

MJERENJE PROTOKA OTVORENOG VODOTOKA POMOĆU RADARA

Drobnjaković, Aleksandra

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:802221>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-08**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**MJERENJE PROTOKA OTVORENOG VODOTOKA POMOĆU
RADARA**

Rijeka, srpanj 2023.

Aleksandra Drobnjaković

0069091168

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**MJERENJE PROTOKA OTVORENOG VODOTOKA POMOĆU
RADARA**

Mentor: prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Rijeka, srpanj 2023.

Aleksandra Drobňaković

0069091168

Rijeka, 17. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo**
Predmet: **Mehanika fluida**
Grana: **2.15.04 mehanika fluida**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Aleksandra Drobnjaković (0069091168)**
Studij: **Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva**

Zadatak: **Određivanje riječnog protoka radarskim mjerenjem brzine u površinskom sloju/River flow measurement by radar velocity measurement in surface layer**

Opis zadatka:

Provesti radarska mjerenja protoka na koritu kanala. Radarskim uređajem izmjeriti brzinu vode na površini s niza zadanih motrišnih točaka. Na osnovu izmjerene površinske brzine te uzimajući u obzir profil brzine po dubini postaviti izraz za izračun protoka fluida na izabranoj lokaciji. Formirati oblik mjernog profila koristeći dubinomjer i kreirati Q-h krivulju protoka kanala.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Aleksandra Drobnjaković

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

K. C. L.

Prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

h. S.

Izv. prof. dr. sc. Samir Žic

IZJAVA

S punom odgovornošću izjavljujem da sam završni rad pod naslovom „Mjerenje protoka otvorenog vodotoka pomoću radara“ izradila samostalno, služeći se navedenim izvorima podataka, uz stručno vodstvo mentora Prof. dr. sc. Lade Kranjčevića i stečenim znanjem tijekom studija i ranijeg školovanja.

Rijeka, srpanj 2023.

Aleksandra Drobnjaković

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. RADARSKI UREĐAJ	2
2.1. Opis uređaja.....	2
2.2. Viatronics VT-SVR-PRO 3.....	3
3. RIJEKA DOBRA	5
4. MJERENJE PRIRODNOG OTVORENOG VODOTOKA.....	7
4.1. Mjerenje vodotoka nakon velikih oborina	9
4.2. Mjerenje vodotoka pri normalnim uvjetima	13
5. REZULTATI	15
5.1. Rezultati mjerenja vodotoka nakon velikih oborina.....	15
5.2. Rezultati mjerenja vodotoka pri normalnim uvjetima	18
6. ZAKLJUČAK.....	22
7. LITERATURA I IZVORI	23
8. POPIS SLIKA.....	24
9. POPIS TABLICA.....	25
10. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI.....	26
11. SUMMARY AND KEYWORDS	27

1. UVOD

Mjerenje protoka otvorenog vodotoka i njegovo poznavanje predstavlja jako bitnu sliku o stanjima voda na nekom vodotoku što je od velike važnosti za različite grane ekologije, energetike, gospodarenja voda i slično. Izgradnja brana, razvoj sustava odvodnje i navodnjavanja, planiranje mostova ili hidroelektrana ne bi bilo moguće bez informacija o protoku ili brzini vode pojedinih otvorenih vodotoka. Njihovo mjerenje ne možemo provesti izravno i zbog toga se koristimo različitim metodama njegovog određivanja.

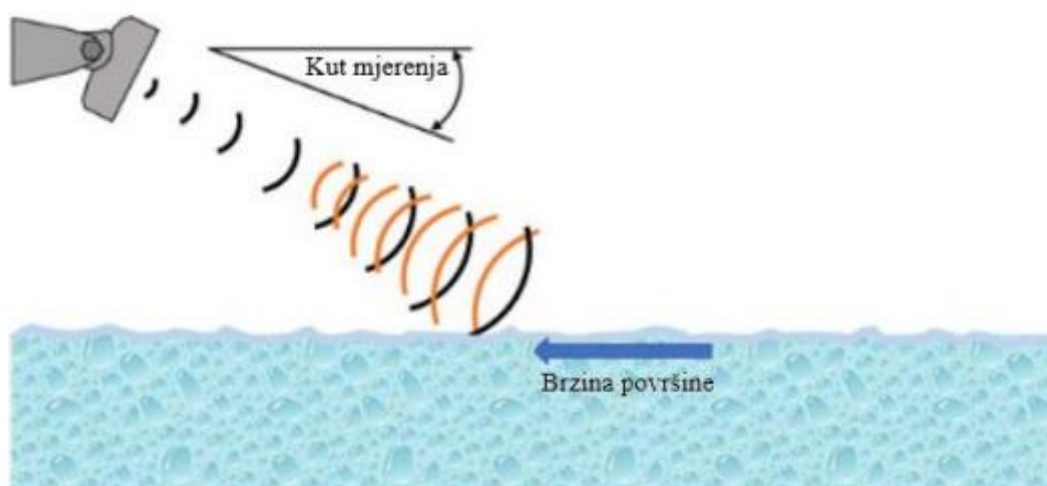
Ovim radom prikazujemo primjer vršenja mjerenja protoka jednog otvorenog vodotoka u dvije situacije: nakon (tijekom) velikih oborina i u normalnim vremenskim uvjetima. Za izvršenje mjerenja koristimo radarski uređaj Viatronics model VT-SVR-PRO 3 sa kojim mjerimo samo površinsku brzinu fluida. Kako bi dobili traženi protok, pored srednje površinske brzine fluida, potrebni su nam i ostali podaci koje treba izmjeriti. Površina poprečnog presjeka se dobiva mjerenjem širine i dubine korita vodotoka. Zbog prirodnog oblika korita, njegova dubina je promjenjiva i zato njeno mjerenje vršimo na različitim pozicijama kako bi dobili što točniji poprečni presjek korita.

Dobivene podatke koristimo za daljnji izračun srednje površinske brzine fluida, poprečni presjek korita, te protok otvorenog vodotoka. Rezultate u oba slučaja uspoređujemo i analiziramo.

2. RADARSKI UREĐAJ

2.1. Opis uređaja

SVR (eng. Surface Velocity Radar) uređaji koriste se za mjerenje površinske brzine fluida i pružaju veću pouzdanost samog mjerenja. Radarski uređaj služi za mjerenje brzine fluida na principu Dopplerovog efekta na površini. Koriste se konstantne frekvencije koje šalju radio valove na površinu vode čime se njihov dio odbija i očitava u anteni radarskog uređaja (Slika 2.1). Brzina fluida se određuje usporedbom vremenskog razmaka između slanja signala i njegovog povratka, odnosno predstavlja pomak u frekvenciji reflektiranog vala. Radarsko mjerenje ne ovisi o svojstvima poput temperature fluida, njegove viskoznosti i gustoće. Mjerenje je praktično i jednostavno što mu daje veliku prednost nad ostalim mjernim sustavima, pogotovo u slučajevima velikih vremenskih nepogoda ili smanjene pristupačnosti samog vodotoka.



Slika 2.1 Princip rada radarskog uređaja [1]

2.2. Viatronics VT-SVR-PRO 3

Radarski uređaj koji koristimo u mjerenju protoka je ručni radar finskog proizvođača Viatronics model VT-SVR-PRO 3 (*Slika 2.2*). Sastoji se iz LCD zaslona (*Slika 2.3*) koji je osjetljiv na dodir i pomoću kojega koristimo sam uređaj i ujedno očitavamo rezultate. Sustav je jako jednostavan i lagan za korištenje sa korisničke strane. Uređaj koji smo dobili na korištenje je već bio ispravno kalibriran i zato taj korak nije bilo potrebno ponavljati.

Mjerenje samim uređajem se vrši iz stacionarnog položaja, sa mosta iznad otvorenog vodotoka, pod određenim kutom koji smo odredili ranije i unesli u sustav uređaja. Postoji veliki broj uvjeta koji mogu dovesti do nepouzdanih rezultata i njihovih odstupanja kao što su vjetar (može uzrokovati valove na površini) i kapljice kiše (pored pojave valova mogu i presjeći putanju poslanog signala radara).



Slika 2.2 Viatronics model VT-SVR-PRO 3



Slika 2.3 LCD zaslon radarskog uređaja Viatronics model VT-SVR-PRO 3

Karakteristike uređaja:

Tablica 2.1 Karakteristike radarskog uređaja Viatronics model VT-SVR-PRO 3

Karakteristike mjerenja	
Najveća i najmanja brzina	0,1-80 m/s
Točnost mjerenja	±0,3 %
Mehaničke karakteristike	
Težina	1,5 kg
Dimenzije (d/v/š)	(19/26,4/8,6) cm
Materijal kućišta	Aluminij i kompoziti
Općenite karakteristike	
Korekcije vodoravnog kosinusnog kuta	0 - 60°
Zona osjetljivosti	0 - 8
Udaljenost	< 100 m
Parametri antene	
Tip/nazivna frekvencija prijenosa	Ka-band / 34,7 GHz
Polarizacija/širina zrake	Kružna / 12± 1°
Nominalna izlazna snaga zrake	15 mW
Parametri ekrana na dodir	
Veličina/tip	2,4 in / IPS LCD
Razlučivost/boja	320*240 / 65000
Osvjetljenje/kontrast	800 cd/m ²
Kut gledanja/pozadinsko osvjetljenje	160° / bijela led svijetla
Uvjeti	
Radna temperatura	-30°C – +70°C
Najveća vlažnost	90% RELATIVNE VLAŽNOSTI NA 37°C
Vodootpornost	IP64
Snaga	
Potrebna voltaža	7,2VDC – 20VDC
Snaga	Li-ion baterija 18V / 1,3 Ah
Potrošnja snage	
Pripravnost/antena uključena	0,2A / 0,45 A

3. RIJEKA DOBRA

Rijeka Dobra je rijeka koja protječe kroz Hrvatsku i Bosnu i Hercegovinu. Rijeka izvire u blizini grada Ogulina u Hrvatskoj i teče dolinom Gorskog Kotara i Gornje Dobrave. Nakon toga rijeka Dobra ulazi u Bosnu i Hercegovinu, teče kroz grad Bosansko Grahovo i konačno se ulijeva u rijeku Unu. Rijeka Dobra predstavlja jedan od prirodnih bisera naše regije. Sa svojim kristalno čistim vodama i spektakularnim krajolikom, ova rijeka ima iznimnu važnost za lokalnu zajednicu i okoliš (*Slika 3.1*).

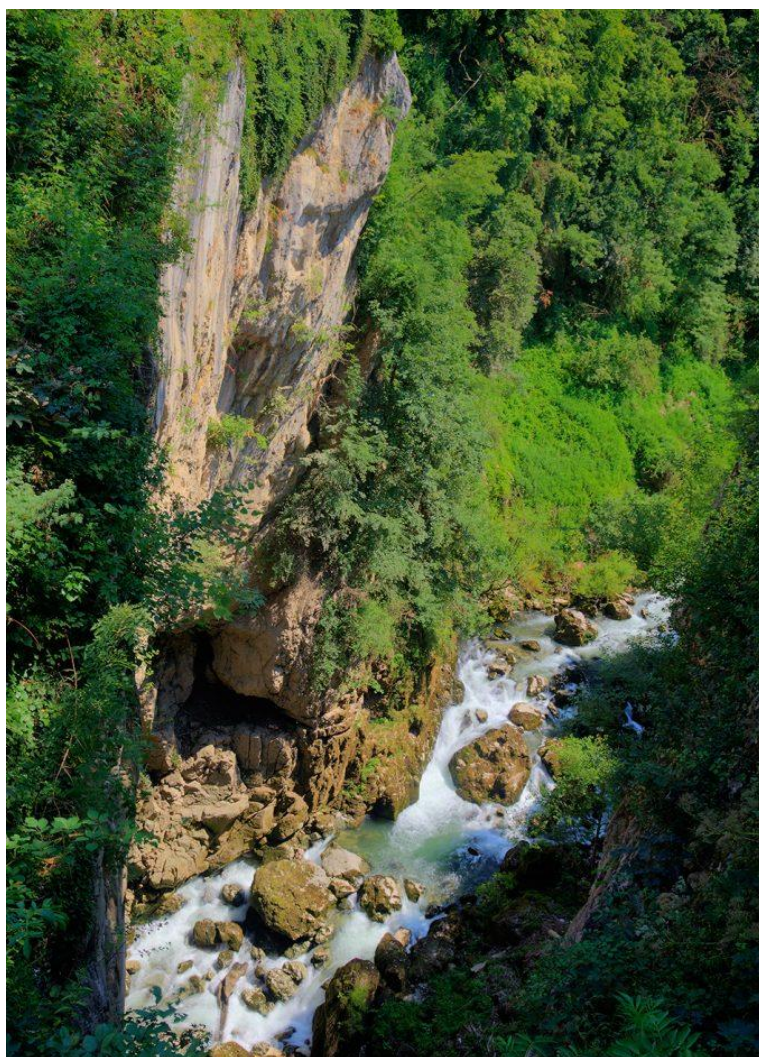


Slika 3.1 Rijeka Dobra

Rijeka Dobra je po veličini druga rijeka u Gorskom kotaru. To je ponornica koja izvire iz dva izvora: kod Bukova vrha i kod Skrada. Rijeka se počinje razvijati i širiti istočno od Skrada, a kod Vrbovskog joj se pridružuje Kamačnik. U području Vrbovskog protječe u dužini od 22 km stvarajući pitomu dolinu pogodnu za ribolov i kupanje u ljetnim mjesecima.

Dobra je rijeka posebne privlačnosti sa svojom bistrom vodom, mnogobrojnim sadrenim barijerama, iznimnom ljepotom krajolika i raznolikošću obala. Zbog toga je privlačna za ribolovce na pastrve i lipljane kojih ima puno, ali i turistima željnim uživanja u čistoj i netakutoj prirodi. Dobra je i jedna od najatraktivnijih rijeka u Hrvatskoj i izuzetno zanimljiva ljubiteljima prirode željnih pustolovina i povišenog adrenalina.

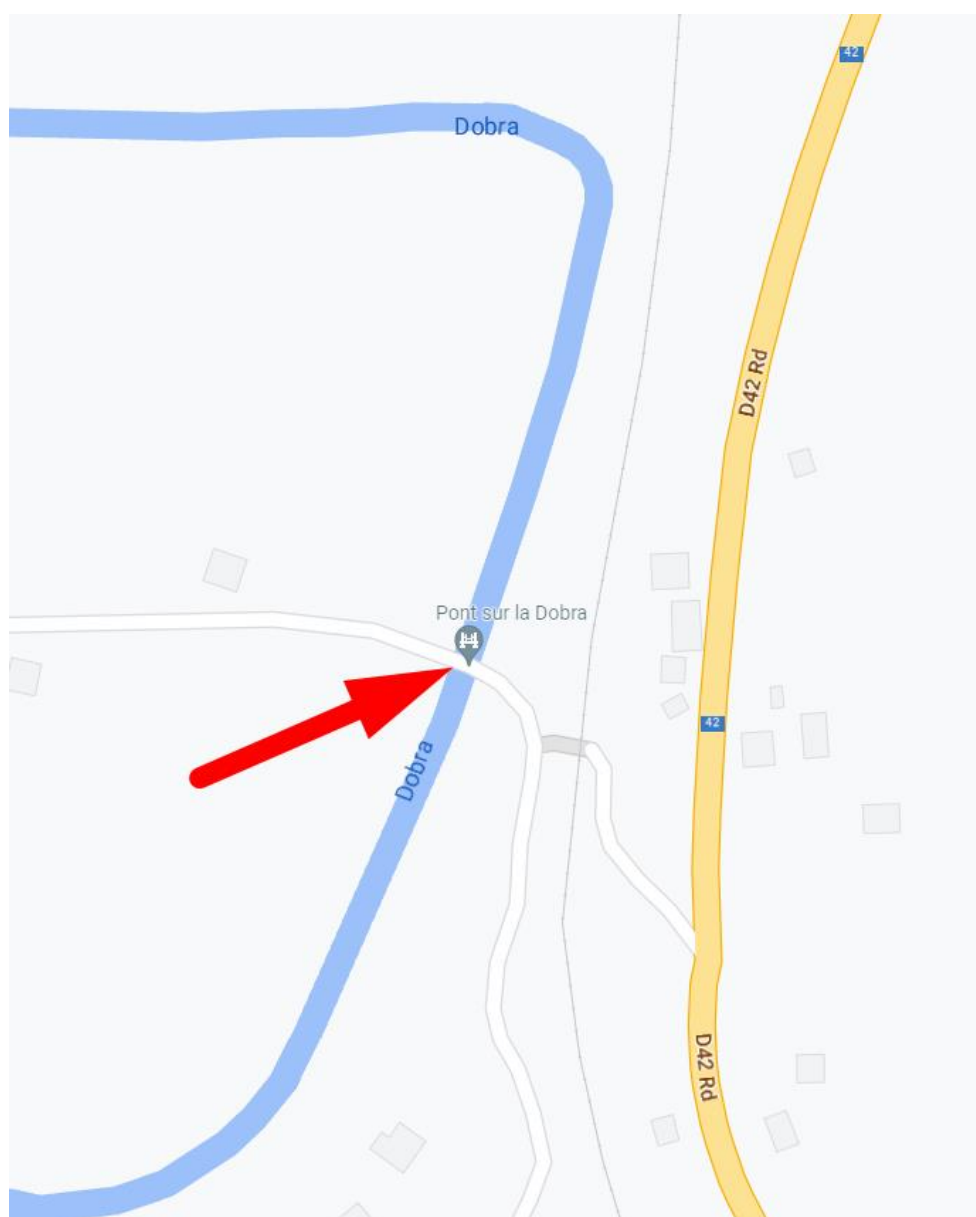
U vlažnijem dijelu godine poslije obilnijih oborina, visoko u stijeni nastaje slap koji se vidi iz šire okolice (*Slika 3.2*). Umjetno jezero Bukovnik hidrotehničkim tunelom je povezano sa akumulacijom Sabljaci na Zagorskoj Mrežnici. Odavde se vode Dobre i Zagorske Mrežnice odvođe na HE Gojak, u neposrednoj blizini drugog Dobrinog izvora. Ovaj sustav izgrađen je 1959. g., od kada se znatno promijenila slika Dobre u gradu Ogulinu kojim teče do Đulinog ponora. Poniranjem u Đulinom ponoru rijeka je formirala podzemni sustav s najvećom dužinom speleološki istraženih kanala u Hrvatskoj: Sustav Đulin ponor – Medvedica. Ukupna dužina ovog podzemnog kompleksa iznosi 16 396 m. [2]



Slika 3.2 Slap Rijeke Dobre

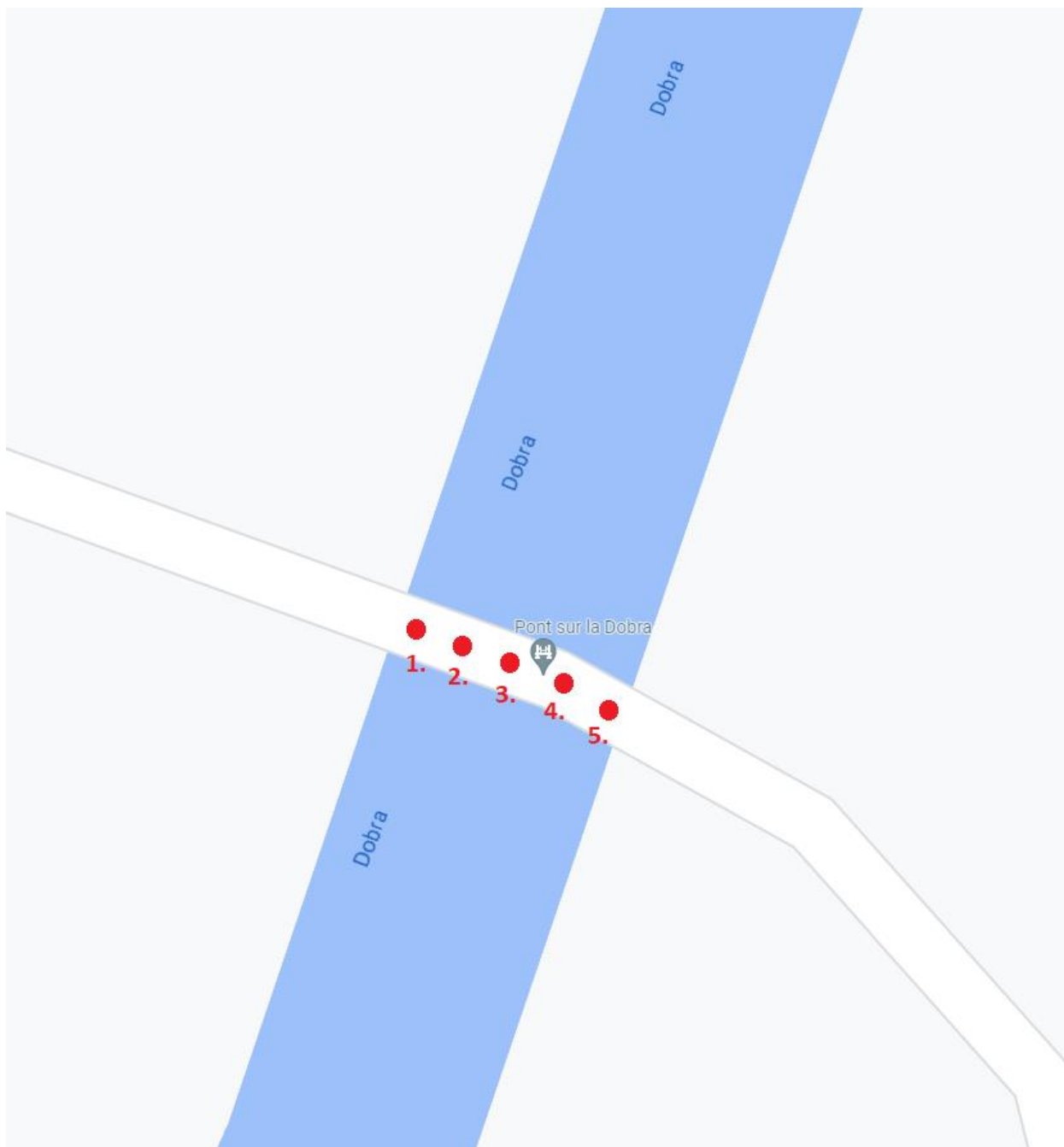
4. MJERENJE PRIRODNOG OTVORENOG VODOTOKA

Mjerenje volumnog protoka otvorenog vodotoka rijeke se vrši određivanjem površinske hrapavosti dna rijeke te većim brojem mjerenja dubine i površinske brzine vode na prethodno određenim točkama na lokaciji mjerenja. Točke mjerenja odredili smo mjerenjem ukupne širine rijeke te djeljenjem sa brojem točaka koje želimo. Rijeka na kojoj smo izvršili mjerenja je Dobra (Slika 4.1), a most sa kojeg smo mjerili je Pont sur la Dobra. Mjerenje u oba slučaja je na istoj lokaciji sa istim točkama.



Slika 4.1 Geografski položaj mjerenja protoka na Google Mapama

Obzirom da kod mjerenja protoka veći broj mjerenja osigurava veću točnost dobivenih rezultata, odabrano je 5 lokacija na mostu s kojih će se mjeriti brzina. Širina od 12 metra podijeljena je na 4 jednaka dijela što daje 5 jednako udaljenih pozicija na mostu (*Slika 4.2*)



Slika 4.2 Odabrane pozicije za mjerenje brzine i visine vodostaja rijeke

4.1. Mjerenje vodotoka nakon velikih oborina

Prvo mjerenje izvršeno je 17. prosinca 2022. godine na rijeci Dobri između Hreljina i Turkovića Ogulinskog. Most iznad rijeke je zadovoljavao sve uvjete potrebne za uspješno mjerenje (*Slika 4.3, Slika 4.4*).



Slika 4.3 Most Pont sur la Dobra



Slika 4.4 Rijeka Dobra nakon velikih oborina

Pri dolasku na predviđenu lokaciju, prvo smo obilježili prethodno dobivene točke sa kojih će se izvršiti mjerenja. Mjerenje dubine se izvršava pomoću užeta na čijem kraju se nalazi visak koji spuštamo u rijeku dok ne osjetimo da je visak dotakao dno korita (*Slika 4.5*). Visak se onda vadi van i mjeri se mokar dio užeta pomoću metra što predstavlja dubinu na toj poziciji (*Slika 4.6*). Postupak smo ponovili za sve točke.



Slika 4.5 Mjerenje dubine rijeke



Slika 4.6 Mjerenje mokrog dijela užeta viska

Nakon mjerenja dubine rijeke, mjerili smo površinsku brzinu fluida koristeći radar. Radar je postavljen na rub ograde, osiguran svojom kutijom ispod za bolju konzistenciju mjerenja u točkama. Prilikom mjerenja vodili smo računa da ispred radara nema smetnji u odašiljanju signala kako ne bi došlo do nepouzdanih rezultata. Kut nagiba radara smo na svakoj točki ponovo provjeravali pomoću aplikacije na mobitelu i zabilježili dobivene rezultate mjerenja (*Slika 4.7, Slika 4.8*).



Slika 4.7 Provjera nagiba radarskog uređaja pomoću mobilne aplikacije



Slika 4.8 Mjerenje površinske brzine strujanja vode na jednoj od pozicija

4.2. Mjerenje vodotoka pri normalnim uvjetima

Drugo mjerenje izvršeno je 21. svibnja 2023. godine isto na rijeci Dobri između Hreljina i Turkovića Ogulinskog. Most iznad rijeke je i dalje zadovoljavao sve uvjete potrebne za uspješno mjerenje (*Slika 4.9, Slika 4.10*).



Slika 4.9 Most Pont sur la Dobra



Slika 4.10 Rijeka Dobra u normalnim uvjetima

Pri ponovnom dolasku na predviđenu lokaciju, opet smo prvo obilježili prethodno dobivene točke sa kojih će se izvršiti mjerenja (*Slika 4.11*). Postupak mjerenja smo ponovili za sve točke pomoću viska vezanog za uže.



Slika 4.11 Ponovno obilježavanje mjernih točaka

Nakon ponovnog mjerenja dubine rijeke, mjerili smo opet površinsku brzinu fluida koristeći radar. Radar je postavljen na rub ograde, osiguran svojom kutijom ispod za bolju konzistenciju mjerenja u točkama. Postupak je ponovljen kao i prilikom prvog mjerenja. Rezultate mjerenja smo prikupili i drugo mjerenje je bilo završeno.

5. REZULTATI

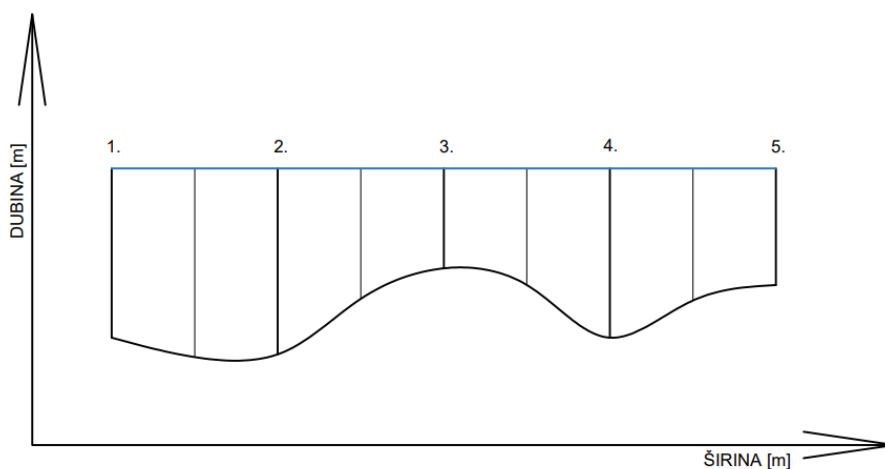
5.1. Rezultati mjerenja vodotoka nakon velikih oborina

Površinsku brzinu rijeke izmjerili smo na svih 5 prethodno odabranih pozicija. Rezultati mjerenja površinske brzine i dubine rijeke prikazani su u tablici (*Tablica 5.1*).

Tablica 5.1 Rezultati mjerenja površinske brzine i dubine nakon velikih oborina

Pozicija za mjerenje	Površinska brzina fluida v_p [m/s]	Dubina c [m]
1.	3,2	2,1
2.	2,4	3,05
3.	2,0	1,8
4.	2,0	3,35
5.	2,4	3,05

Pomoću izmjerenih dubina na pojedinim pozicijama možemo odrediti aproksimaciju izgleda profila poprečnog presjeka rijeke nakon velikih oborina (*Slika 5.1*).



Slika 5.1 Aproksimacija izgleda profila poprečnog presjeka rijeke nakon velikih oborina

Površina poprečnog presjeka računa se izrazom (5.1):

$$A = d * c \quad (5.1)$$

gdje je :

- d širina rijeke [m],
- c srednja dubina rijeke [m].

Obzirom na različitu dubinu rijeke po širini korita potrebno je odrediti srednju dubinu. Koristimo izraz za računanje aritmetičke sredine (5.2):

$$c = \frac{\sum c_n}{n} \quad (5.2)$$

Gdje je:

- c_n dubina rijeke za mjernu poziciju [m],
- n broj mjernih pozicija.

Prema izrazu, srednja dubina rijeke iznosi $c = 2,67$ m. Širina rijeke je već poznata i iznosi $d = 12$ m, pomoću toga možemo odrediti površinu poprečnog presjeka pomoću gore spomenutog izraza (5.1) $A = 32,04$ m².

Kada smo izračunali površinu poprečnog presjeka prelazimo na račun srednje brzine strujanja koja nam je potrebna za izračun protoka. Rezultate koje koristimo smo dobili pomoću radarskog uređaja na različitim točkama i njih uvrštavamo u izraz za izračun srednje brzine (5.3).

$$v = C\sqrt{RI_0} \quad (5.3)$$

gdje je:

- v srednja brzina fluida ,
- I_0 pad dna kanala ,
- R hidraulički radijus ,
- C Chezyjev broj.

Sastav dna rijeke iznimno utječe na njenu srednju brzinu strujanja obzirom da od njega ovisi koliki će otpor dno pružati tečenju vode. U našem slučaju za izračun površinske brzine koristimo vezu Chezyjeva broja C i Manningova koeficijenta hrapavosti n i hidrauličkog radijusa u navedenom izrazu (5.4). Odabir odgovarajuće vrijednosti Manningova koeficijenta je vrlo bitan za točnost proračuna protoka. U tablici (*Tablica 5.2*) nalaze se neke od njegovih tipičnih vrijednosti:

$$C = \frac{R^{1/6}}{n} \quad (5.4)$$

gdje je :

- n Manningov koeficijent hrapavosti [$s/m^{1/3}$],
- R hidraulički radijus [m].

Tablica 5.2 Manningov koeficijent hrapavosti za pojedine vrste obloge [3]

Kat.	Vrste obloge	n ($s/m^{1/3}$)
I	Osobito glatke površine; emajlirane ili glazirane površine	0,009
II	Vrlo brižno oblanjane daske i dobro sastavljene; najbolja čista cementna žbuka (zaglađena)	0,010
III	Najbolja cementna žbuka (1/3 pijeska); čiste nove grnčarske cijevi; cijevi od lijevana željeza; dobro sastavljene željezne cijevi; dobro oblanjane daske	0,011
IV	Neoblanjane daske, dobro sastavljene; vodovodne cijevi u normalnim okolnostima, bez veće inkrustacije; vrlo čiste cijevi za otpadnu vodu i vrlo dobar beton.	0,012
V	Drvena obloga dobro obrađena; dobra obloga od opeke; cijevi za otpadnu vodu u normalnim okolnostima; ponešto nečiste cijevi za vodu.	0,013
VI	Zaprljane cijevi (vodovodne i za otpadnu vodu); betonirani kanali u srednjim okolnostima	0,014
VII	Srednje dobra obloga od opeke; tarac od klesana kamena u srednjim okolnostima; dovoljno zaprljane cijevi za odvod otpadne vode; cerada na drvenim letvama	0,015
VIII	Dobar tarac od lomljena kamena; stara (oštećena) obloga od opeke; relativno grub teren	0,017
IX	Kanal pokriven debelim stabilnim slojem mulja, kanali u zbijenom sitnom šljunku, pokriveni neprekidnim tankim slojem mulja (pri tome sve u besprijekornom stanju)	0,018
X	Srednje dobar tarac od lomljena kamena; tarac od oblutaka; kanali usječeni u kamenu; kanali u lesu, prekriveni tankim slojem mulja (u običnom stanju)	0,02
XI	Kanali u zbijenoj glini; kanali u lesu, šljunku i zemlji, pokriveni isprekidano tankim slojem mulja; veliki zemljani kanali u dobrom stanju	0,0225
XII	Dobra suha obloga, veliki zemljani kanali srednje održavani i mali zemljani kanali dobro održavani; rijeke u veoma dobrim okolnostima (čisto, pravolinijsko korito sa slobodnim tokom, bez obalnih urušavanja u dubokih vododerina)	0,025
XIII	Veliki zemljani kanali u nešto slabijem stanju i mali kanali u dobrom stanju.	0,0275
XIV	Zemljani kanali u slabom stanju, npr. sa šašem, oblucima ili šljunkom na dnu, poprilično zarasli	0,03

Kako se radi o šljunku Manningov koeficijent hrapavosti iznosi $n = 0,03 s/m^{1/3}$. Hidraulički radijus R jednak je prosječnoj dubini c . Nakon što poznamo Cheyjev broj C moguće je odrediti srednju brzinu strujanja rijeke v pomoću izraza (5.5):

$$v = C\sqrt{RI_0} \quad (5.5)$$

Gdje je:

- I_0 pad dna kanala.

Poznavajući površinsku brzinu strujanja rijeke i sastav dna moguće je aproksimirati srednju brzinu strujanja pomoću koeficijenta hrapavosti P . Koeficijent hrapavosti u našem slučaju (dna koja su obložena šljunkom) iznosi $P = 0,6$. Ovim podacima srednju brzinu strujanja rijeke v računamo prema izrazu (5.6):

$$v = v_p * P \quad (5.6)$$

Gdje je:

- v_p prosječna površinska brzina strujanja [m/s].

Prosječna površinska brzina strujanja v_p računa se prema izrazu (5.7):

$$v_p = \frac{\sum v_n}{n} \quad (5.7)$$

Gdje je:

- v_n površinska brzina rijeke za mjerenu poziciju [m].

Prema tome srednja površinska brzina strujanja iznosi $v_p = 2,4$ m/s, a srednja brzina strujanja rijeke iznosi $v = 1,44$ m/s.

Pomoću svih poznatih podataka moguće je odrediti volumni protok otvorenog vodotoka Q izrazom (5.8):

$$Q = v * A \quad (5.8)$$

Protok u ovom slučaju, određen uz pomoć izmjerenih i izračunatih podataka, iznosi $Q = 46,14$ m³/s.

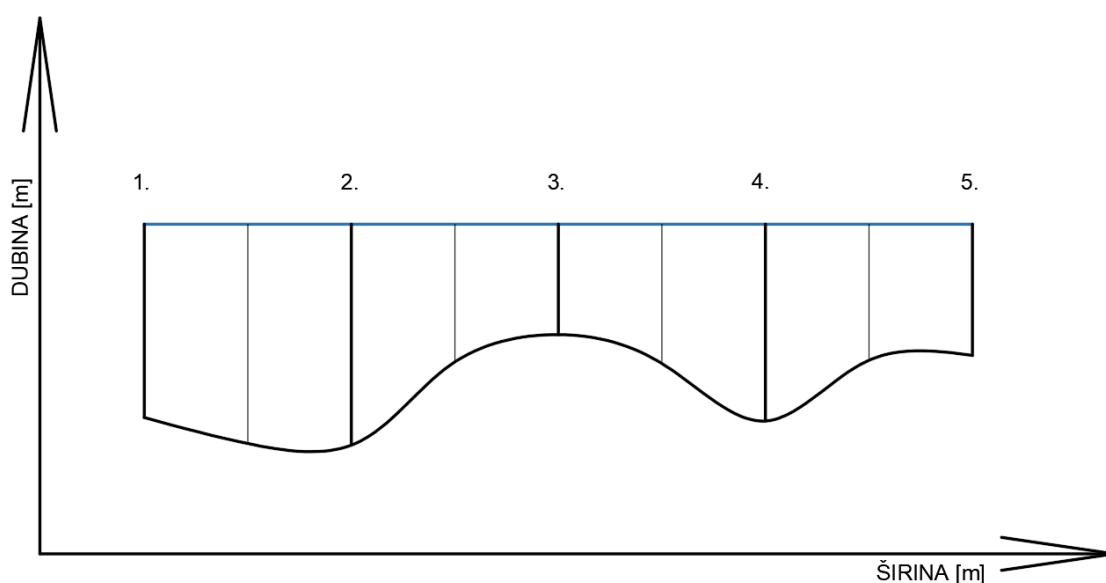
5.2. Rezultati mjerenja vodotoka pri normalnim uvjetima

Površinsku brzinu rijeke izmjerili smo tijekom drugog mjerenja opet na svih 5 prethodno odabranih pozicija. Rezultati drugog mjerenja površinske brzine i dubine rijeke prikazani su u tablici (*Tablica 5.3*).

Tablica 5.3 Rezultati mjerenja površinske brzine i dubine pri normalnim uvjetima

Pozicija za mjerenje	Površinska brzina fluida v_p [m/s]	Dubina c [m]
1.	1,6	1,9
2.	1,5	2,85
3.	1,5	1,6
4.	1,2	3,20
5.	1,1	2,80

Pomoću izmjerenih dubina na pojedinim pozicijama možemo odrediti aproksimaciju izgleda trenutnog profila poprečnog presjeka rijeke pri normalnim uvjetima (Slika 5.2).



Slika 5.2 Aproksimacija izgleda profila poprečnog presjeka rijeke pri normalnim uvjetima

Površina poprečnog presjeka računa se izrazom (5.9):

$$A = d * c \quad (5.9)$$

gdje je :

- d širina rijeke [m],
- c srednja dubina rijeke [m].

Obzirom na različitu dubinu rijeke u odnosu na prethodno mjerenje, potrebno je opet odrediti srednju dubinu. Koristimo izraz za računanje aritmetičke sredine (5.10):

$$c = \frac{\sum c_n}{n} \quad (5.10)$$

Gdje je:

- c_n dubina rijeke za mjernu poziciju [m],
- n broj mjernih pozicija.

Prema izrazu, srednja dubina rijeke iznosi $c = 2,47$ m. Širina rijeke je već poznata i iznosi $d = 12$ m, pomoću toga možemo odrediti površinu poprečnog presjeka pomoću gore spomenutog izraza (5.9) $A = 29,64$ m².

Kada smo izračunali novu površinu poprečnog presjeka prelazimo opet na račun srednje brzine strujanja koja nam je potrebna za izračun protoka. Rezultate smo dobili pomoću mjerenja radarskim uređajem na različitim točkama i njih uvrštavamo u izraz za izračun srednje brzine (5.11).

$$v = C\sqrt{RI_0} \quad (5.11)$$

gdje je:

- v srednja brzina fluida ,
- I_0 pad dna kanala ,
- R hidraulički radijus ,
- C Chezyjev broj.

Sastav dna rijeke iznimno utječe na njenu srednju brzinu strujanja i od njega ovisi koliki će otpor dno pružati tečenju vode. U našem slučaju sastav dna ove rijeke se nije promijenio u ovom vremenskom periodu između mjerenja, tako da za izračun površinske brzine koristimo opet vezu Chezyjeva broja C i Manningova koeficijenta hrapavosti n i hidrauličkog radijusa.

Obzirom na činjenicu da se sastav dna nije promijenio, Manningov koeficijent hrapavosti nam je ostao isti i iznosi $n = 0,03$ s/m^{1/3}. Hidraulički radijus R jednak je prosječnoj dubini c . Nakon što poznajemo Chezyjev broj C moguće je odrediti novu srednju brzinu strujanja rijeke v pomoću izraza (5.12):

$$v = C\sqrt{RI_0} \quad (5.12)$$

Gdje je:

- I_0 pad dna kanala .

Poznavajući površinsku brzinu strujanja rijeke i sastav dna moguće je opet aproksimirati srednju brzinu strujanja pomoću koeficijenta hrapavosti P . Koeficijent hrapavosti se također nije promijenio (dna koja su obložena šljunkom) i iznosi $P = 0,6$. Ovim podacima novu srednju brzinu strujanja rijeke v računamo prema izrazu (5.13):

$$v = v_p * P \quad (5.13)$$

Gdje je:

- v_p prosječna površinska brzina strujanja [m/s].

Nova prosječna površinska brzina strujanja v_p računa se prema izrazu (5.14):

$$v_p = \frac{\sum v_n}{n} \quad (5.14)$$

Gdje je:

- v_n površinska brzina rijeke za mjerenu poziciju [m].

Prema tome nova srednja površinska brzina strujanja iznosi $v_p = 1,38$ m/s, a srednja brzina strujanja rijeke iznosi $v = 0,828$ m/s.

Pomoću svih poznatih podataka moguće je odrediti volumni protok otvorenog vodotoka Q izrazom (5.15):

$$Q = v * A \quad (5.15)$$

Protok u ovom slučaju , određen uz pomoć izmjerenih i izračunatih podataka, iznosi $Q = 24,54$ m³/s.

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je dokazati značaj mjerenja protoka otvorenog vodotoka. Spomenut je njegov značaj u raznim granama energetike, gospodarenja vodom i sličnog, kao i u izgradnji brana i razvoja sustava odvodnje i navodnjavanja, ali i kod planiranja mostova i hidroelektrana. Informacije koje smo u mogućnosti dobiti mjerenjem protoka otvorenog vodotoka nam iznimno pomažu u svemu tome. Obavljena mjerenja su bila u dvije različite situacije, jedna nakon velikih oborina i druga prilikom normalnih uvjeta u okolini. Oba mjerena su na lagan i jednostavan način izvršena pomoću praktičnog beskontaktnog uređaja Viatronic SVR-3 Pro.

Usporedbom rezultata između dva mjerenja može se doći do očekivanog zaključka da se prilikom većih oborina povećava površinska brzina vodotoka i samim tim i njegov protok. Ove rezultate je bilo jednostavno izmjeriti ali ih to ne čini potpuno točnim. Uzimajući u obzir aproksimaciju srednje brzine korištenjem pretpostavljenog koeficijenta hrapavosti, moramo očekivati da postoji relativna greška kod računanja protoka otvorenog vodotoka. Kako je uređaj prije korištenja bio testiran u laboratorijskim uvjetima može se zaključiti da je uređaj pouzdan i rezultati koje smo dobili su prihvatljivi.

Iako su oba mjerenja bila uspješno obavljena, radarski uređaj Viatronics SVR-3 Pro je jednostavan za korištenje i može biti koristan za izmjerenje, ali samo površinske brzine strujanja fluida. Za naše potrebe, bilo je nužno izvršiti i dodatna mjerenja dubine i dužine kako bi dobili rezultat jačine protoka otvorenog vodotoka. U slučaju nepravilnih oblika korita i različitih dubina u određenim točkama, teško je zapravo dobiti rezultat visoke preciznosti.

7. LITERATURA I IZVORI

[1] Kranjčević, L.: "Mehanika fluida, Skripta za studente Tehničkog fakulteta u Rijeci", Rijeka, 2013.

[2] Šafarek, G.; Šolić, T.: "Rijeke Hrvatske", Izdavačka kuća Veda, 2011.

[3] Kolar, I.; Volf, G.; Žic, E.: "Analiza protočnosti kanala različitih oblika poprečnih presjeka i obloženosti" s interneta, <https://core.ac.uk/download/pdf/212494468.pdf>, 26.11.2023.

8. POPIS SLIKA

Slika 2.1 Princip rada radarskog uređaja [1]	2
Slika 2.2 Viatronics model VT-SVR-PRO 3.....	3
Slika 2.3 LCD zaslon radarskog uređaja Viatronics model VT-SVR-PRO 3	4
Slika 3.1 Rijeka Dobra	5
Slika 3.2 Slap Rijeke Dobre	6
Slika 4.1 Geografski položaj mjerenja protoka na Google Mapama.....	7
Slika 4.2 Odabrane pozicije za mjerenje brzine i visine vodostaja rijeke	8
Slika 4.3 Most Pont sur la Dobra	9
Slika 4.4 Rijeka Dobra nakon velikih oborina	9
Slika 4.5 Mjerenje dubine rijeke	10
Slika 4.6 Mjerenje mokrog dijela užeta viska	11
Slika 4.7 Provjera nagiba radarskog uređaja pomoću mobilne aplikacije.....	11
Slika 4.8 Mjerenje površinske brzine strujanja vode na jednoj od pozicija	12
Slika 4.9 Most Pont sur la Dobra	13
Slika 4.10 Rijeka Dobra u normalnim uvjetima.....	13
Slika 4.11 Ponovno obilježavanje mjernih točaka	14
Slika 5.1 Aproksimacija izgleda profila poprečnog presijeka rijeke nakon velikih oborina.....	15
Slika 5.2 Aproksimacija izgleda profila poprečnog presijeka rijeke pri normalnim uvjetima	19

9. POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Karakteristike radarskog uređaja Viatronics model VT-SVR-PRO 3	4
Tablica 5.1 Rezultati mjerenja površinske brzine i dubine nakon velikih oborina	15
Tablica 5.2 Manningov koeficijent hrapavosti za pojedine vrste obloge [2]	17
Tablica 5.3 Rezultati mjerenja površinske brzine i dubine pri normalnim uvjetima.....	19

10.SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Zadatak ovog završnog rada bio je izmjeriti protok otvorenog vodotoka radarom. Površinska brzina strujanja fluida prirodnog otvorenog vodotoka mjerena je radarskim mjernim uređajem. Na terenu su se provodila dva mjerenja, jedno u uvjetima nakon velikih oborina i drugo u normalnim uvjetima. Rezultati su prikupljeni i obrađeni i smatraju se pouzdanim. Prosječnu dubinu smo odredili koristeći visak i uže, a za širinu vodotoka je korišten metar. Za konačni rezultat dvije jačine protoka koristili smo umnožak prosječne dubine vodotoka i njegovu poznatu širinu. Dobivene rezultate smo koristili za izračun srednje brzine strujanja i poznavanjem površine poprečnog presjeka vodotoka izračunat je traženi protok.

Ključne riječi: vodotok, protok, poprečni presjek, radarski uređaj, protokomjer, površinska brzina.

11. SUMMARY AND KEYWORDS

The task of this final paper was to measure the flow rate of an open watercourse using a radar. The surface flow velocity of the natural open watercourse was measured using a radar measurement device. Two measurements were conducted in the field, one under conditions after heavy rainfall and the other under normal conditions. The results were collected, processed, and considered reliable. The average depth was determined using a sounding line and rope, while a meter was used to measure the width of the watercourse. For the final result of the flow rate, we multiplied the average depth of the watercourse by its known width. The obtained results were used to calculate the mean flow velocity, and by knowing the cross-sectional area of the watercourse, the desired flow rate was calculated.

Keywords: watercourse, flow rate, cross-sectional area, radar device, flowmeter, surface velocity.