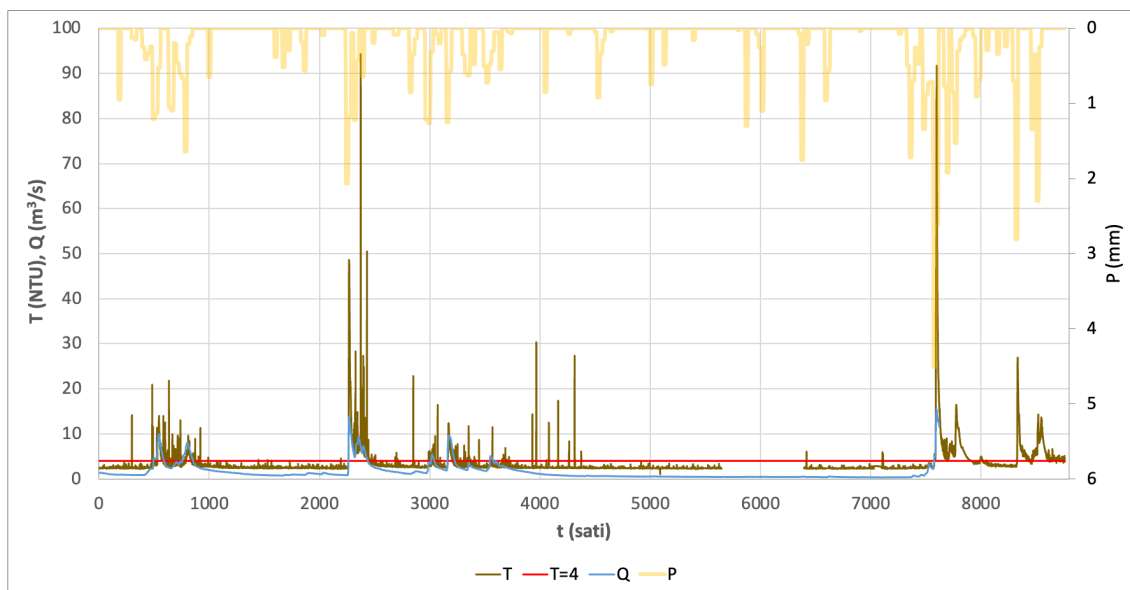
		Min.	Max.	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
Oborine P (mm)	Bisko	0,07	73,67	10,00	13,58
Mutnoća T (NTU)	Žrnovnica	0,03	53,40	2,39	4,41
Protok Q (m³/s)		0,32	17,60	1,34	2,06



Slika 41: Vremenski niz satnog protoka (Q) i mutnoće (T) izvora Žrnovnice, te dnevne količine oborina na meteorološkoj postaji Bisko (P) za godinu 2018. Crvena linija predstavlja dopuštene vrijednosti mutnoće (T) od 4 NTU. (izradio autor);

Tablica 20: Opće statističke karakteristike vremenske serije (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija) za 2017. godinu. (izradio autor).

		Min.	Max.	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
Oborine P (mm)	Bisko	0,03	97,73	9,54	13,07
Mutnoća T (NTU)	Žrnovnica	1,02	128,14	2,20	3,63
Protok Q (m³/s)		0,30	14,50	2,10	2,48



Slika 42: Vremenski niz satnog protoka (Q) i mutnoće (T) izvora Žrnovnice, te dnevne količine oborina na meteorološkoj postaji Bisko (P) za godinu 2019. Crvena linija predstavlja dopuštene vrijednosti mutnoće (T) od 4 NTU. (izradio autor);

Tablica 21: Opće statističke karakteristike vremenske serije (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija) za 2017. godinu. (izradio autor).

		Min.	Max.	Srednja vrijednost	Standardna devijacija
Oborine P (mm)	Bisko	0,03	81,60	10,57	12,33
Mutnoća T (NTU)	Žrnovnica	1,06	94,26	3,49	3,98
Protok Q (m³/s)		0,34	15,50	1,53	1,84

Tablica 22: Varijable mutnoće, protoka i oborina, te puni nazivi kratica [22].

Varijable mutnoće	Varijable protoka	Varijable oborina
Maksimalna mutnoća tijekom događaja u kojem je $T_k > 4 \text{ NTU}$ - $T_{\text{emax}} \text{ (NTU)}$	Maksimalni protok tijekom događaja u kojem je $T_k > 4 \text{ NTU}$ - $Q_{\text{emax}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	Trajanje oborinskog događaja koji prethodi T_e - $t_{bT_e} \text{ (h)}$
Trajanje događaja u kojem je $T_k > 4 \text{ NTU}$ - $t_e \text{ (h)}$	Vrijeme od početka oborina do pojave Q_{emax} - $t_{bQ_{\text{emax}}} \text{ (h)}$	Kumulativa količina oborina prije početka T_e - $P_{cT_e} \text{ (mm)}$
Vrijeme od početka oborina do pojave T_{emax} - $t_{bT_{\text{emax}}} \text{ (h)}$		Kumulativna količina oborina prije pojave Q_{emax} - $P_{cQ_{\text{emax}}} \text{ (mm)}$
		Intezitet oborina prije početka T_e - $i_{bT_e} \text{ (mm/h)}$
		Intezitet oborina prije pojave Q_{emax} - $i_{bQ_{\text{emax}}} \text{ (mm/h)}$

7.2.Rezultati

7.2.1. Opće karakteristike analiziranih događaja: oborine na meteorološkoj postaji Dugopolje, protok i mutnoća izvora Žrnovnica

Opće karakteristike analiziranih događaja prikazane su u tablici 23 (2017. godinu), tablici 24 (2018. godinu) i tablici 25 (2019. godinu). Dvije kišne pojave proizvele su prekomjernu mutnoću zimi, devet njih u jesen, tri u proljeće i tri u ljeto..

Što se tiče varijabli koje opisuju hidrološke uvjete prije prekoračenja mutnoće t_{bTe} varirao je između 14 i 321 h. Događaj 11 bio je s najkraćom vrijednošću, a poddogađaj 2 događaja 2 s najdužom vrijednošću. Treba napomenuti da se događaji 1, 2 i 7 sastoje od dva poddogađaja, a događaj 4 od 3 poddogađaja. Vrijednosti kumulativne oborine prije prekoračenja mutnoće P_{cTe} , iznosio je 128,90 mm i bile su najveće vrijednosti tijekom cijelog analiziranog razdoblja. Minimalna kumulativna oborina koja je proizvela prekoračenje mutnoće P_{cTe} , iznosila je 11,40 mm i pojavila se tijekom događaja 1. Minimalna i maksimalna vrijednost intenziteta oborina prije prekoračenja mutnoće i_{bTe} , pojavile su se u 2017. i 2018. godini, odnosno minimum od 0,04 mm/h pojavio se tijekom događaja 2 u 2017. godini, a maksimum od 1,85 mm/h pojavio se tijekom događaja 6 u 2018. godini. Minimalna vrijednost vršnog protoka koja je proizvela prekoračenje mutnoće Q_{emax} , iznosila je 0,41 m³/s i pojavila se tijekom događaja 2.

Tablica 23: Opće karakteristike analiziranih događaja za meteorološku postaju Dugopolje u 2017.g. (izradio autor).

Oborinski događaj	Početak oborinskog događaja	t_{bT_e} (h)	Početak mutnoće T_e	t_e (h)	$T_{e_{max}}$ (h)	$Q_{e_{max}}$ (m^3/s)	P_{cT_e} (mm)	$P_{cQ_{e_{max}}}$ (mm)	i_{bT_e} (mm/h)	$i_{bQ_{e_{max}}}$ (mm/h)	$t_{bT_{e_{max}}}$ (h)	$t_{bQ_{e_{max}}}$ (h)
1	03. lipnja	18	04. lipnja 01:00	10	5,38	0,64	11,4	14,09	0,63	0,61	21	23
	03. lipnja	54	05. lipnja 13:00	13	5,269	0,61	16,1	16,1	0,30	0,29	59	56
2	02. srpnja	265	13. srpnja 08:00	19	14,521	0,44	12,1	12,1	0,05	0,04	276	281
	02. srpnja	321	15. srpnja 16:00	7	14,578	0,41	12,1	12,1	0,04	0,04	326	322
3	10. rujna	41	12. rujna 00:00	24	53,402	0,46	17,13	18,8	0,42	0,41	42	46
4	05. studenog	79	08. studenog 18:00	39	14,075	7,22	128,9	128,9	1,63	1,53	109	84
	05. studenog	119	10. studenog 10:00	18	13,986	2,55	128,9	128,9	1,08	0,98	136	131
	05. studenog	144	11. studenog 21:00	6	14,069	2,08	128,9	128,9	0,90	0,81	145	159
5	12. studenog	80	15. studenog 22:00	109	14,115	2,55	35,97	36,5	0,45	0,41	146	88

Tablica 24: Opće karakteristike analiziranih događaja za meteorološku postaju Dugopolje u 2018.g. (izradio autor).

Oborinski događaj	Početak oborinskog događaja	t_{bTe} (h)	Početak mutnoće T_e	t_e (h)	T_{emax} (h)	Q_{emax} (m^3/s)	P_{cTe} (mm)	P_{cQemax} (mm)	i_{bTe} (mm/h)	i_{bQemax} (mm/h)	t_{bTemax} (h)	t_{bQemax} (h)
6	28. listopada	40	29. listopada 23:00	56	66,668	11,2	73,94	94	1,85	1,07	63	88
7	24. studenog	41	26. studenog 00:00	66	40,468	14,5	62,87	91,24	1,53	1,90	50	48
	24. studenog	109	28. studenog 20:00	9	14,61	7,66	105,2	105,2	0,97	0,96	117	110
8	13. prosinca	37	14. prosinca 20:00	37	8,313	9,77	38,15	60,47	1,03	1,26	50	48

Tablica 25: Opće karakteristike analiziranih događaja za meteorološku postaju Dugopolje u 2019.g. (izradio autor).

Oborinski događaj	Početak oborinskog događaja	t_{bTe} (h)	Početak mutnoće T_e	t_e (h)	T_{emax} (h)	Q_{emax} (m^3/s)	P_{cTe} (mm)	P_{cQemax} (mm)	i_{bTe} (mm/h)	i_{bQemax} (mm/h)	t_{bTemax} (h)	t_{bQemax} (h)
9	17. siječnja	139	23. siječnja 02:00	49	13,996	9,95	63,17	71,71	0,45	0,47	155	152
10	27. siječnja	158	02. veljače 21:00	47	9,607	8,06	68,33	77,03	0,43	0,45	180	170
11	12. svibnja	14	12. svibnja 21:00	43	12,367	9,62	20,94	28,42	1,50	1,42	20	20
12	08. studenog	106	12. studenog 16:00	46	91,671	15,5	81,28	130,62	0,77	1,04	129	126

7.2.2. Opće karakteristike analiziranih događaja: oborine na meteorološkoj postaji Bisko, protok i mutnoća izvora Žrnovnica

Opće karakteristike analiziranih događaja prikazane su u tablici 26 (2017. godinu), tablici 27 (2018. godinu) i tablici 28 (2019. godinu). Dvije kišne pojave proizvele su prekomjernu mutnoću zimi, devet njih u jesen, tri u proljeće i tri u ljeto.

Što se tiče varijabli koje opisuju hidrološke uvjete prije prekoračenja mutnoće t_{bTe} varirao je između 14 i 321 h. Događaj 11 bio je s najkraćom vrijednošću, a poddogađaj 2 događaja 2 s najdužom vrijednošću. Treba napomenuti da se događaji 1, 2 i 7 sastoje od dva poddogađaja, a događaj 4 od 3 poddogađaja. Vrijednosti kumulativne oborine prije prekoračenja mutnoće P_{cTe} , iznosio je 152,95 mm i bile su najveće vrijednosti tijekom cijelog analiziranog razdoblja. Minimalna kumulativna oborina koja je proizvela prekoračenje mutnoće P_{cTe} , iznosila je 12,00 mm i pojavila se tijekom događaja 2. Minimalna i maksimalna vrijednost intenziteta oborina prije prekoračenja mutnoće i_{bTe} , pojavile su se u 2017. i 2019. godini, odnosno minimum od 0,04 mm/h pojavio se tijekom događaja 2 u 2017. godini, a maksimum od 3,82 mm/h pojavio se tijekom događaja 6 u 2018. godini. Minimalna vrijednost vršnog protoka koja je proizvela prekoračenje mutnoće Q_{emax} , iznosila je 0,41 m³/s i pojavila se tijekom događaja 2.

Tablica 26: Opće karakteristike analiziranih događaja za meteorološku postaju Bisko u 2017.g. (izradio autor).

Oborinski događaj	Početak oborinskog događaja	t_{bTe} (h)	Početak mutnoće T_e	t_e (h)	T_{emax} (h)	Q_{emax} (m^3/s)	P_{cTe} (mm)	P_{cQemax} (mm)	i_{bTe} (mm/h)	i_{bQemax} (mm/h)	t_{bTemax} (h)	t_{bQemax} (h)
1	03. lipnja	18	04. lipnja 01:00	10	5,38	0,64	13,28	15,49	0,74	0,67	21	23
	03. lipnja	54	05. lipnja 13:00	13	5,269	0,61	17,7	17,7	0,33	0,32	59	56
2	02. srpnja	265	13. srpnja 08:00	19	14,521	0,44	12	12	0,05	0,04	276	281
	02. srpnja	321	15. srpnja 16:00	7	14,578	0,41	12	12	0,04	0,04	326	322
3	10. rujna	41	12. rujna 00:00	24	53,402	0,46	24,97	26,23	0,61	0,57	42	46
4	05. studenog	79	08. studenog 18:00	39	14,075	7,22	104,6	104,6	1,32	1,25	109	84
	05. studenog	119	10. studenog 10:00	18	13,986	2,55	104,6	104,6	0,88	0,80	136	131
	05. studenog	144	11. studenog 21:00	6	14,069	2,08	104,6	104,6	0,73	0,66	145	159
5	12. studenog	80	15. studenog 22:00	109	14,115	2,55	34,9	34,9	0,44	0,40	146	88

Tablica 27: Opće karakteristike analiziranih događaja za meteorološku postaju Bisko u 2018.g. (izradio autor).

Oborinski događaj	Početak oborinskog događaja	t_{bTe} (h)	Početak mutnoće T_e	t_e (h)	T_{emax} (h)	Q_{emax} (m^3/s)	P_{cTe} (mm)	P_{cQemax} (mm)	i_{bTe} (mm/h)	i_{bQemax} (mm/h)	t_{bTemax} (h)	t_{bQemax} (h)
6	28. listopada	40	29. listopada 23:00	56	66,668	11,2	152,95	165,7	3,82	1,88	63	88
7	24. studenog	41	26. studenog 00:00	66	40,468	14,5	60,17	85,88	1,47	1,79	50	48
8	24. studenog	109	28. studenog 20:00	9	14,61	7,66	99,3	99,3	0,91	0,90	117	110
	13. prosinca	37	14. prosinca 20:00	37	8,313	9,77	39,85	60,73	1,08	1,27	50	48

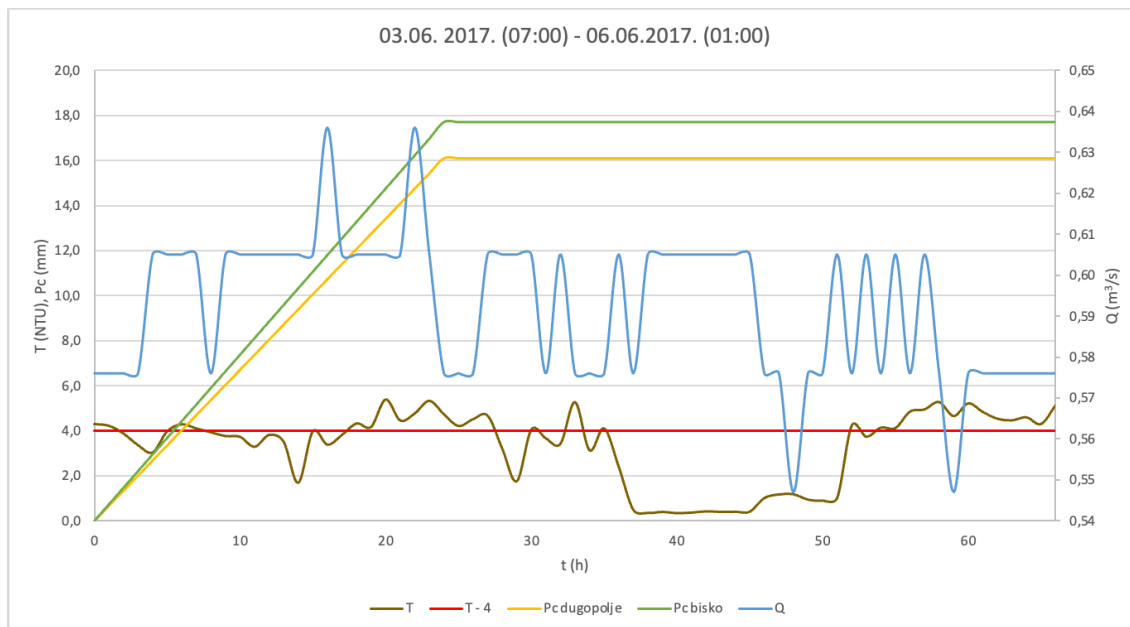
Tablica 28: Opće karakteristike analiziranih događaja za meteorološku postaju Bisko u 2019.g. (izradio autor).

Oborinski događaj	Početak oborinskog događaja	t_{bTe} (h)	Početak mutnoće T_e	t_e (h)	T_{emax} (h)	Q_{emax} (m^3/s)	P_{cTe} (mm)	P_{cQemax} (mm)	i_{bTe} (mm/h)	i_{bQemax} (mm/h)	t_{bTemax} (h)	t_{bQemax} (h)
9	17. siječnja	139	23. siječnja 02:00	49	13,996	9,95	79,17	89,15	0,57	0,59	155	152
10	27. siječnja	158	02. veljače 21:00	47	9,607	8,06	119,14	137,2	0,75	0,81	180	170
11	12. svibnja	14	12. svibnja 21:00	43	12,367	9,62	15,3	22,58	1,09	1,13	20	20
12	08. studenog	106	12. studenog 16:00	46	91,671	15,5	128,58	206,68	1,21	1,64	129	126

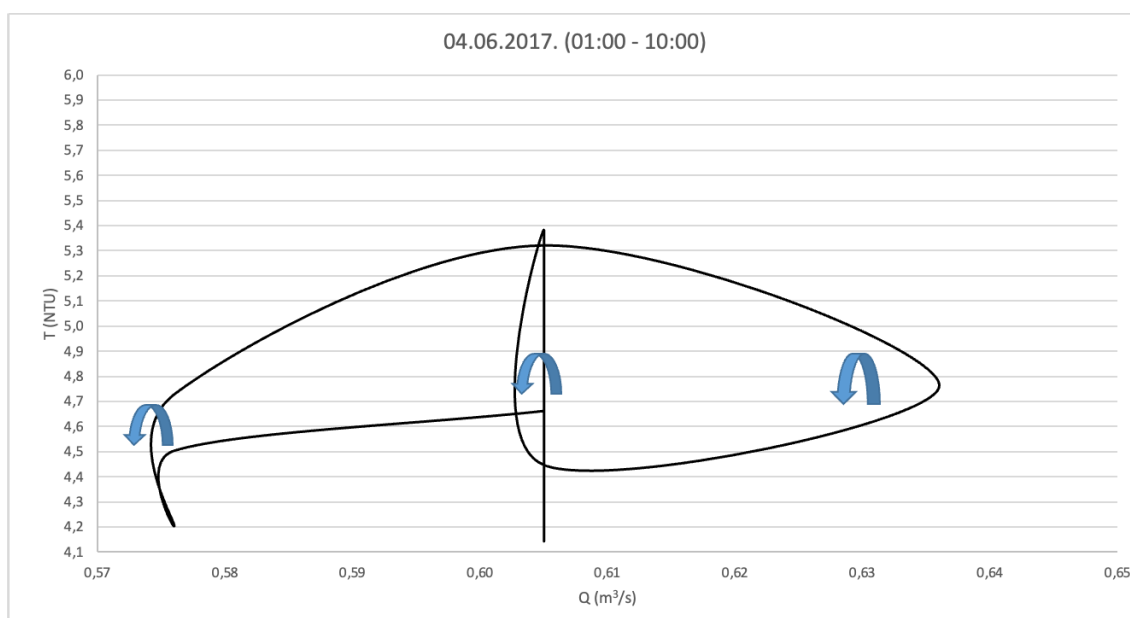
Kada govorimo o varijablama koje opisuju slučaj prekoračenja mutnoće, može se primijetiti da je trajanje prekoračenja mutnoće t_e variralo između 6 i 109 h. Događaj s trajanjem od 46 h započeo je 12. studenog 2019. (događaj 12) gdje je zabilježen maksimalni protok $Q_{e\max}$ od 15,50 m³/s. Vrijeme od početka padalina do najveće mutnoće $t_{bT_{e\max}}$, općenito je vrlo slično vremenu od početka padalina do pojave najvećeg protoka $t_{bQ_{e\max}}$. U većini slučajeva prosječna vremenska razlika između $t_{bT_{e\max}}$ i $t_{bQ_{e\max}}$ iznosi od 0 do 20. Događaj padalina s najdužom vremenskom razlikom od 58 h je događaj 5.

Grafički prikazi vremenskih nizova mutnoće, protoka i kumulativne padaline za svaki događaj i dobivenih petlji $T_e - Q$ histereze prikazani su na slikama 43 - 71.

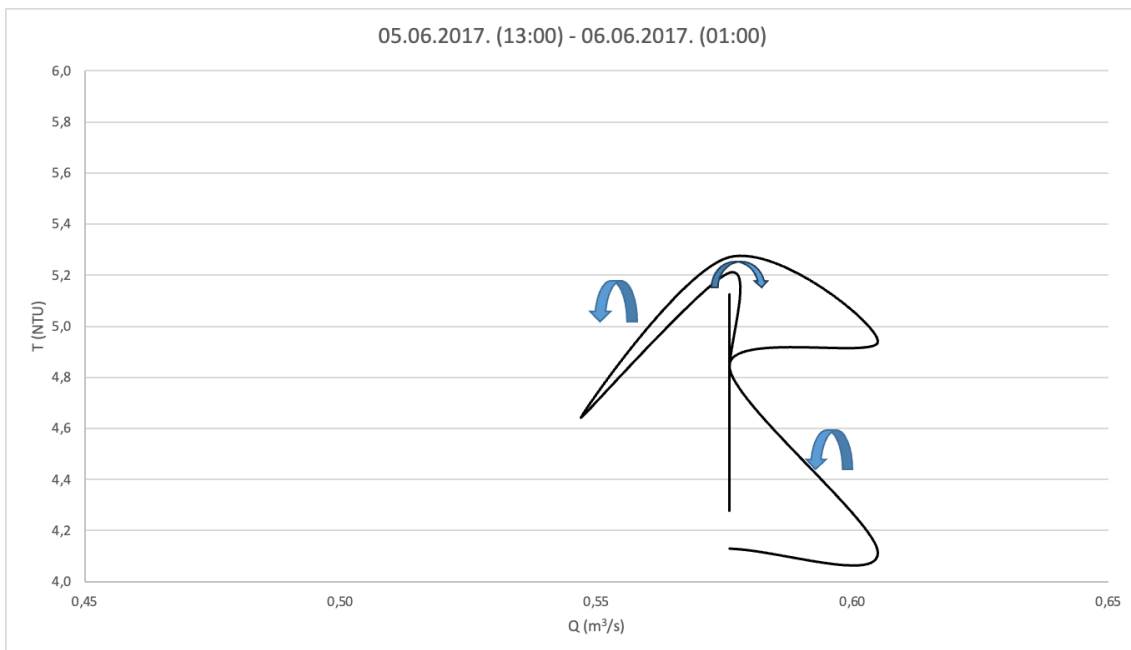
7.3. Dijagrami vremenskih serija (protok, mutnoća i kumulativna oborina) i histereznih petlji za 2017. godinu



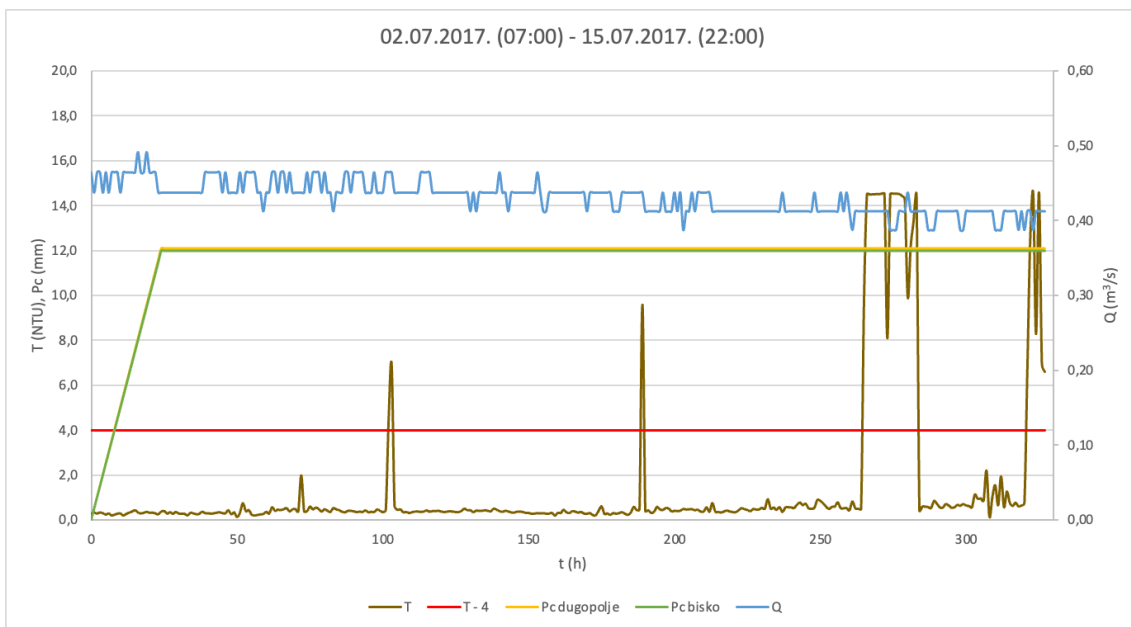
Slika 43: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2017., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);



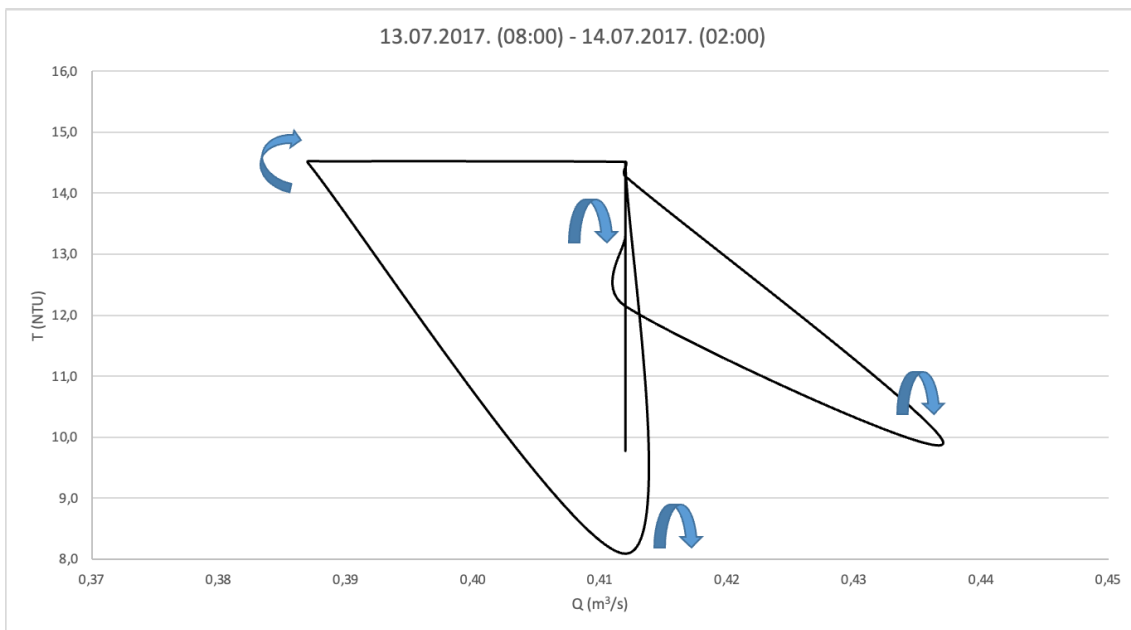
Slika 44: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za poddogađaj 1 događaja 1. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);



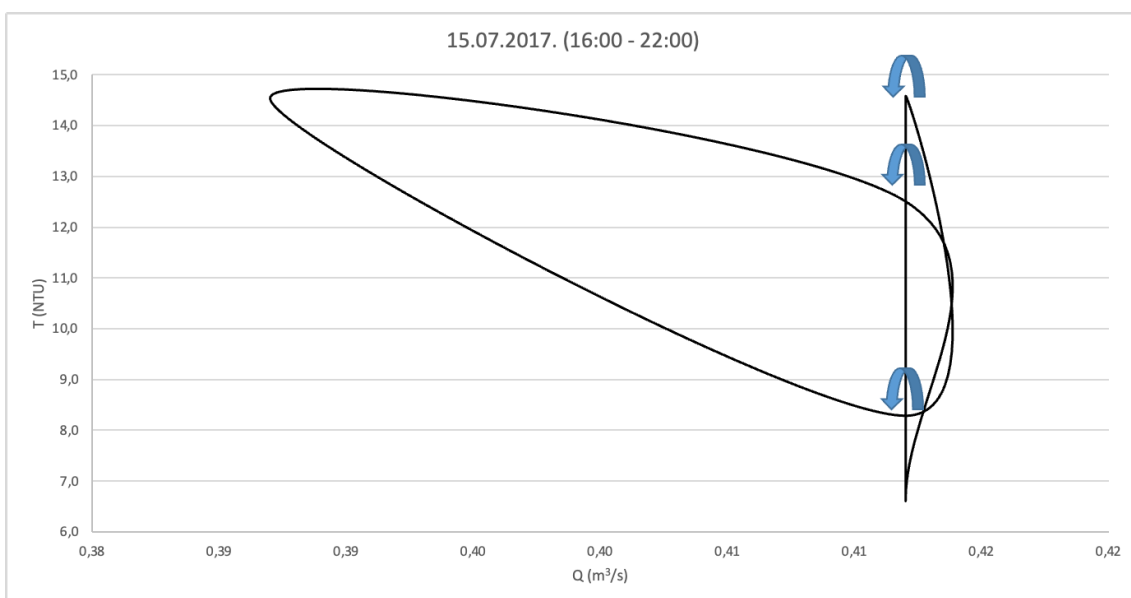
Slika 45: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za poddogađaj 2 događaja 1. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);



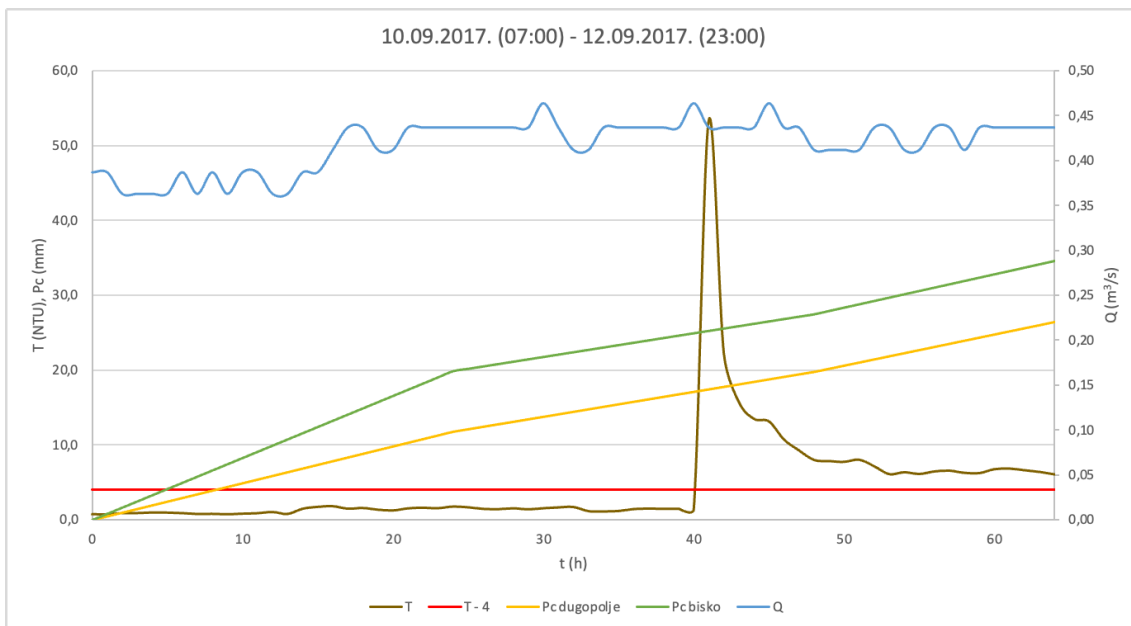
Slika 46: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2017., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);



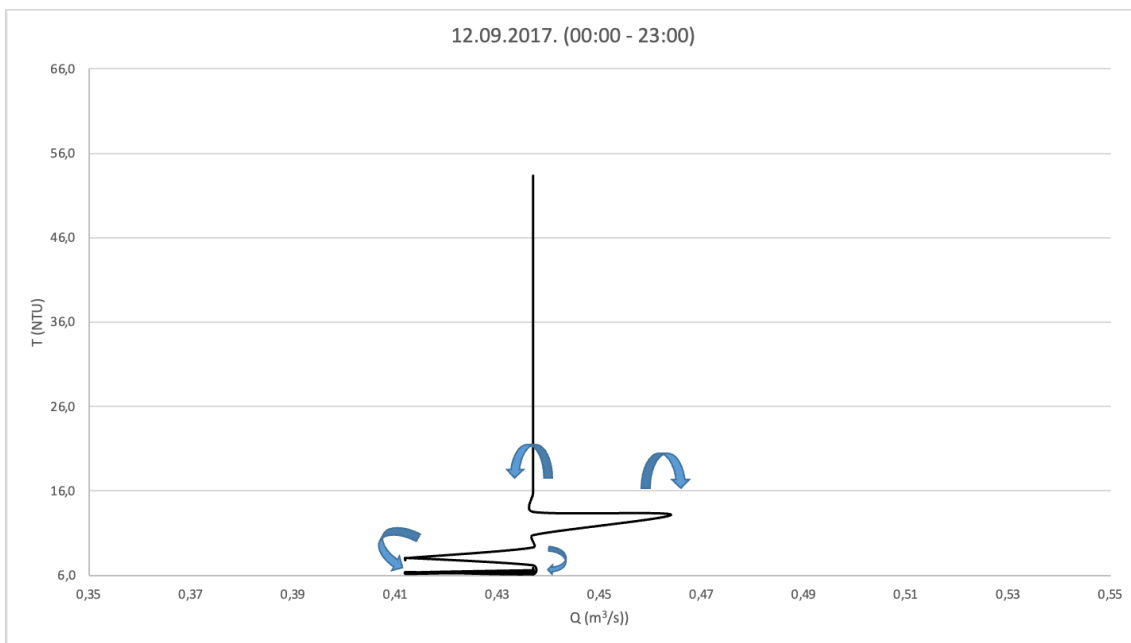
Slika 47: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za poddogađaj 1 događaja 2. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);



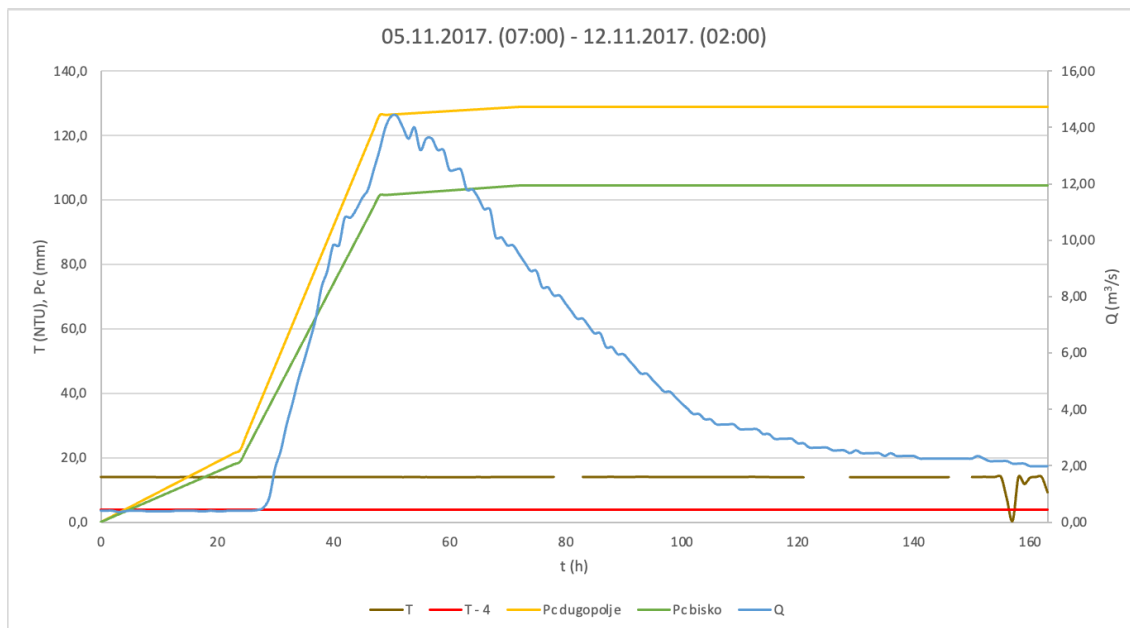
Slika 48: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za poddogađaj 2 događaja 2. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);



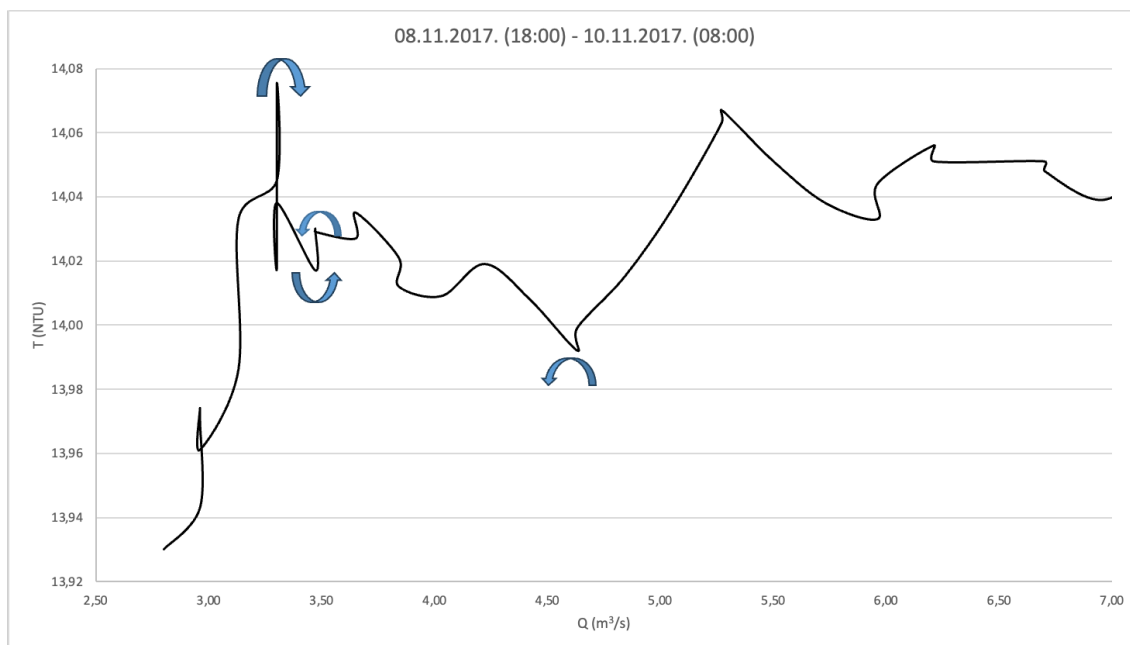
Slika 49: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2017., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);



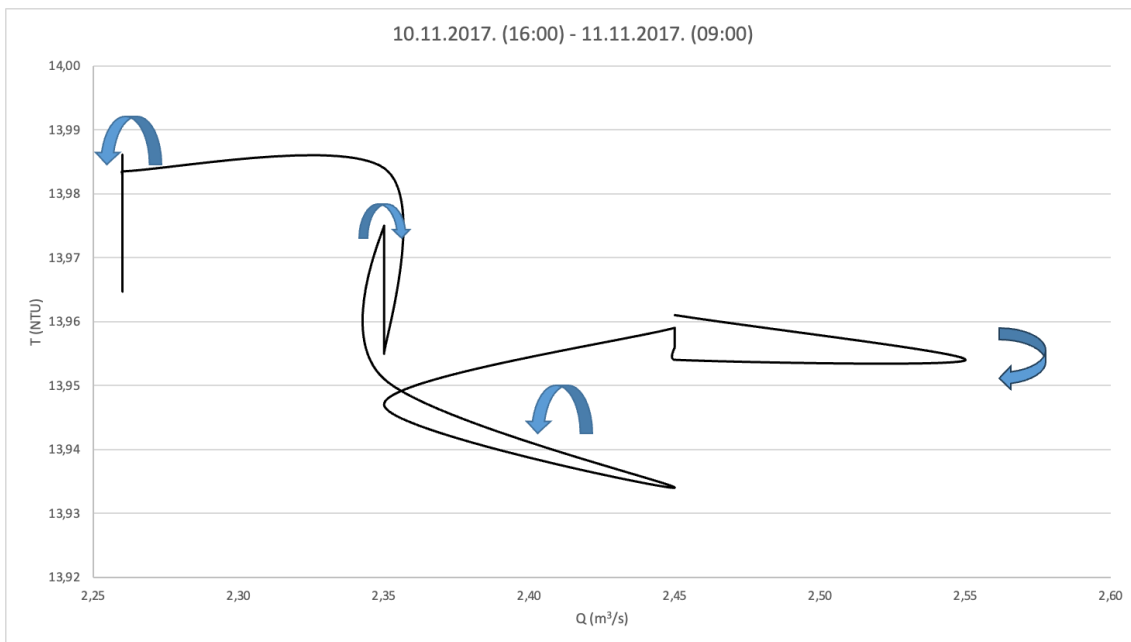
Slika 50: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za događaj 3. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);



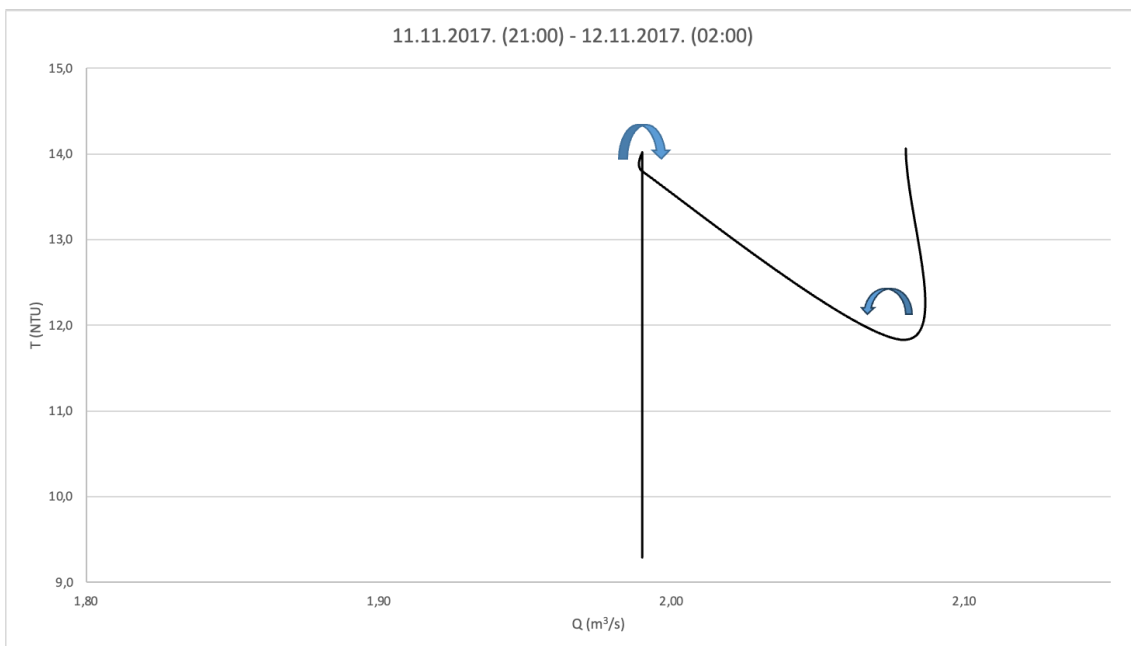
Slika 51: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2017., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);



Slika 52: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za poddogađaj 1 događaja 4. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);



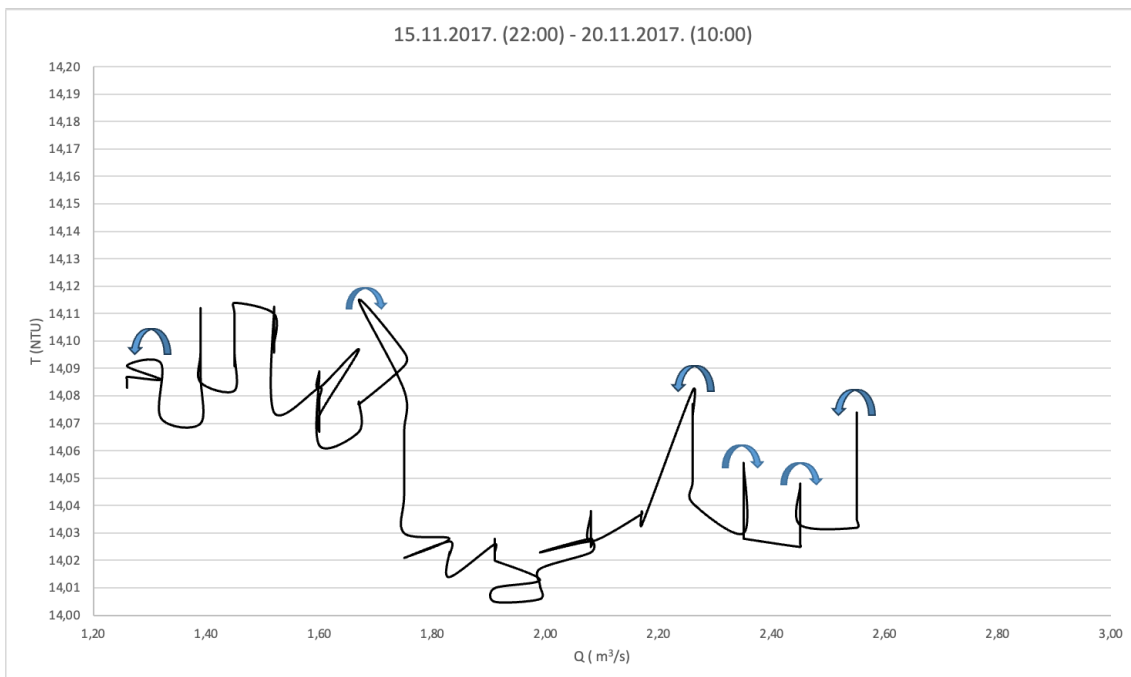
Slika 53: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za poddogađaj 2 događaja 4. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);



Slika 54: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za poddogađaj 3 događaja 4. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);

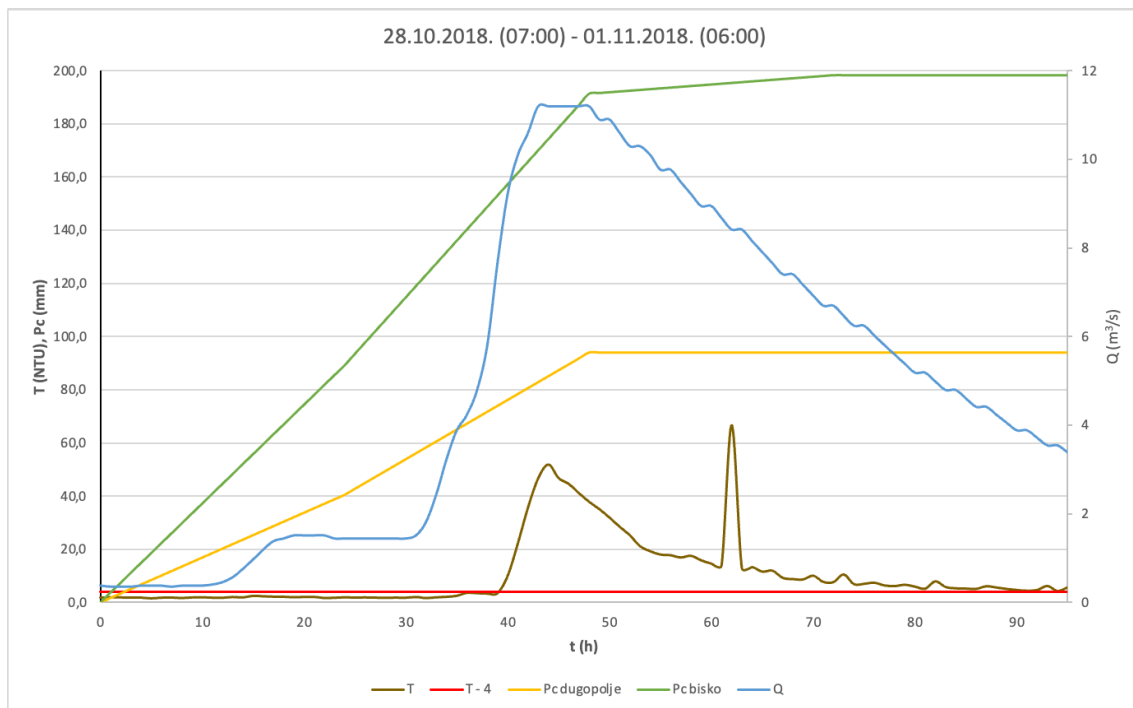


Slika 55: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2017., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);

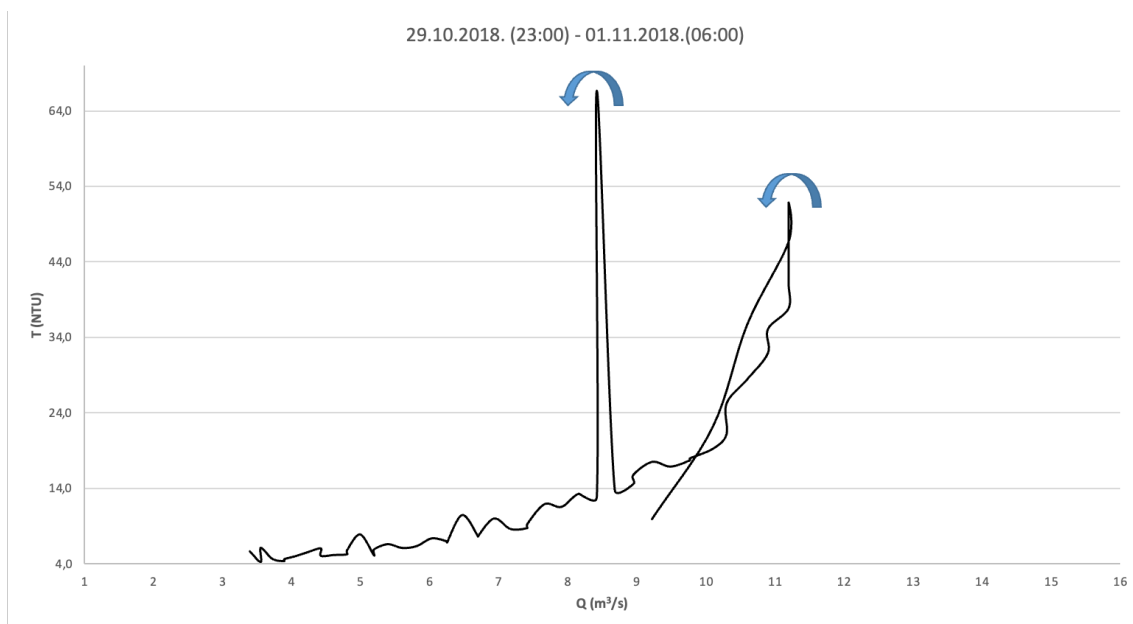


Slika 56: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te - Q) za događaja 5. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);

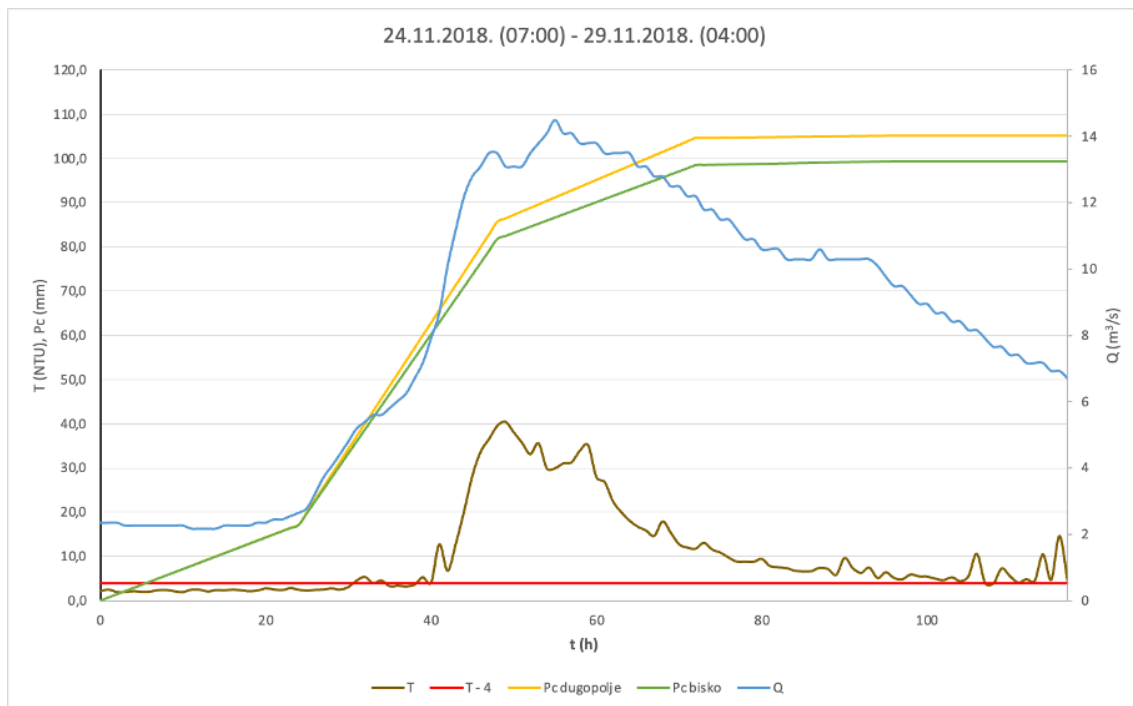
7.4. Dijagrami vremenskih serija (protok, mutnoća i kumulativna oborina) i histereznih petlji za 2018. godinu



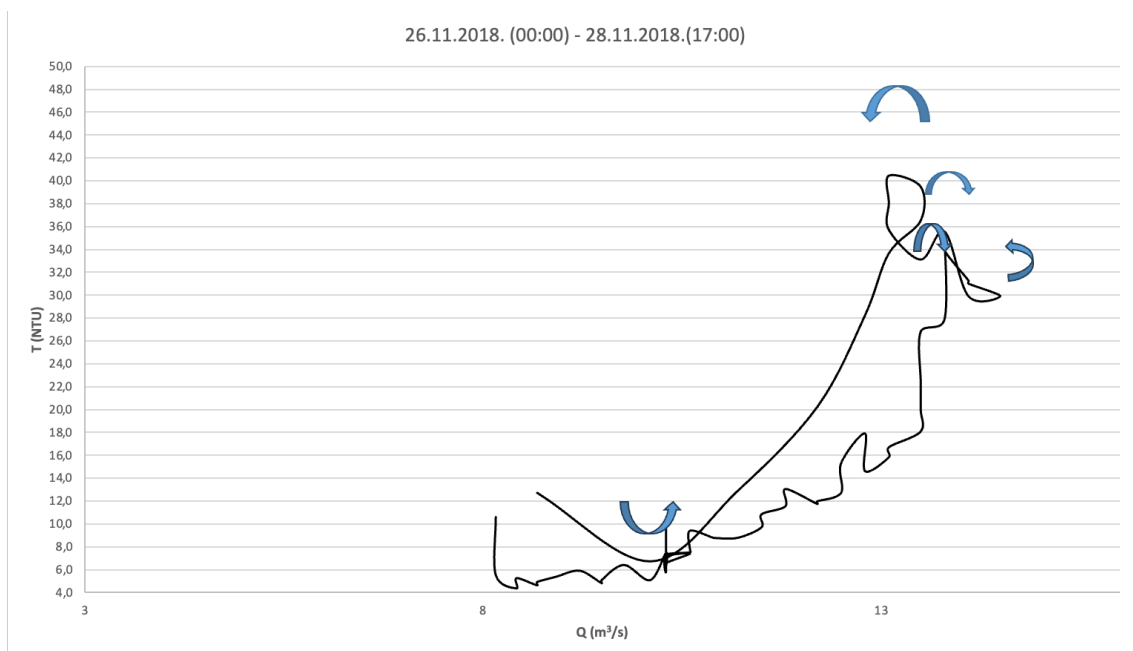
Slika 57: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2018., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);



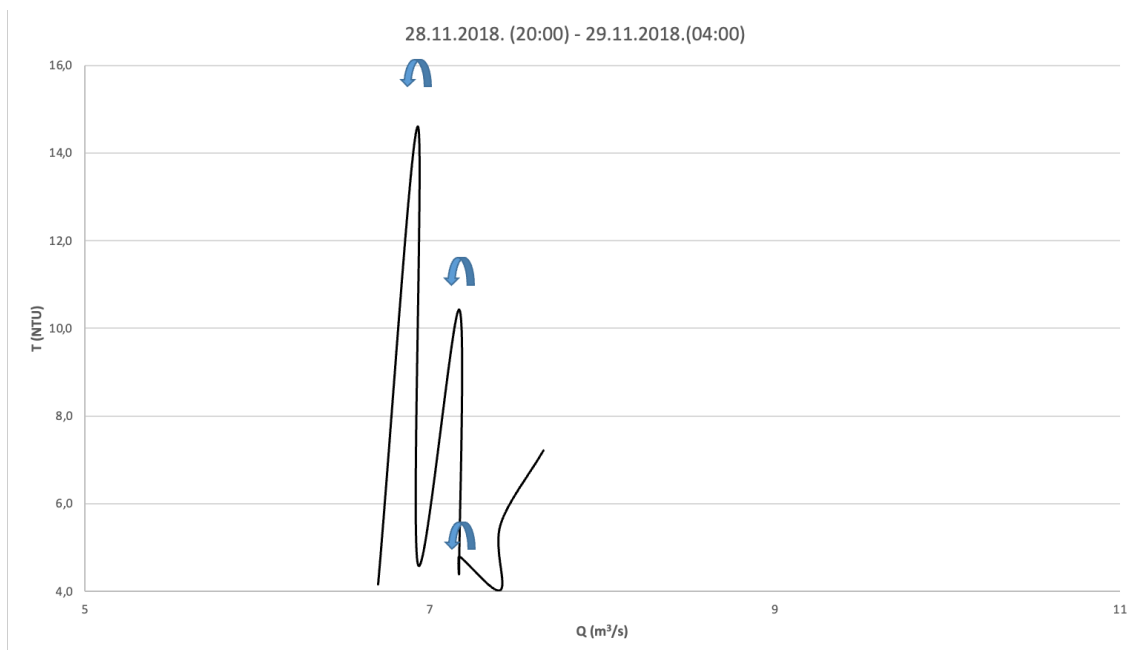
Slika 58: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za događaj 6. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);



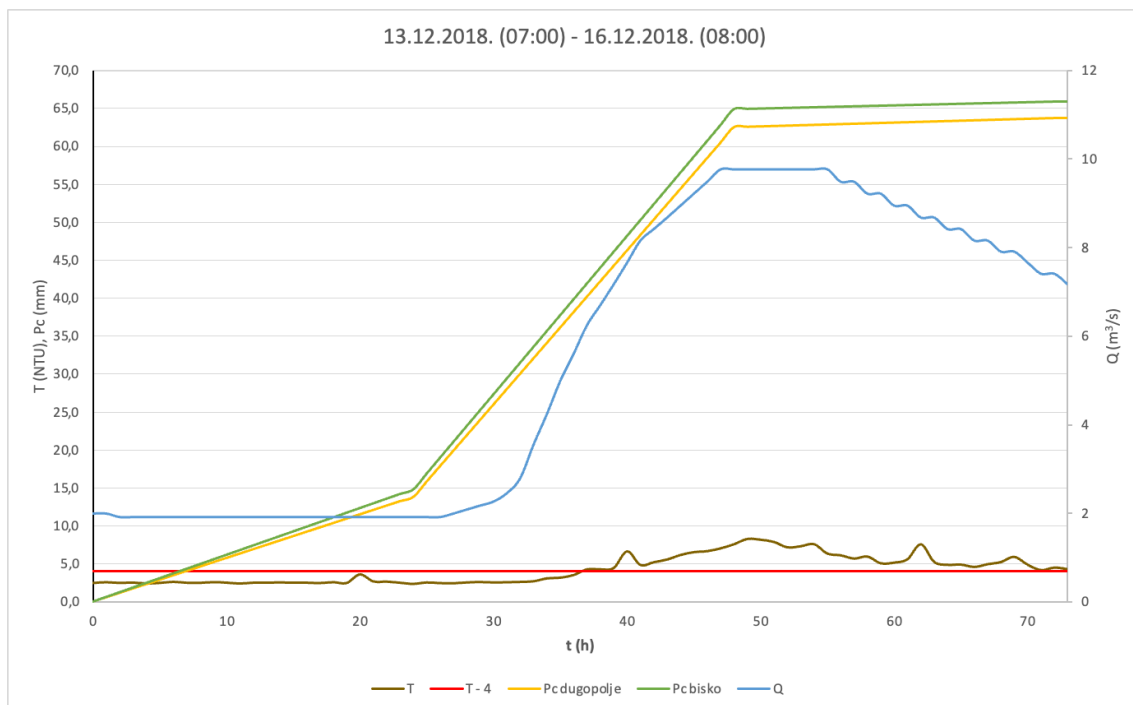
Slika 59: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2018, s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);



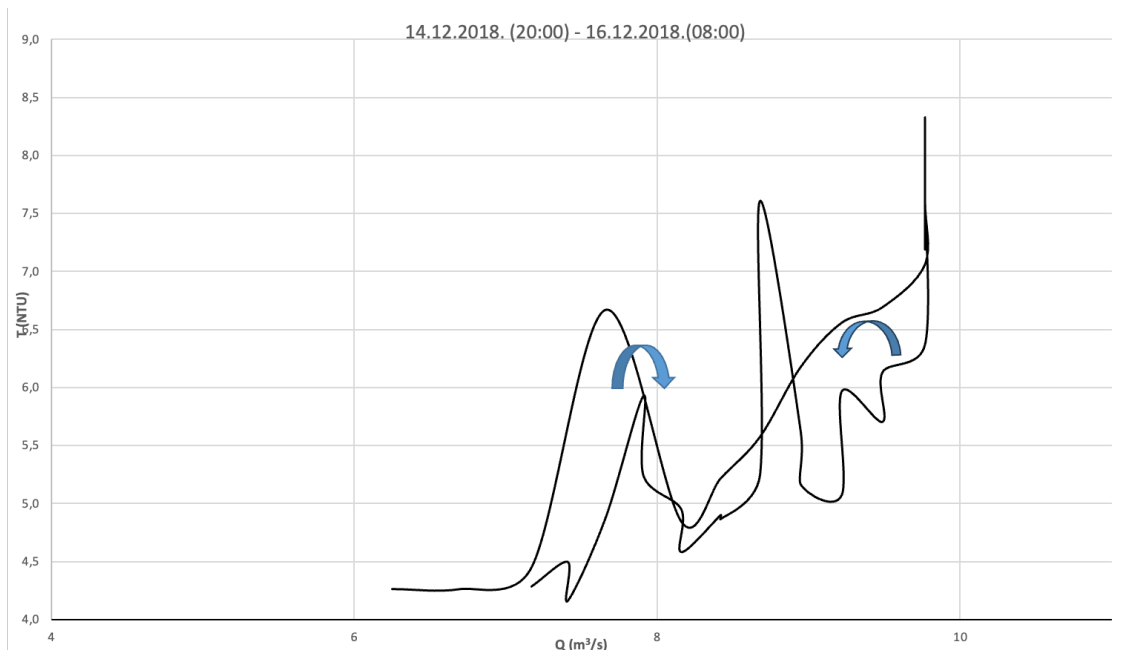
Slika 60: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za poddogađaj 1 događaja 7. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);



Slika 61: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za poddogađaj 2 događaja 7. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);

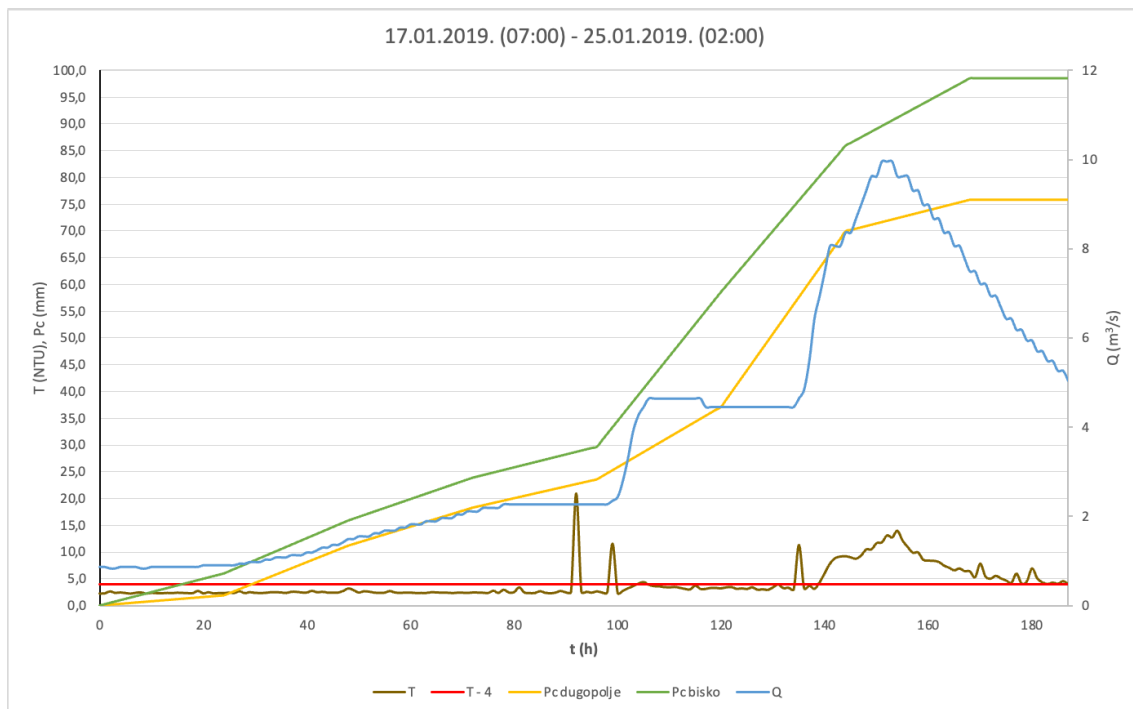


Slika 62: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2018., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);

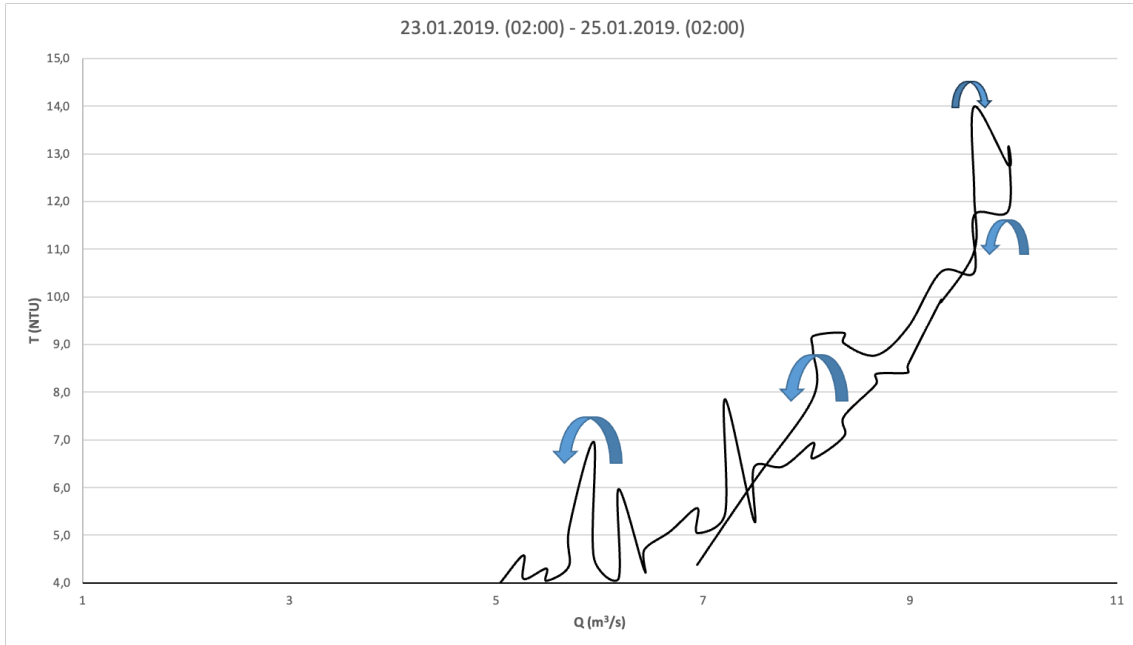


Slika 63: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za događaj 8. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);

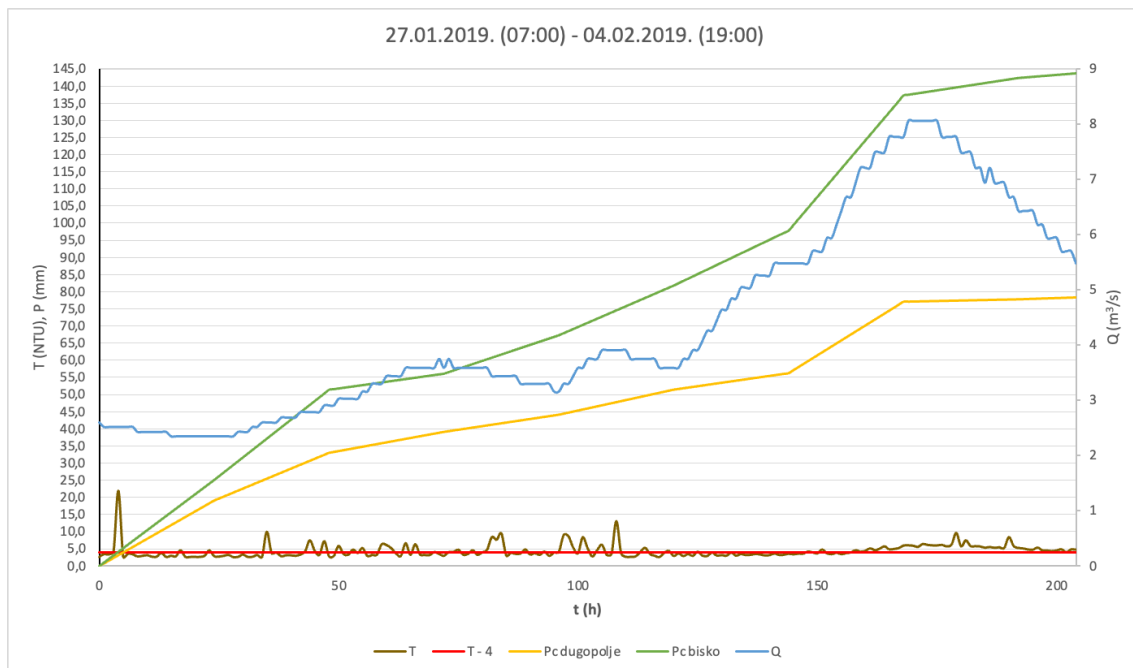
7.5. Dijagrami vremenskih serija (protok, mutnoća i kumulativna oborina) i histereznih petlji za 2019. godinu



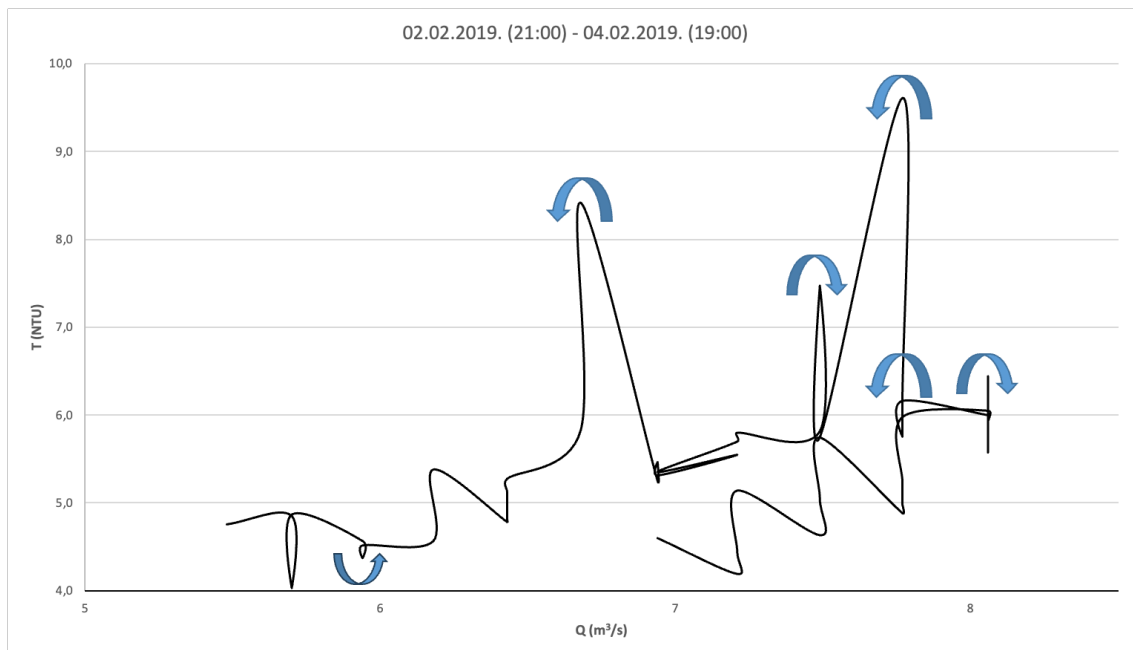
Slika 64: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2019., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);



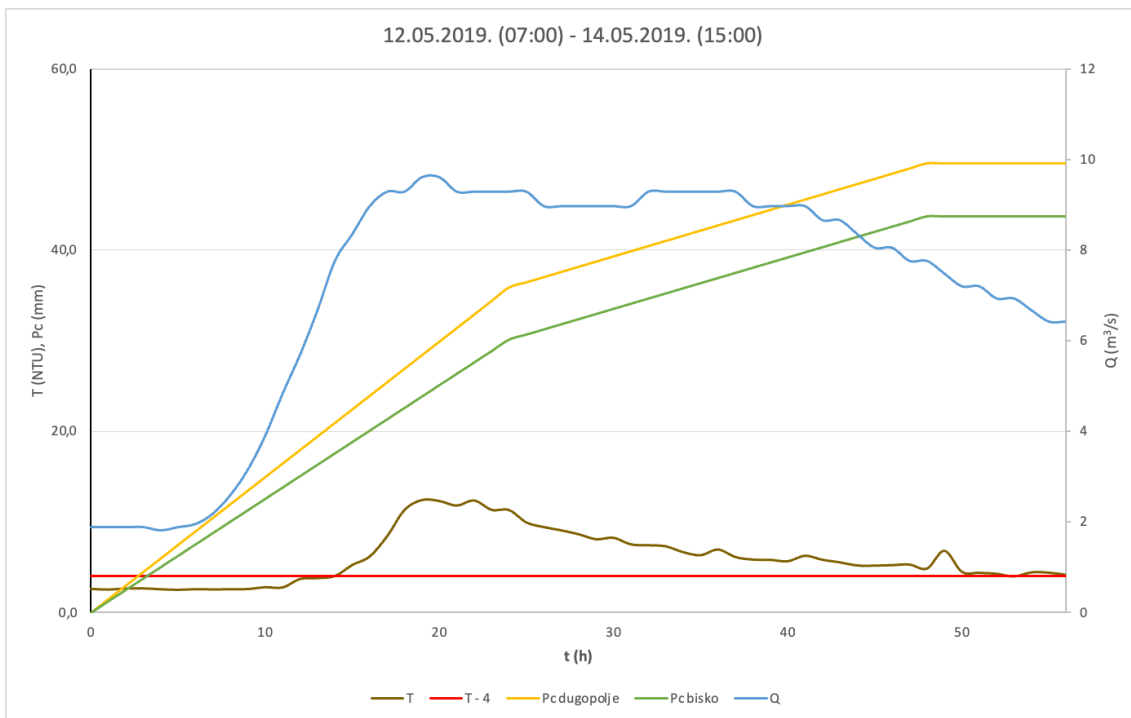
Slika 65: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za događaj 9. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);



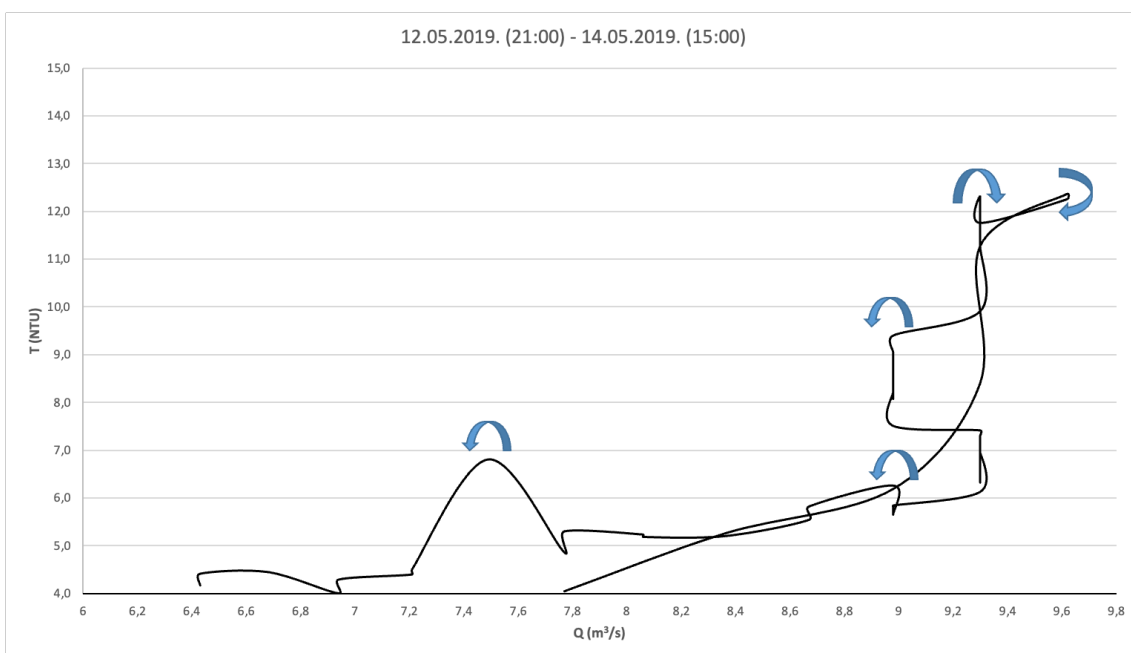
Slika 66: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2019., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);



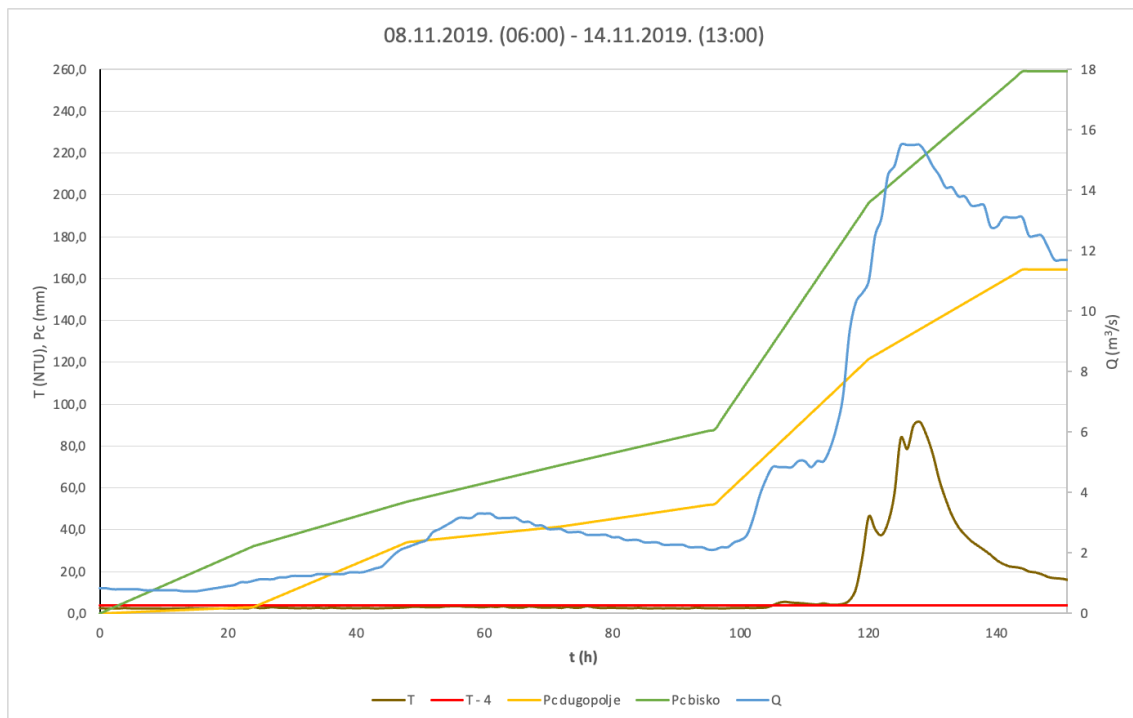
Slika 67: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (Te) u odnosu na protok (Q) (Te-Q) za događaj 10. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);



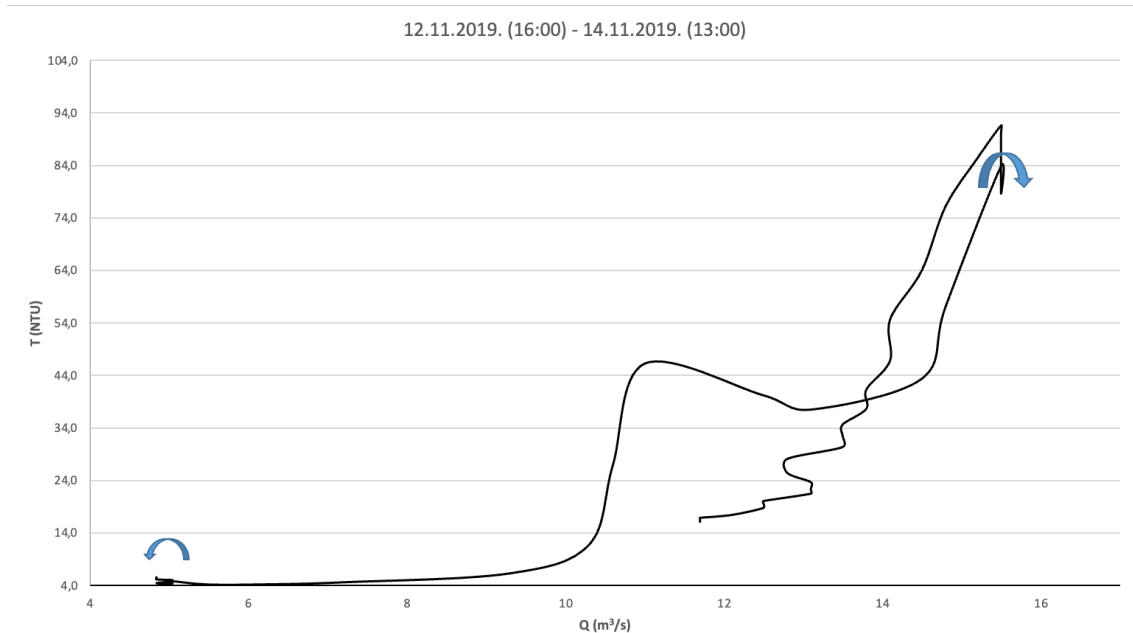
Slika 68: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2019., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);



Slika 69: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za događaj 11. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);



Slika 70: Prikaz vremenskih nizova satne mutnoće (T), protoka (Q) i kumulativne količine oborina za oborinske događaje s prekoračenjem mutnoće u 2019., s datumima početka i završetka svakog događaja. (izradio autor);



Slika 71: Prikaz dijagrama histereze prekoračenja mutnoće (T_e) u odnosu na protok (Q) (T_e - Q) za događaj 12.. Dominantni smjerovi histereze označeni su strelicama. (izradio autor);

Pregled svih tipova petlje histereze dobivenih za analizirane događaje prikazan je u tablici 29 gdje $\Delta_{T_{\text{emax}}, Q_{\text{emax}}}$ predstavljaju vremensku razliku između $t_{bT_{\text{emax}}}$ i $t_{bQ_{\text{emax}}}$ tako da ima predznak ovisno o tome je li Q_{emax} postignut prvi ili ne.

Petlje histereze u obliku osmice (Klasa V) javile su se samo jednom (događaj 12). Vrijednost Q_{emax} iznosi je 15,50 m³/s, a T_{emax} 91,67 NTU. Vremenska razlika vrhova $\Delta_{T_{\text{emax}}, Q_{\text{emax}}}$ je - 4 h.

Kompleksne petlje histereze pokazale su se u 11 događaja od kojeg su 9 poddogađaji događaja 1, 2, 4 i 7. Vremenska razlika vrhova varira od 0 do 66 h. Maksimalna mutnoća T_{emax} javlja se u događaju 12 gdje iznosi 91,67 NTU.

Vrste petlje opisane su kao: u smjeru kazaljke na satu, u smjeru suprotno od kazaljke na satu, osmica i kompleksna petlja. Vremenska razlika između T_{emax} i Q_{emax} označena je s $\Delta_{T_{emax}, Q_{emax}}$.

Tablica 29: Pregled svih tipova petlji histereze s njihovim općim karakteristikama za svaki oborinski događaj s prekoračenjem mutnoće tijekom razdoblja istraživanja 2017. - 2019. (izradio autor).

Godine	Događaji	Početak i završetak mutnoće T_e	t_e (h)	T_{emax} (h)	Q_{emax} (m ³ /s)	$\Delta_{T_{emax}, Q_{emax}}$	Vrste petlji	
2017	1	04. lipnja 01:00 - 04. lipnja 10:00	10	5,38	0,64	3	KOMPLEKSNA	
		05. lipnja 13:00 - 06. lipnja 01:00	13	5,27	0,61	- 4	KOMPLEKSNA	
	2	13. srpnja 08:00 - 14. srpnja 02:00	19	14,52	0,44	6	KOMPLEKSNA	
		15. srpnja 16:00 - 15. srpnja 22:00	7	14,58	0,41	- 5	KOMPLEKSNA	
	3	12. rujna 00:00 - 12. rujna 23:00	24	53,40	0,46	5	KOMPLEKSNA	
	4	08. listopada 18:00 - 10. listopada 08:00	39	14,08	7,22	- 30	KOMPLEKSNA	
		10. studenog 16:00 - 11. studenog 09:00	18	13,99	2,55	- 16	KOMPLEKSNA	
		11. studenog 21:00 - 12. studenog 02:00	6	14,07	2,08	0	KOMPLEKSNA	
	5	15. studenog 22:00 - 20. studenog 10:00	109	14,12	2,55	- 66	KOMPLEKSNA	
	6	29. listopada 23:00 - 01. studenog 06:00	56	66,67	11,20	- 20	KOMPLEKSNA	
	2018	7	26. studenog 00:00 - 28. studenog 17:00	66	40,47	14,50	7	KOMPLEKSNA
			28. studenog 20:00 - 29. studenog 04:00	9	14,61	7,66	- 8	KOMPLEKSNA
8		14. prosinca 20:00 - 16. prosinca 08:00	37	8,31	9,77	- 3	KOMPLEKSNA	
2019	9	23. siječnja 02:00 - 25. siječnja 02:00	49	13,99	9,95	- 4	KOMPLEKSNA	
	10	02. veljače 21:00 - 04. veljače 19:00	47	9,61	8,06	- 11	KOMPLEKSNA	
	11	12. svibnja 21:00 - 14. svibnja 15:00	43	12,37	9,62	0	KOMPLEKSNA	
	12	12. studenog 16:00 - 14. studenog 13:00	46	91,67	15,50	- 4	U OBLIKU OSMICE	

7.6. Rasprava

Dostupni podatci za ovaj rad bile su satne vremenske serije protoka i mutnoće izvora Žrnovnice, te kumulativna količina oborina promatrana na meteorološkoj postaji Dugopolje i Bisko. Podatci obuhvaćaju razdoblje od 2017. do 2019. godine. Za analizirano razdoblje srednji protok iznosio je 1,66 m³/s. Maksimalni protok od 17,60 m³/s zabilježen je 16. prosinca 2017. Godišnja količina oborina na postaji Dugopolje kreće se između 1250 i 1494 mm. Prosjek je oko 1380 mm, a godišnja količina oborina na postaji Bisko kreće se između 1280 i 1723 mm i ima prosječnu vrijednost od 1555 mm. Grafički prikazi analiziranih vremenskih nizova prikazani su na slikama 37, 38, 39, 40, 41, 42, a opće statističke karakteristike prikazane su u tablicama 16, 17, 18, 19, 20 i 21. Podatke o protoku i oborinama osigurao je hrvatski hidrometeorološki zavod (Zagreb, Hrvatska), a podatke o mutnoći osigurao je Vodovod i kanalizacija d.o.o. Split (Split, Hrvatska). Analizirani događaji odnose se na oborinske događaje u kojima je mutnoća prelazila dopuštenu normu vode za piće od 4 NTU. Tijekom promatranog razdoblja registrirano je ukupno 15 oborinskih događaja s prekoračenjem mutnoće, a pojedine događaje formiraju poddogađaji kojih je ukupno bilo osam. Opći opis događaja predstavljen je s tri skupine hidroloških varijabli, koje se nalaze u tablici 22. Navedene varijable opisuju hidrološke uvjete koji prethode prekoračenju mutnoće i događaja prekoračenja mutnoće. Za svaki događaj provedene su klasične hidrološke analize uključujući analizu hidrograma, grafikona mutnoće (turbidograf), omjer mutnoće (T_e) i protoka (Q) pomoću histerezne petlje. Kako bi se analiza usmjerila na najrelevantnije segmente, petlje histereze se prate samo za vrijednost mutnoće koje su prelazile dopušteni standard vode za piće. Petlje histereze općenito omogućuju uvid u razvoj jedne fizičke varijable u odnosu na drugu [11]. Često se koriste za opisivanje odnosa između koncentracije sedimenata i protoka tijekom pojedinačnih poplava za rijeke i za pružanje mogućih objašnjenja za njihovu pojavu [11]. U ovom radu, metoda je malo prilagođena zamjenom $C_w - Q_w$ s $T_e - Q$ petljama histereze. Identificirane su i objašnjene četiri glavne vrste $T_e - Q$ petlji histereze. Za provedeno razdoblje indentificirane su kompleksne petlje i petlje u obliku broja osam (Klasa V).

8. ZAKLJUČAK

Ovim radom izvršena je korelacijska analiza između protoka i oborina, mutnoće i oborina te mutnoće i protoka. Oborine se odnose na meteorološke postaje Dugopolje i Bisko, a protok i mutnoća na izvor Žrnovnica. Analizirano vremensko razdoblje odnosilo se od 01.01.2017. - 31.12.2019. godine. Pomoću grafičkih prikaza i dobivenog koeficijenta korelacije "r" definirano je da jakost korelacijske analize slaba.

Nadalje, dan je pregled općih statističkih karakteristika vremenskih serija (minimum, maksimum, srednja vrijednost i standardna devijacija) za odgovarajuće analizirano razdoblje.

Shodno dobvenim satnim podacima o protoku, oborinama i mutnoći određeni su osrednjavanjem satnih vrijednosti, a dnevne vrijednosti oborina dobivene su sumiranjem satnih. Dnevne vrijednosti podataka koristile su se kao ulazni podatak u daljnjem proračunu.

Na osnovu proračuna osnovnih statističkih podataka izvršen je odnos protoka i mutnoće metodom Williams. Williams - ova metoda prilagođena je zamjenom protoka rijeke s protokom krškog izvora, a koncentracija sedimenata s prekomjernom mutnoćom izvora Žrnovnica. Metodom Williams - a identificirane su i klasificirane histerezne petlje između protoka krškog izvora i mutnoće u događajima kada mutnoća prelazi dopuštenu vrijednost od 4 NTU. Glavne vrste histereznih petlji bile su: kompleksna petlja i petlja u obliku broja osam (Klasa V).

Histerezne petlje u obliku osmice (Klasa V) rijetko su zabilježene [11,18,19,20,21], osobito u kršu [15-17]. Fenomen histereznih petlji u obliku osmice može biti uzrokovan mehanizmima koji pokreću histerezne petlje u smjeru kazaljke na satu ili suprotno od njega [22]. U ovom radu petlje histereze u obliku osmice (Klasa V) pojavile su se jednom, a sastoji se od petlje u smjeru kazaljke na satu i petlje suprotno od kazaljke na satu.

Kompleksne petlje sastoje se od dvije ili više vrsta petlji, tj. različite petlje histereze koegzistiraju u istom događaju oborine, pa ih je vrlo teško opisati zbog

njihove složenosti [14,15]. Uočeno je da su one povezane s visokim vrijednostima protoka, visokim vrijednostima mutnoće i dugim trajanjem prekoračenja mutnoće. Kompleksne petlje pojavile su se u 11 događaja.

Williams - ova metoda poslužila je kao osnova za sljedeća istraživanja histereze između protoka i mutnoće izvora Žrnovnica.

9. LITERATURA

- [1] Ford, D.; Williams, P.W., Karst hydrogeology and geomorphology, Chister, UK:Wiley, 2007.
- [2] Žic E., Vodoopskrba i kondicioniranje voda, Separati s predavanja, Građevinski fakultet Rijeka, Akademska godina 2023./2024.
- [3] Bonacci O.; Andrić I., Karst spring catchment: an example from Dinaric karst, Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
- [4] Kapelj, S.; Kapelj, J.; Švonja, M., Hidrogeološka obilježja sliva Jadra i Žrnovnice, Tusculum, 2012.
- [5] Loborec J., Đurin B., Primjena višekriterijske analize u svrhu odabira optimalne metode procjene prirodne ranjivosti krških vodonosnik, Hrvatske vode, 2016.
- [6] Roje Bonacci, T.; Bonacci, O., The possible negative consequences of underground dam and reservoir construction and operation in coastal karst areas: an example of the hydro-electric power plant (HEPP) Ombla near Dubrovnik (Croatia), European Geosciences Union, 13, 2013.
- [7] Global Monitoring Laboratory, <https://gml.noaa.gov/aro/net/kos/instrum.html>, pristupljeno: 17.04.2023.
- [8] Bolf N., Mjerna i regulacijska tehnika, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2020.
- [9] Žugaj, R., Hidrologija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 2000.
- [10] B.Vrdoljak, Vjerojatnost i statistika, Građevinsko - arhitektonski fakultet, Sveučilišna u Splitu, Split, 2007.
- [11] Williams, G.P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in river, J. Hydrol, 1989.

-
- [12] Loyd, C.E.M.; Freer, J.E.; Collins, A.L. Using hysteresis analysis of high-resolution water quality monitoring data, including uncertainty, to infer controls on nutrient and sediment transfer in catchments, *Sci. Total Environ*, 2016.
- [13] Orwin, J.F.; Smart, C.C. The evidence for paraglacialsedimentation and its temporal scale in the deglaciating basin of Small River Glacier, *Geomorphology, Canada*, 2004.
- [14] Fang, N.F.; Shi, Z.H.; Li, L.; Jiang, C. Rainfall, runoff, and suspended sediment delivery relationships in a small agricultural watershed of the Three Gorges area, *Geomorphology, China*, 2011.
- [15] Bettel, L.; Fox, J.; Husic, A.; Zhu, J.; Al Aamery, N.; Mahoney, T.; Gold-McCoy, A. Sediment transport investigation in a karst aquifer hypothesizes controls on internal versus external sediment origin and saturation impact on hysteresis. *J. Hydrol*, 2022.
- [16] Zhu, M.; Yu, X.; Li, Z.; Xu, X.; Ye, Z. Quantifying and interpreting the hysteresis patterns of monthly sediment concentration and water discharge in karst watersheds, *J. Hydrol*, 2023.
- [17] Husic, A.; Fox, J.F.; Clare, E.; Mahoney, T.; Zarnaghsh, A. Nitrate Hysteresis as a Tool for Revealing Storm-Event Dynamics and Improving Water Quality Model Performance, *Water Resour. Res*, 2023.
- [18] Hu, J.; Gao, P.; Mu, X.; Zhao, G.; Sun, W.; Li, P.; Zhang, L. Runoff-sediment dynamics under different flood patterns in a Loess Plateau catchment, *CATENA, China*, 2019.
- [19] Seeger, M.; Errea, M.-P.; Beguería, S.; Arnáez, J.; Martí, C.; García-Ruiz, J.M. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees, *J. Hydrol*. 2004.

[20] Nadal-Romero, E.; Regüés, D.; Latron, J. Relationships among rainfall, runoff, and suspended sediment in a small catchment with badlands, CATENA 2008.

[21] Buendia, C.; Vericat, D.; Batalla, R.J.; Gibbins, C.N. Temporal dynamics of sediment transport and transient in-channel storage in a highly erodible catchment, Land Degrad. Dev., 2016.

[22] Kadić A.; Denić - Jukić V.; Jukić D.: Exceeding Turbidity versus Karst Spring Discharge during Single Rainfall Events: The Case of the Jadro Spring, Water, 2023.