

Mjerenje protoka otvorenog vodotoka pomoću radara

Klepač, Jurica

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:190:787052>

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, ožujak 2023.

Jurica Klepač

0069087532

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**MJERENJE PROTOKA OTVORENOG VODOTOKA
POMOĆU RADARA**

Mentor: prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Rijeka, ožujak 2023.

Jurica Klepač

0069087532

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad "Mjerenje protoka otvorenog vodotoka radarom"
izradio samostalno koristeći literaturu uz znanje stečeno tijekom
preddiplomskog studija.

Rijeka, ožujak 2023.

Jurica Klepač

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TEORIJA STRUJANJA FLUIDA U OTVORENIM KANALIMA I NJIHOVO MJERENJE.....	3
2.1. Jednoliko stacionarno strujanje u otvorenim kanalima.....	4
2.2. Nejednoliko strujanje u otvorenim kanalima.....	7
2.3. Nestacionarno strujanje.....	8
3. TEORIJA RADARSKOG MJERENJA STRUJANJA FLUIDA I PRINCIP RADA.....	10
3.1. Radarski uređaj.....	10
3.2. Karakteristike radarskog uređaja.....	11
4. MJERENJE PROTOKA RIJEKE.....	13
4.1. Opis lokacije.....	13
4.2. Uvod u mjerenje protoka.....	14
4.3. Postupak mjerenja protoka.....	15
4.4. Protok HE Varaždin.....	20
5. REZULTAT.....	23
6. ZAKLJUČAK.....	29
7. LITERATURA.....	31
8. POPIS SLIKA.....	32
9. POPIS TABLICA.....	33
10. SAŽETAK.....	34
11. SUMMARY.....	35

1. UVOD

Cilj ovoga rada je prikazati mjerenje protoka otvorenog vodotoka pomoću radara. Fluidi od najranijih dana imaju svoje veliko značenje jer je gotovo nemoguće zamisliti život bez njih. Kako je nemoguće zamisliti život bez njih tako je nužno znati i mjeriti protoke fluida. Prva "ozbiljnija" mjerenja protoka počela u Americi prije gotovo stotinu trideset godina. Jednoliko stacionarno strujanje je moguće ostvariti u kanalima koje karakterizira konstantna brzina, oblik i površina presjeka, pad kanala i koeficijent hrapavosti uzduž cijele trase. Prethodno navedeno strujanje je moguće ostvariti u kanalima koji su umjetno stvoreni. Kada je riječ o nejednolikom stacionarnom strujanju, svi prethodno navedeni parametri su skloni stalnim promjenama. Nejednoliko strujanje se javlja najčešće u sagrađenim i prizmatičnim kanalima jer takav oblik strujanja zahtijeva jednakost poprečnog presjeka duž toka s oblikom i površinom. Slobodno vodno lice mora biti paralelno s dnom kanala, što znači da pad kanala mora biti konstantan. Tečenje u vodotocima, neovisno radi li se o umjetnim ili prirodnim vodotocima, je vrlo rijetko stacionarno. Nestacionarni hidraulički procesi su jako složeni i opisuju zakone hidrodinamike. Vanjski činitelji, umjetni ili prirodni određuju vremensku i prostornu promjenu protoka i vodostaja. Primjer nestacionarnog toka s naglim promjenama se pojavljuje prilikom upravljanja hidrotehničkih objekata, naglog ulaska elektrane u pogon, naglog dizanja zapornica na brani, rušenja brane i tako dalje. Prethodno navedene nagle promjene režima strujanja uzrokuju pojavu oštro izraženih valova u vodotoku koji se propagiraju na temelju zakona održavanja mase i količine gibanja.

Mjerenje protoka u kontroliranim uvjetima služi kako bi se provjerila vjerodostojnost korištenog uređaja. Ukoliko se podaci dobiveni radarskim uređajem podudaraju s izračunatim podacima za protok u istom kanalu, smatra se da je uređaj vjerodostojan te da se može koristiti prilikom mjerenja protoka otvorenog vodotoka. U slučaju mjerenja protoka otvorenog vodotoka potrebno je uzeti u obzir profil brzine po dubini.

Izrada rada se temelji na prikupljanju i analizi primarnih i sekundarnih izvora podataka. Sekundarne izvore podataka predstavljali su teorijska literatura te pregled istraživanja iz hrvatskih i međunarodnih izvora poput stručnih knjiga, znanstvenih članaka i internet stranica iz područja mjerenja protoka i radarskih mjerenja. Primarne izvore podataka predstavljali su rezultati samostalnog istraživanja i mjerenja koje je provedeno pomoću Google karata, radara, užeta i utega. S ciljem mjerenja protoka, prvo je potrebno određivanje površinske hrapavosti dna rijeke Drave, odraditi što veći broj mjerenja zbog toga što razina fluida nije konstanta na

poprečnom presjeku. Zatim je potrebno određivanje pogodnog mjesta na kojem će biti izvršeno mjerenje jer radarski uređaj posjeduje mogućnost mjerenja pod horizontalnim kutom, no važna je dubina na samom djelu mjerenja brzine, zbog čega je potrebno pozicioniranje iznad mjerne točke.

Prvo poglavlje prikazuje uvod u kojem se definira predmet i cilj istraživanja, metodologija rada te struktura. Drugo poglavlje obuhvaća teoriju strujanja fluida u otvorenim kanalima i njihovo mjerenje koje obuhvaća prikaz jednolikih stacionarnih strujanja u otvorenim kanalima, nejednolikog strujanja te nestacionarnog strujanja. Treće poglavlje predstavlja teoriju radarskog mjerenja strujanja fluida i princip rada radarskog uređaja. Četvrto poglavlje prikazuje empirijsko istraživanje mjerenju protoka rijeke. Peto poglavlje prikazuje rezultate provedenog mjerenja. Zadnje poglavlje je zaključno poglavlje, nakon čega se nalaze literatura i popis ilustracija te prilozi.

2. TEORIJA STRUJANJA FLUIDA U OTVORENIM KANALIMA I NJIHOVO MJERENJE

Strujanje fluida u otvorenim kanalima je smatrano strujanjem sa slobodnim vodnim licem, odnosno površinom na kojoj prevladava atmosferski tlak p_a a koje uzrokuje nagib terena i sila teža, zbog čega slobodnu vodnu površinu karakterizira piezometarska razina koja je jednaka geodetskoj koti. Teorija strujanja fluida u otvorenim kanalima je promatrana s promjenom oblika vodnog lica i promjenom parametara toka poput dubine i brzine u vremenu. Uzimajući u obzir oblik vodenog lica, strujanje u otvorenim kanalima se može podijeliti na [1]:

- jednoliko strujanje,
- nejednoliko strujanje.

Nadalje, uzimajući u obzir promjenu parametara u vremenu, postoje [1]:

- stacionarna strujanja s postupnim promjenama,
- nestacionarna strujanja s postupnim promjenama
- nestacionarna strujanja s naglim promjenama.

Stacionarno tečenje označava jednaku brzinu i tlak tokom vremena u bilo kojoj točki poprečnog presjeka. Nadalje, stacionarno strujanje se može podijeliti na [1]:

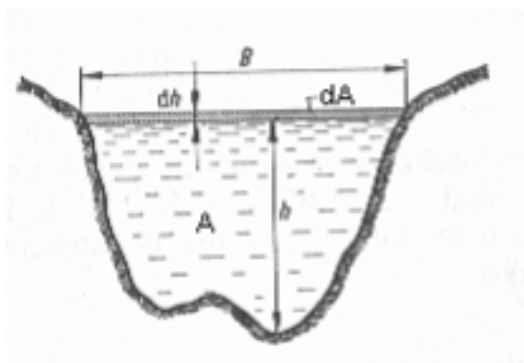
- jednoliko stacionarno strujanje,
- nejednoliko stacionarno strujanje.

Jednoliko stacionarno strujanje je moguće ostvariti u kanalima koje karakterizira konstantna brzina, oblik i površina presjeka, pad kanala i koeficijent hrapavosti uzduž cijele trase. Prethodno navedeno strujanje je moguće ostvariti u kanalima koji su umjetno stvoreni. Kada je riječ o nejednolikom stacionarnom strujanju, svi prethodno navedeni parametri su skloni stalnim promjenama.

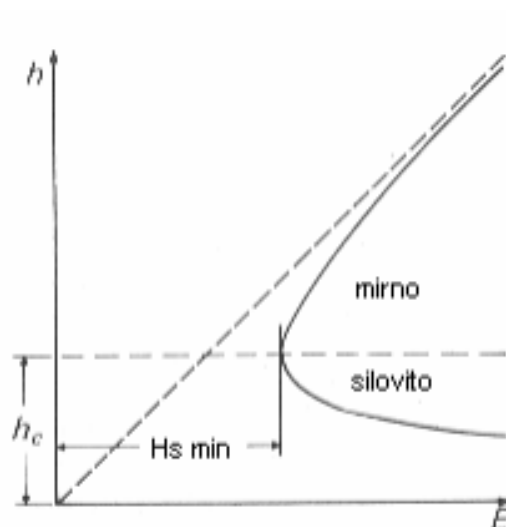
Ukoliko se referentna ravnina postavi na dno korita tada se na temelju Bernoullijeve jednadžbe veličina iskazana izrazom (2.1):

$$H_s = h + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (2.1)$$

može nazvati specifičnom energijom, odnosno energijom u usporedbi s dnom kanala koja se sastoji iz dubine vode (h) koja je ujedno i potencijalna energija iz kinetičke energije. Varijacija specifične energije u presjeku za $Q = const.$ i za zadanu geometriju pokazuje kako specifična energija ima minimum kod neke dubine koja je kritična dubina. Slika 2.1. prikazuje definicijsku skicu poprečnog presjeka otvorenog korita, dok slika 2.2. prikazuje krivulju specifične energije [2].



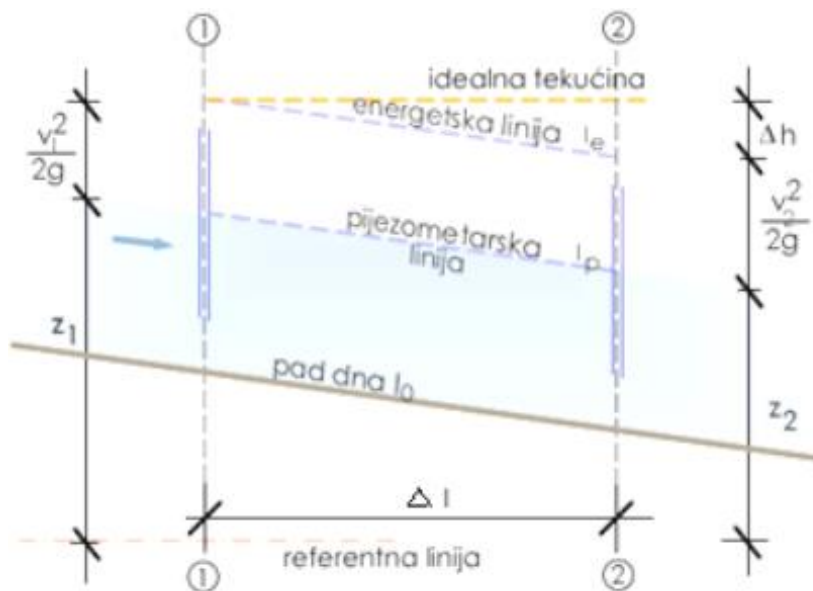
Slika 2.1: Definicijska skica poprečnog presjeka otvorenog korita [2]



Slika 2.2: Krivulja specifične energije [2]

2.1. Jednoliko stacionarno strujanje u otvorenim kanalima

Slika 2.3. prikazuje jednoliko stacionarno strujanje u kanalu.



Slika 2.3: Jednoliko stacionarno strujanje u kanalu [1]

Kako bi se ostvarilo jednoliko stacionarno strujanje, sljedeći uvjeti moraju biti ispunjeni:

- „stalni protok u koritu ($Q=\text{const.}$),
- stalna protjecajna površina korita (prizmatična korita), ($A=\text{const.}$),
- stalni hidraulički pad ($I=\text{const.}$),
- stalna hrapavost stijenke korita uzduž toka ($n=\text{const.}$),
- pravocrtno strujanje, tj. strujanje bez lokalnih otpora.“ [1].

Uvjeti koji su prethodno navedeni postoje u kanalima koji su umjetno izvedeni. Prizmatična korita predstavljaju korita koja obilježavaju nepromjenjivi oblik poprečnog presjeka, odnosno korita koji imaju stalan poprečni profil uzduž toka. Isto tako, postoje i korita koja imaju zaobljenu stijenu, kao polukružni, odnosno kružni profili u kanalizaciji, kojima je također stalan poprečni profil uzduž toka.

Pored stabilnosti površine i protoka je očekivan i nepromijenjen profil brzine uzduž toka, čime se usvaja srednja brzina po presjeku i kvaziparalelne strujnice s time da je raspored tlakova po vertikali hidrostatski. Shodno tome, jednoliko strujanje je moguće samo stacionarno, odnosno ustaljeno i nastaje pod prizmatičnim koritima [1].

Dubina vode (h) je konstantna, zbog čega je pad vodnog lica I_p jednak padu kanala I_0 , a zbog jednake brzinske visine u svim presjecima je jednak i padu linije energije kako je prikazano izrazom (2.2):

$$I_e : I_0 = I_p = I_e \quad (2.2)$$

Prisutna dubina vode kod jednolikog strujanja za zadani pad dna iznosi I_0 i protok Q predstavljaju normalni dubinu (h_0 [m]). Pad dna čija normalna dubina je jednaka kritičnoj se naziva kritičnim padom (I_{cr}). Ukoliko pad dna iznosi $I < I_{cr}$ onda je normalna smatrana većom od kritične dubine i tok je miran. U slučaju obrnutog stanja $I > I_{cr}$, onda je normalna dubina vodotoka manja od kritične dubine i tok je smatran silovitim [1].

U slučaju da kanal ima prethodno nabrojana svojstva, njegova je srednja brzina u profilu iskazana izrazom (2.3):

$$v = \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{c_f}} \sqrt{R} I_0 \quad (2.3)$$

gdje je:

\bar{v} - srednja brzina u profilu (m/s),

c_f – koeficijent otpora trenja (/),

R - hidraulički radijus (m),

I_0 - pad dna kanala (/).

Iz izraza (2.3.) se dobiva se Chezyjeva formula kojom se računa brzina strujanja u kanalima (2.4) i (2.5):

$$C = \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{c_f}} \quad (2.4)$$

$$v = C \sqrt{R} I_0 \quad (2.5)$$

Koeficijent C iz izraza (2.4) predstavlja Chezyjev broj koji predstavlja broj koji je određen lokalnim koeficijentom otpora trenja C_f u graničnom sloju.

Shodno tome, postoji podjela na:

- „laminarno strujanje,
- prijelazno strujanje,
- turbulentno strujanje, koje se opet dijeli na:
 - turbulentno hrapavo,
 - turbulentno glatko,
 - turbulentno prijelazno strujanje.“ [1].

S obzirom na to da je razvoj graničnog sloja u koritima ovisan o Reynoldsovom broju (Re), apsolutnoj hrapavosti (e) te obliku poprečnog presjeka (A), zaključeno je kako nije moguće pronaći neku jednostavnu zakonitost koja bi općenito vrijedila za sve oblike korita. Zbog čega je najčešće u primjeni Manningova formula za brzinu u koritu koja je prikazana i objašnjena kasnije u radu, zajedno s Chezyevim brojem.

2.2. Nejednoliko strujanje u otvorenim kanalima

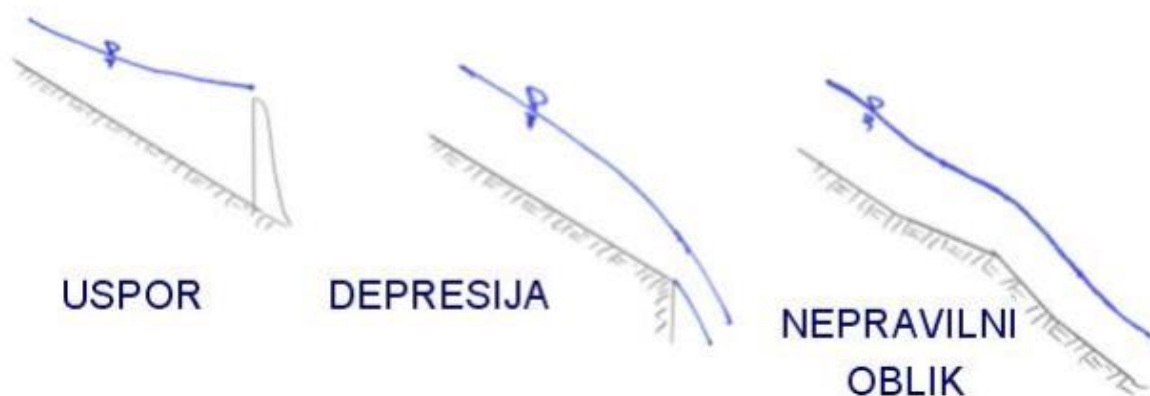
Nejednoliko strujanje se javlja najčešće u sagrađenim i prizmatičnim kanalima jer takav oblik strujanja zahtijeva jednakost poprečnog presjeka duž toka s oblikom i površinom. Slobodno vodno lice mora biti paralelno s dnom kanala, što znači da pad kanala mora biti konstantan. Prirodna korita imaju promjenjiv oblik i površinu poprečnog presjeka kao i pad kanala, zbog čega je pojava jednolikog tečenja vrlo rijetka kod njih [2].

Jednoliko tečenje se može pojaviti u zadanom obliku kanala i odabranom protoku, prilikom čega postoji samo jedna dubina – tzv. normalna dubina kod koje se uspostavlja ravnoteža između sile trenja i gravitacije. Postoji mnogo načina u kojima stacionarni protok ima mogućnost prolaska kroz jedan protočni profil. U tom slučaju slobodno provodno lice nije paralelno s dnom kanala, zbog čega je takvo strujanje jednoliko [2].

Postepene promjene u strujanju se odvijaju prilikom promjene geometrije vodotoka, primjene pada dna ili promjene hrapavosti na temelju omočenog oboda vodotoka. U mirnom tečenju postoje dva osnovna tipa krivulja [2]:

- krivulja uspora,
- krivulja depresije.

Slika 2.4 prikazuje osnovne oblike vodnog lica.



Slika 2.4: Osnovni oblici vodnog lica [2]

Dubina vode ima mogućnost povećavanja uzduž toka, no i svakom slučaju linija energije opada duž toka.

2.3. Nestacionarno strujanje

Tečenje u vodotocima, neovisno radi li se o umjetnim ili prirodnim vodotocima, je vrlo rijetko stacionarno. Nestacionarni hidraulički procesi su jako složeni i opisuju zakone hidrodinamike. Vanjski činitelji, umjetni ili prirodni određuju vremensku i prostornu promjenu protoka i vodostaja. Intenzitet djelovanja vanjskih faktora ovisi o karakteru nestacionarne pojave, zbog čega je moguće razlikovati dva tipa nestacionarnog, odnosno neuniformnog, odnosno nejednolikog strujanja [2]:

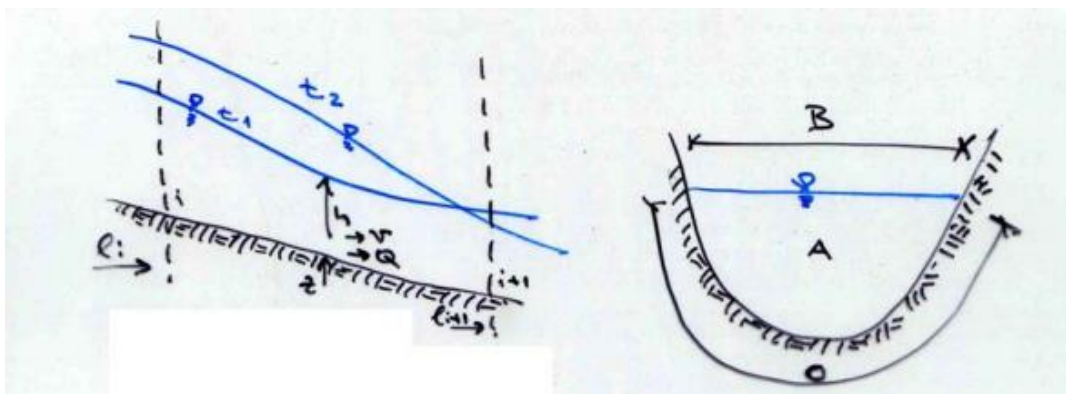
- strujanje s postupnim promjenama – promjene dubine i brzine u velikim dionicama vodotoka,
- strujanje s naglim promjenama – velike promjene dubine i brzine strujanja na malim dionicama vodotoka.

Blage i spore promjene u rubnim uvjetima na određenom izdvojenom djelu vodotoka uzrokuju odgovarajuću nestacionarnu pojavu, poput primjerice nestacionarnog strujanja s blagim promjenama koja predstavlja propagaciju vodnog vala u koritu koje je prirodno.

Primjer nestacionarnog toka s naglim promjenama se pojavljuje prilikom upravljanja hidrotehničkih objekata, naglog ulaska elektrane u pogon, naglog dizanja zapornica na brani,

rušenja brane i tako dalje. Prethodno navedene nagle promjene režima strujanja uzrokuju pojavu oštro izraženih valova u vodotoku koji se propagiraju na temelju zakona održavanja mase i količine gibanja.

U praksi je razlika između prethodno navedena dva tipa strujanja usvojena uz pretpostavku kako se prilikom strujanja s postepenim promjenama parametri toka dovoljno polako mijenjaju kako bi se efekti ubrzanja mogli zanemariti. Jednadžbe putem kojih se opisuje postepeno promjenjivo strujanje nije moguće primijeniti na strujanje s naglim promjenama. Slika 2.5 prikazuje definicijsku skicu za jednadžbe u otvorenom koritu [2].



Slika 2.5: Definićijska skica za jednadžbe tećenja u otvorenom koritu [2]

3. TEORIJA RADARSKOG MJERENJA STRUJANJA FLUIDA I PRINCIP RADA

Razina vode je u vodotocima mjerena vrlo jednostavnim mjerenjima. S ciljem određivanja odnosa protoka i dubine vode, potrebno je provesti hidrometrijska mjerenja kako bi se odredila konsumpciona krivulja koja je potrebna za provođenje ostalih hidroloških analiza poput projektiranja nasipa, brana i tako dalje. Konsumpciona krivulja se određuje na način da se za nekoliko dubina vode u koritu provede mjerenje protoka nakon čega se interpolira i ekstrapolira konsumpciona krivulja [2].

Prilikom provođenja mjerenja protoka u otvorenom vodotoku je potrebno usvojiti pretpostavku kako je strujanje stacionarno. U pravilu se kod svakog mjerenja koje se provodi kod promjenjivog vodostaja, mora poznavati odnos između stvarno izmjenjenog protoka i onog koji odgovara stacionarnom strujanju.

3.1. Radarski uređaj

Riječ radar (engl. *Radio Detection and Ranging*) predstavlja električni uređaj koji ima mogućnost izvršenja više funkcija poput određivanja udaljenosti i elevacije azimuta ili brzine određenog objekta. Rad radara se temelji na principu emitiranja refleksije elektromagnetskih valova na površinu promatranog predmeta. Udaljenost je moguće izračunati pomoću vremenskog perioda koji je proizašao iz slanja kratkog impulsa do mjesta na kojem se nalazi njegova refleksija. Shodno tome, brzina se dobiva putem poznavanja udaljenosti i vremena. Uređaj ne ometaju elementarne nepogode poput primjerice magle, kiše, snijega, mraka i tako dalje. U praksi postoji više primjera u kojima se radar koristi, no u ovom slučaju će biti promatran radarski uređaj koji mjeri površinsku brzinu koji je prikazan na slici 3.1.



Slika 3.1: Viatronics model VT-SVR-PRO3

Slika 3.1. prikazuje radar Viatronics model VT-SVR-PRO pomoću kojeg se izvršavaju precizna mjerenja površinskih brzina fluida potoka, kanala i rijeka.

3.2. Karakteristike radarskog uređaja

Tablica 3.1. prikazuje njegove karakteristike.

Tablica 3.1.: Karakteristike uređaja Viatronics model VT-SVR-PRO3

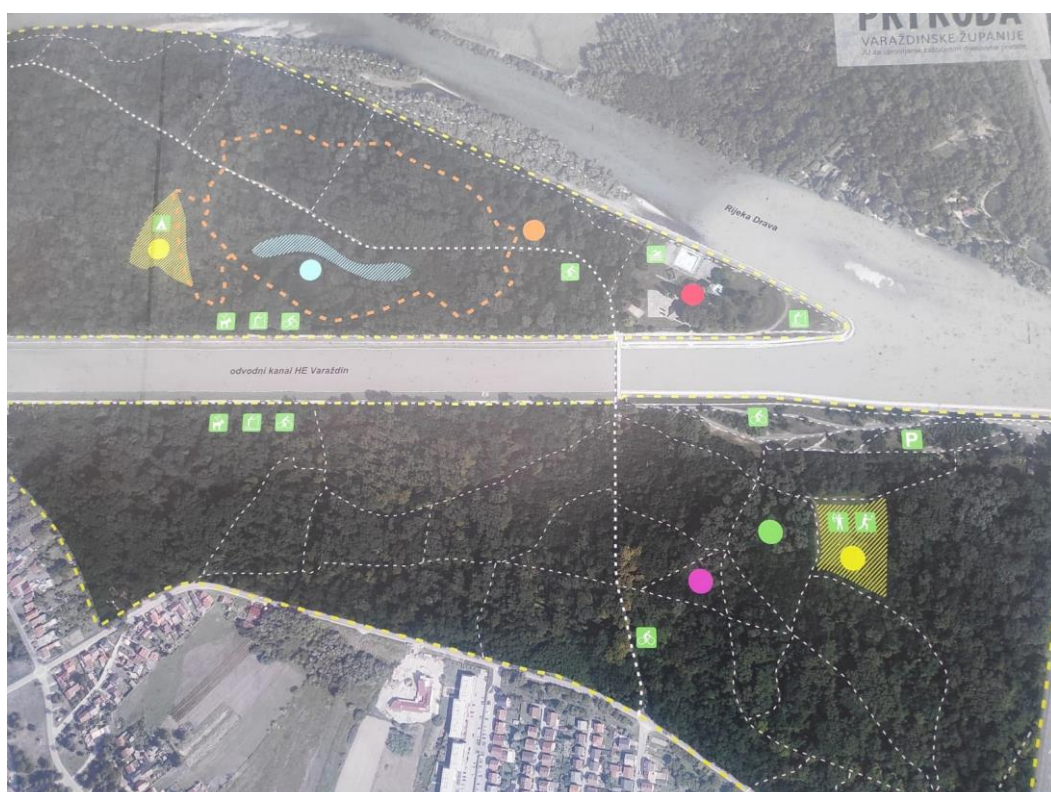
Karakteristike mjerenja	
Najveća i najmanja brzina	0,1-80 m/s
Točnost mjerenja	±0,3 %
Mehaničke karakteristike	
Težina	1,5 kg
Dimenzije (d/v/š)	(19/26,4/8,6) cm

Materijal kućišta	aluminij i kompoziti
Općenite karakteristike	
korekcija 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	2.4in / IPS LCD
Razlučivost/ boja	320*240 / 65000
Osvjetljenje/ kontrast	800 cd/m ² / 1000:1
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/1,3Ah
Potrošnja snage	
pripravnost/antena uključena	0,2A /0,45 A

4. MJERENJE PROTOKA RIJEKE

4.1. Opis lokacije

Varaždinsko jezero (slika 4.1.) predstavlja akumulacijsko jezero koje se nalazi na rijeci Dravi. Ovo jezero je podijeljeno između Varaždinske i Međimurske županije te je napravljeno kako bi zadovoljilo potrebe hidroelektrane u Čakovcu. Varaždinsko jezero postoji od početka 20. stoljeća te je ujedno vrlo popularno za ribolov i kupanje ljudi, posebice je popularna sjeverozapadna obala pored Gornjeg Kuršanca.



Slika 4.1: Kartografski prikaz jezera

Izvor rijeke Drave započinje u Južnom Tirolu koji je smješten u Italiji, nakon čega kroz Korušku (austrijska pokrajina) teče prema istoku, prilikom čega prolazi kroz Sloveniju i dolazi do Hrvatske u kojoj preuzima ulogu granice između Mađarske i Hrvatske, nakon čega svoj put nastavlja kroz Hrvatsku do grada Osijeka. Rijeka svoj put završava na granici Hrvatske sa Srbijom, gdje pretače u rijeku Dunav. Shodno tome, ukupna dužina rijeke Drave iznosi 725 km, dok 323 km rijeke prolazi kroz Hrvatsku [3].

Mjerenje radarom je obavljeno na mostu iznad rijeke Drave, kako je prikazano na slici 4.2.



Slika 4.2: Most na kojem je obavljeno mjerenje radarom

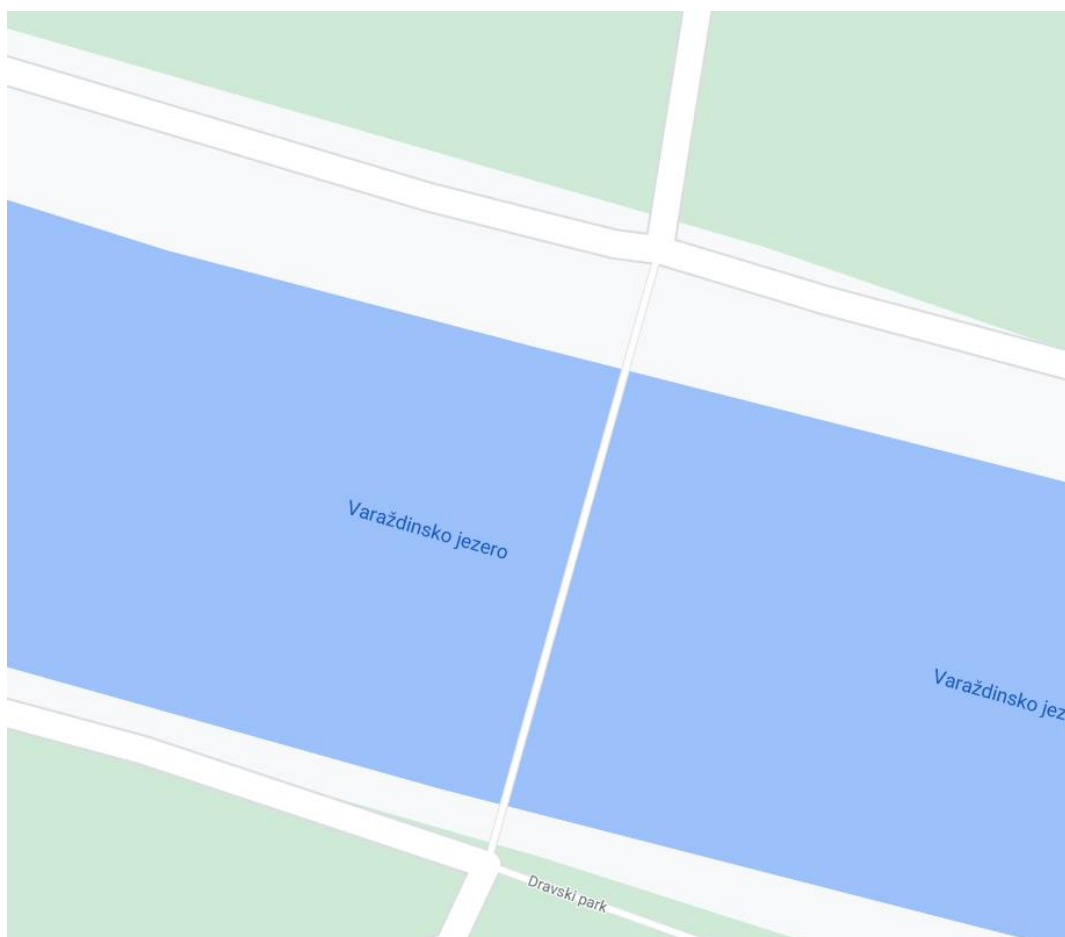
Rijeka Drava pogodna je za iskorištavanje u smislu gradnje hidroelektrana, a jedan od velikih razloga tome je relativno povoljan raspored protoka tijekom cijele godine koji osigurava velika mogućnost akumuliranja vode iz snijega i leda.

4.2. Uvod u mjerenje protoka

S ciljem mjerenja protoka, prvo je potrebno određivanje površinske hrapavosti dna rijeke Drave, pri čemu treba odraditi što veći broj mjerenja zbog toga što razina fluida nije konstanta na poprečnom presjeku. Zatim je potrebno određivanje pogodnog mjesta na kojem će biti izvršeno mjerenje jer radarski uređaj posjeduje mogućnost mjerenja pod horizontalnim kutom, no važna je dubina na samom djelu mjerenja brzine, zbog čega je potrebno pozicioniranje iznad mjerne točke. Potrebno je osmišljavanje načine izmjera ili očitavanja dubine rijeke na spomenutim dijelovima, zbog čega je potrebno odabrati rijeku poznatog volumenskog protoka zbog provjere dobivenih rezultata. Mjerenje se provodi putem električnog uređaja.

4.3. Postupak mjerenja protoka

Postupak mjerenja protoka je proveden dana 16. siječnja na gore spomenutoj lokaciji na Varaždinskom jezeru na rijeci Dravi na mostu prije same hidroelektrane, kako je prikazano na slici 4.3.



Slika 4.3: Prikaz lokacije mjerenja preko Google karte

Mjerenje je izvršeno s ukupno pet različitih lokacija na mostu koje su otprilike jednako udaljene jedna od druge. Cilj mjerenja je bio dobivanje prosječne brzine te prosječne dubine. Izraz izračuna aritmetičke vrijednosti je prikazan u nastavku (4.6):

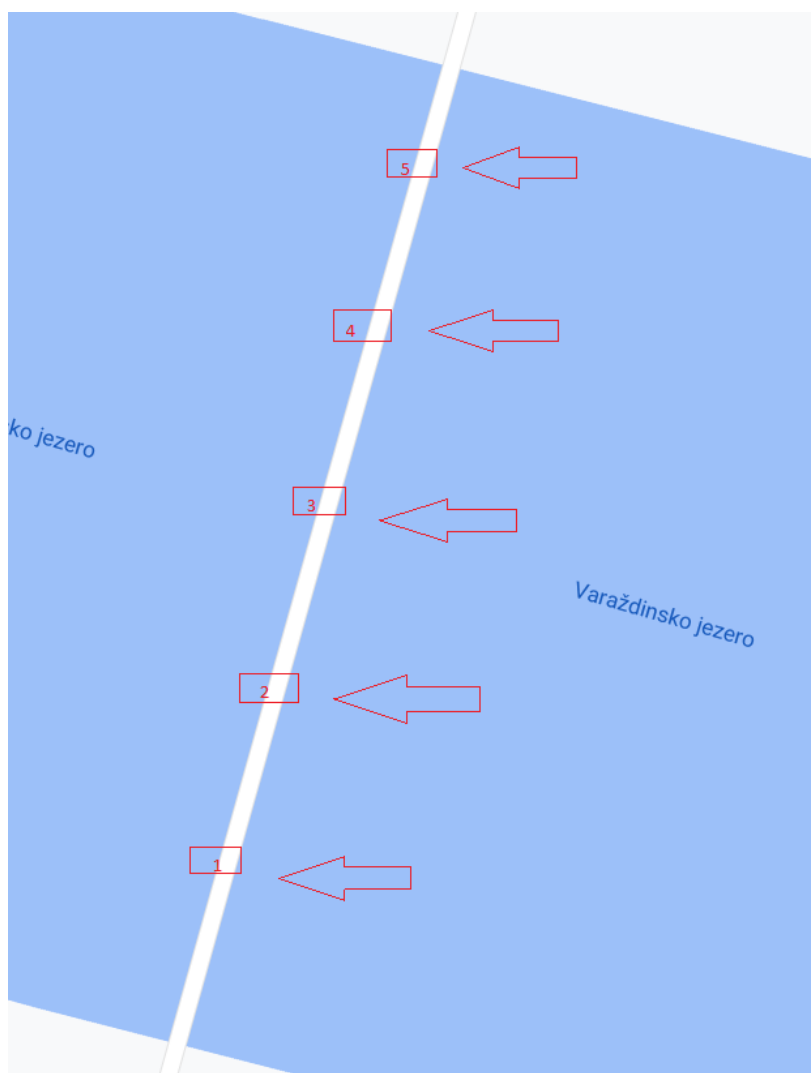
$$x = \frac{\sum x_n}{n} \quad (4.6)$$

gdje je:

n - broj mjerenja,

x - tražena vrijednost.

Slika 4.4 prikazuje lokacije svakog mjerenja pojedinačno.



Slika 4.4: Prikaz lokacija mjerenja

Mjerenje dubine je izvršeno putem užeta i utega (slika 4.5). Uteg je zavezan za kraj užeta i spušten u rijeku, nakon čega je izmjereno koliko je užeta potonulo. Svaki metar je na užetu bio dodatno označen vezicom. Kako bi se ostvarilo prethodno navedeno mjerenje, potrebno je obratiti pozornost na stvari poput dovoljne mase utega, kako ga vodotok ne bi ponio u smjeru toka vode i kako bi se na užetu moglo pravilno uočiti koliko je užeta ustvari potonulo. Za ovo mjerenje je najbolje odabrati kamen s malom površinom, velikom masom i pogodnim mjestom za stezanje užeta.



Slika 4.5: Prikaz metode mjerenja dubine

Mjerenje dubine se provodilo putem okomitog spuštanja užeta s utegom u rijeku kako je i prikazano na slici 4.6, uže se spuštalo sve do osjetnog smanjenja težine zbog toga što je kamen dotaknuo dno. Nakon što je kamen dotaknuo dno, uže se ostavlja u vodi još neko vrijeme kako bi upilo vodu (slika 4.6).

a)



b)



c)



Slika 4.6: Mjerenje dubine: a) bacanje kamena u rijeku; b) spuštanje kamena do dna; c) ostavljanje uža u vodi da upije vodu

Nakon što je određena dubina rijeke, slijedi mjerenje površinske brzine fluida pomoću radara, koji je postavljen pod određenim nagibom, kako je prikazano na slici 4.7.



Slika 4.7: Mjerenje površinske brzine fluida radarom

Na svakom pojedinačnom mjerenju je potrebno provesti mjerenja pod istim nagibom, koje je moguće provesti zbog prikaza vertikalnog kuta na ekranu uređaja. No, zbog dodatne provjere je nagib izmjeren dodatno putem aplikacije na mobilnom telefonu, kako je prikazano na slici 4.8. Prethodno navedeni postupak se provodi na svakom mjerenju.



Slika 4.8: Provjeravanje jednakog nagiba na svakom mjerenju

4.4. Protok HE Varaždin

Nakon mjerenja dobivena je informacija u HE VARAŽDIN o točnom protoku. Hidroelektrana Varaždin (slika 4.9) je smještena na sjeverozapadu Hrvatske, točnije na rijeci Dravi koja se nalazi na području Varaždinske županije, pored grada Varaždina. Ova hidroelektrana obuhvaća dionicu rijeke od Ormoža do Varaždina (r. km 309 do r. km 288).



Slika 4.9: Hidroelektrana Varaždin [4]

Akumulacijsko jezero je djelomično smješteno i u Sloveniji. Snaga hidroelektrane iznosi 94,635 MW, te je ova hidroelektrana prva od tri višenamjenske hidroelektrane koje su smještene na Dravi i koje pored proizvodnje električne energije sudjeluje i u procesu opskrbe vodom, obrane od poplava, zaštiti zemlje od erozije, u prometu, odvodnji i navodnjavanju [4].

Obilježja ove hidroelektrane jesu protočnost, niskotlačnost i derivativnost s akumulacijom površine 2,8 km² i zapremnine 8 hm³ koje služi za dnevno uređenje protoka. Hidroelektrana se sastoji od dva ugrađena agregata koji posjeduju Kaplan turbine na koje se nadovezuju generatori s raspoloživom snagom od 47 MW.

Ukupna priključna snaga ove hidroelektrane iznosi 94,635 MW:

- agregat A - 47 MW,
- agregat B - 47 MW,
- agregat C - 0,635 MW.

Ukupni instalirani protok hidroelektrane iznosi 450 m³/s – operativno 500 m³/s.

Prosječni iznos godišnje proizvodnje električne energije u hidroelektrani Varaždin iznosi 450 GWh, a rekordna maksimalna proizvodnja u godini je zabilježena 2014. godine i iznosila je 636 GWh, dok je minimalna proizvodnja u godini zabilježena 2003. godine i iznosila je 370 GWh električne energije.

Hidroelektrana Varaždin također ima i implementiran Sustav upravljanja okolišem, kvalitetom i energijom koji je certificiran i usklađen s normama ISO 14001:2015, 9001:2015 i 50001:2018. Isto tako, ova hidroelektrana je organizacijski dio grupe Glavne elektrane (GHE) Drava te Proizvodnog područja Sjever, dok se upravljanje proizvodnjom provodi putem Centra proizvodnje Sjever. Dobiven je podatak od poslovođe hidroelektrane, kako posljednje izmjereni protok iznosi 215 m³/s. Volumni protok je moguće provjeriti i na internetu, no podatci na internet stranicama nisu precizni kao ovaj podatak koji je očitao u hidroelektrani.

5. REZULTAT

U nastavku tablica 5.1 prikazuje rezultate koji su dobivene mjerenjem.

Tablica 5.1: Rezultati mjerenja radarskim uređajem

Mjerenje	Površinska brzina fluida v_p [m/s]	Dubina c [m]
1.	0,7	3
2.	0,7	3,8
3.	1,1	8
4.	0,8	7,5
5.	0,7	7,8

Rezultati prikazani u tablici 5.1 pokazuju kako je površinska brzina fluida veća ukoliko je i dubina rijeke veća. Aritmetička sredina površinske brzina fluida iznosi 0,8 m/s, dok aritmetička sredina dubine iznosi 6 m. Shodno tome, potrebno je određivanje načina na koji bi bilo moguće izračunati srednju brzinu preko površinske.

S obzirom na to da su dobiveni rezultati vezani uz brzinu fluida na površini, nadalje je potrebno računanje srednje brzine fluida kako bi se izračunao protok. Potrebno je određivanje Manningov i Stricklerov koeficijent koji daju rezultat sastava dna, koje će ujedno biti korisno poslije, kada će se odabirati koeficijent putem kojeg se množi površinska brzina s ciljem dobivanja srednje brzine. Chezyev broj se određuje putem sljedećeg izraza (5.7):

$$v = C\sqrt{RI_0} \quad (5.7)$$

gdje je:

v - srednja brzina fluida,

I_0 - pad dna kanala,

R - hidraulički radijus,

C - Chezyjev broj.

Kako bi se dobio hidraulički radijus, potrebno je poznavanje dužine i dubine rijeke. Dužina rijeke je izmjerena putem Google karata, kako je i prikazano na slici 5.1.



Slika 5.1: Izmjerena dužina jezera

S obzirom na to da je dubina rijeke određena ranije u radu, dobiven je profil poprečnog presjeka koji je prikazan na slici 5.2. Hidraulički radijus predstavlja liniju pomoću koje fluid dodiruje kanal, dok R iznosi 74,5 m.

Srednja dubina je izračunata putem izraza za aritmetičku sredinu (5.10):

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

Srednja dubina c iznosi 6 m i širina d iznosi 68 m, shodno tome površina poprečnog presjeka A iznosi 408 m². U ovom su slučaju određene sve nepoznanice osim brzine, zbog čega se u izraz uvrštava (5.8). Srednja brzina fluida iznosi (5.11):

$$v = 0,59 \frac{m}{s} \quad (5.11)$$

Što se tiče pada dna kanala, on je relativno malen, zbog čega vrijedi kako je kut koji tvori nagib s horizontalom $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ a $\cos \alpha \approx 1$. Svi navedeni podatci su poznati, zbog čega se uvrštava izraz (5.12) i izračunava se Chezyjev broj [5]:

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

Chezyjev broj iznosi 0,0684, dok se za dobivanje Manningovog koeficijenta hrapavosti koristi sljedeći izraz (5.13):

$$n = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{c} \quad (5.13)$$

gdje je:

n - Manningov koeficijent hrapavosti.

Rezultat Manningovog koeficijenta hrapavosti iznosi 0,3. Tablica 5.2. prikazuje određivanje stanja rijeke koje je potrebno prilikom određivanja srednje brzine rijeke preko površinske razine rijeke. Temeljem koeficijenta hrapavosti, na dnu rijeke se nalazi zemlja s oblucima i šašem ili šljunkom.

Tablica 5.2: Manningov i Stricklerov koeficijent hrapavosti za pojedine vrste [1].

Kat.	Vrste obloge	n (s/m^{1/3})	K=1/n (m^{1/3}/s)
I	<i>Osobito glatke površine; emajlirane ili glazirane površine</i>	0,009	111
II	<i>Vrlo brižno oblanjane daske i dobro sastavljene; najbolja čista cementna žbuka (zaglađena)</i>	0,010	100
III	<i>Najbolja cementna žbuka (1/3 pijeska); čiste nove grnčarske cijevi; cijevi od lijevana željeza; dobro sastavljene željezne cijevi; dobro oblanjane daske</i>	0,011	90,9
IV	<i>Neoblanjane daske, dobro sastavljene; vodovodne cijevi u normalnim okolnostima, bez veće inkrustacije; vrlo čiste cijevi za otpadnu vodu i vrlo dobar beton.</i>	0,012	83,3
V	<i>Drvena obloga dobro obrađena; dobra obloga od opeke; cijevi za otpadnu vodu u normalnim okolnostima; ponešto nečiste cijevi za vodu.</i>	0,013	76,9
VI	<i>Zaprljane cijevi (vodovodne i za otpadnu vodu); betonirani kanali u srednjim okolnostima</i>	0,014	71,4
VII	<i>Srednje dobra obloga od opeke; tarac od klesana kamena u srednjim okolnostima; dovoljno zaprljane cijevi za odvod otpadne vode; cerada na drvenim letvama</i>	0,015	66,7
VIII	<i>Dobar tarac od lomljena kamena; stara (oštećena) obloga od opeke; relativno grub teren</i>	0,017	58,8
IX	<i>Kanal pokriven debelim stabilnim slojem mulja, kanali u zbijenom sitnom šljunku, pokriveni neprekidnim tankim slojem mulja (pri tome sve u besprijekornom stanju)</i>	0,018	55,6
X	<i>Srednje dobar tarac od lomljena kamena; tarac od oblutaka; kanali usječeni u kamenu; kanali u lesu, prekriveni tankim slojem mulja (u običnom stanju)</i>	0,02	50,0
XI	<i>Kanali u zbijenoj glini; kanali u lesu, šljunku i zemlji, pokriveni isprekidano tankim slojem mulja; veliki zemljani kanali u dobrom stanju</i>	0,0225	44,4
XII	<i>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)</i>	0,025	40,0
XIII	<i>Veliki zemljani kanali u nešto slabijem stanju i mali kanali u dobrom stanju.</i>	0,0275	36,4
XIV	<i>Zemljani kanali u slabom stanju, npr. sa šašem, oblucima ili šljunkom na dnu, poprilično zarasli travom, s odronjavanjem obalnih kosina i sl.; rijeke u dobrim okolnostima tečenja</i>	0,03	33,3
XV	<i>Kanali u vrlo lošim okolnostima (s nepravilnim profilima, poprilično zatrpani kamenom i s vodenom travom); rijeke u relativno dobrom stanju, ali s nekom količinom kamena i šaši</i>	0,035	28,6
XVI	<i>Kanali u vrlo lošem stanju (sa znatnim vododerinama i odronjavanjima obala, zarasli šašem, s krupnim kamenjem na dnu i sl.); rijeke s pogoršanim okolnostima tečenja (u usporedbi s prethodnom t.), s povećanom količinom kamena i šaši, s vijugavim koritom</i>	0,04 i više	25,0 i manje

Najlakši način za određivanje srednje brzine predstavlja množenje maksimalne brzine (V_{max}). U ovome slučaju ju predstavlja površinska brzina jer je aproksimirana na taj način s koeficijentom hrapavosti (P).

Koeficijent hrapavosti za planinske rijeke iznosi 0,55 dok za rijeke koje su obložene šljunkom iznosi 0,6, za rijeke s glinenim ili neravnim pješčanim dnom iznosi 0,85. S obzirom na to kako je putem Manningovog koeficijenta određeno kako se na dnu nalazi šljunak, P iznosi 0,6 kako je prikazano izrazom (5.14):

$$v = v_p \cdot P \quad (5.14)$$

Srednja brzina protoka fluida u rijeci Dravi na promatranom poprečnom presjeku iznosi 0,48 m/s. S obzirom na to da su poznati svi potrebni podatci za dobivanje protoka, poznate su i srednja brzina v i površina poprečnog presjeka A , podatci se uvrštavaju u izraz za protok (5.8) i dobiveni rezultat iznosi:

$$Q = 195,84 \text{ m}^3/\text{s}$$

6. ZAKLJUČAK

U ovome radu bilo je potrebno izmjeriti protok otvorenog vodotoka radarskim uređajem. Mjerenje se vršilo radarskim uređajem Viatronics model VT-SVR-PRO3. Problem s radarom je taj što mjeri samo površinsku brzinu tekućine, a izračunavanje protoka zahtijeva srednju brzinu i površinu poprečnog presjeka. Površina poprečnog presjeka izračunava se iz dubine i širine. Dubina nije stalna cijelom širinom otvorenog toka vodotoka, već je promjenjiva. Potrebno je provjeriti rezultate, odnosno potrebno je znati stvarni protok vodotoka koji uspoređujemo s izračunatim s ciljem provjere točnosti mjerenja. Volumni protok vode kroz vodotok nije stalan, već je podložan promjenama zbog različitih utjecaja, stoga je potrebno znati koliki je volumni protok u vrijeme kada su mjerenja obavljena, kako bi imali što točniju informaciju prilikom provjere rezultata. Kod mjerenja otvorenog protoka vodotoka radarskim uređajem dobiva se površinska brzina fluida, a za provedbu ovoga mjerenja je potrebna prosječna brzina. Najveća brzina je blizu površine, za izračunavanje prosječne brzine potrebno je znati hrapavost dna površine i dubinu. Za volumni protok potrebno je pomnožiti srednju brzinu tekućine s površinom poprečnog presjeka. Površina se izračunava po dubini i širini. Dubina nije konstantna pa je potrebno mjeriti s više pozicija i izračunati aritmetičku sredinu koja se množi sa srednjom brzinom. Što se dubina mjeri na više pozicija, to je prosječna dubina točnija, a točnija je ujedno i površina presjeka. Slično tome, površinska brzina bit će točnija ako se mjeri na više položaja. Mjerenja su obavljena na 5 pozicija.

Cilj ovog projekta bila je utvrditi pouzdanost tj. preciznost mjerenja protoka pomoću radara. Prema učinjenim mjerenjima i dobivenim rezultatima smatram da je projekt uspješno ostvaren. Razlika dobivenog protoka i stvarnog protoka je mala, točnije iznosi 9%, što je prihvatljivo. Protok vodotoka se računa preko površine poprečnog presjeka i srednje brzine fluida koji je izračunat preko koeficijenta hrapavosti koji je bio pretpostavljen. Površina poprečnog presjeka dobiva se mjerenjem na 5 točaka te izračunom aritmetičke sredine, nepoznanica je dubina između mjerenih točaka. Samo mjerenje dubine izvršeno je na način opisan u tekstu prije, za koji je smatrano kako nije imao najveću preciznost i da su tu moguće pogreške. Dobivena površinska brzina, pretpostavljena je kao najveća, međutim najveća se brzina fluida nalazi nešto ispod površine, mjerenja su ponavljana i izračunata je aritmetička sredina kako bi rezultat bio precizniji. Preko izmjerene površinske brzine izračunata je srednja brzina fluida. U ovom slučaju gdje je bilo puno pretpostavki realno je za očekivati da rezultat neće biti u 1% preciznosti. Radarski uređaj jednostavan je za koristiti i može se koristiti za izmjeru samo površinske brzine fluida za različite razloge, ali smatram da se ne može koristiti za preciznije

dobivanje rezultata tj. protoka. Za preciznije rezultate potrebno bi bilo izvršiti dodatna mjerenja dubine i dužine, poznavati točan oblik korita i točne dubine kako bi rezultat bio visoke preciznosti.

7. LITERATURA

- [1] Kolar, I., Volf, G., Žic, E.: „Analiza protočnosti kanala različitih oblika poprečnih presjeka i obloženosti. Zbornik radova (Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci), XXI (1), 193-207. s Interneta, <https://doi.org/10.32762/zr.21.1.12> (18.01.2023.)
- [2] Tečenje u otvorenim koritima, s Interneta, https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/PREDAVANJA_1/PREDAVANJA/h02-tecenje_u_otvorenim_koritima.pdf (18.01.2023.)
- [3] Karlović, R.: „Ihtiofauna rijeke Drave na području pod utjecajem hidroelektrana“, Prirodoslovno - matematički fakultet, Zagreb, s Interneta, <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:407121> (18.01.2023.)
- [4] HEP proizvodnja HE Varaždin, s Interneta, <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-sjever/he-varazdin/1532> (18.01.2023.)
- [5] Postupno promjenjivo tečenje u otvorenom koritu, s Interneta, https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/V01-Nejednoliko_tecenje.pdf (18.01.2023.)

8. POPIS SLIKA

Slika 2.1: Definijska skica poprečnog presjeka otvorenog korita [2].....	4
Slika 2.2: Krivulja specifične energije [2].....	4
Slika 2.3: Jednoliko stacionarno strujanje u kanalu [1].....	5
Slika 2.4: Osnovni oblici vodnog lica [2].....	8
Slika 2.5: Definijska skica za jednadžbe tečenja u otvorenom koritu [2]	9
Slika 3.1: Viatronics model VT-SVR-PRO3.....	11
Slika 4.1: Kartografski prikaz jezera	13
Slika 4.2: Most na kojem je obavljeno mjerenje radarom.....	14
Slika 4.3: Prikaz lokacije mjerenja preko Google karte	15
Slika 4.4: Prikaz lokacija mjerenja	16
Slika 4.5: Prikaz metode mjerenja dubine	17
Slika 4.6: Mjerenje dubine: a) bacanje kamena u rijeku; b)spuštanje kamena do dna; c) ostavljanje uža u vodi da upije vodu	18
Slika 4.7: Mjerenje površinske brzine fluida radarom	19
Slika 4.8: Provjeravanje jednakog nagiba na svakom mjerenju	20
Slika 4.9: Hidroelektrana Varaždin [4].....	21
Slika 5.1: Izmjerena dužina jezera.....	24
Slika 5.2: Aproksimirani profil poprečnog presjeka korita rijeke	25

9. POPIS TABLICA

Tablica 3.1.: Karakteristike uređaja Viatronics model VT-SVR-PRO3	11
Tablica 5.1: Rezultati mjerenja radarskim uređajem.....	23
Tablica 5.2: Manningov i Stricklerov koeficijent hrapavosti za pojedine vrste [1].	27

10. SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada bilo je izmjeriti protok otvorenog kanala pomoću radarskog uređaja Viatronics SVR-3 Pro koji mjeri površinsku brzinu. S ciljem određivanja protoka bilo je potrebno saznavanje površine poprečnog presjeka i srednje brzine fluida. Površina poprečnog presjeka kanala je bila dobivena putem množenja aritmetičke sredine dubine i širine kanala koja je određena preko Google karte. Nakon toga su određeni svi parametri koji su potrebni za izračun srednje brzine fluida. Kontaktiranjem HE Varaždin je dobivena informacija kako stvarni protok rijeke Drave iznosi $215 \text{ m}^3/\text{s}$ te je pomoću te informacije uspoređen protok dobiven mjerenjem koji iznosi $195,84 \text{ m}^3/\text{s}$. To je odstupanje od svega 9% s obzirom na to da je puno parametara za određivanje srednje brzine pretpostavljeno kao i izračun površine poprečnog presjeka.

Ključne riječi: *radarski uređaj, srednja brzina, protok, dubina, površinska brzina*

11. SUMMARY

The aim of this final work was to measure open channel flow using a Viatronics SVR-3 Pro surface velocity radar device. In order to determine the flow, it was necessary to know the cross-sectional area and the mean velocity of the fluid. The cross-sectional area of the channel was obtained by multiplying the arithmetic mean of the depth and width of the channel, which was determined via the Google map. After that, all the parameters needed to calculate the mean fluid velocity were determined. By contacting HPP Varaždin, information was obtained that the actual flow of the Drava River is 215 m³/s, and with the help of this information, the flow obtained by measurement, which is 195,84 m³/s, was compared. This is a deviation of only 9%, given that many parameters for determining the average speed were assumed, as well as the calculation of the cross-sectional area.

Key words: *radar device, mean velocity, flow, depth, surface velocity*