

Hidrometrijska mjerenja na potoku Brajda

Zubak, Lola

Undergraduate thesis / Završni 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:157:315466>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



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**

Lola Zubak

Hidrometrijska mjerenja na potoku Brajda

Završni rad

Rijeka, 2024.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij

Hidrologija

Lola Zubak

JMBAG: 0114037090

Hidrometrijska mjerenja na potoku Brajda

Završni rad

Rijeka, rujan 2024.

IZJAVA

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i 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.

Lola Zubak

U Rijeci, 5. rujan 2024.

ZAHVALA

Želim se zahvaliti osobama koje su mi pružile sve potrebno da bi došla do ovog rada i uspješno ga napisala.

Zahvaljujem se mentoru Doc.dr.sc. Ivani Sušanji Čule, na stručnoj pomoći, prenesenom znanju, podršci prilikom odabira teme i na motivirajućem duhu tijekom izrade ovoga rada.

Hvala prijateljima koji su mi bila moralna podrška, ali veliko hvala i kolegama i kolegicama s kojima sam ravnomjerno dijelila timske zadatke tokom studiranja.

Hvala mojim roditeljima koji su mi omogućili studiranje, na njihovom strpljenju i razumijevanju tijekom studiranja jer bez njih do ovoga rada ne bi bilo moguće doći, u znak zahvale ovaj rad posvećujem upravo njima.

SAŽETAK

Mjerenje brzine vode u otvorenim vodotocima ključno je za analizu protoka, upravljanje vodnim resursima te zaštitu od poplava i erozije. Rad istražuje različite metode mjerenja brzine vode, uključujući tradicionalne i moderne tehnike, te naglašava važnost točnosti i prilagodljivosti metoda. Analizirane su prednosti i nedostaci svake metode te njihova primjena u praksi. Posebna pažnja usmjerena je na vodotok Brajda u Rijeci, gdje su provedena mjerenja geometrije kanala i brzine strujanja na dvjema lokacijama: perilu Brajda i kanalu ispred Dječje kuće. Usporedba između izračunatih i izmjerenih protoka pokazala je razliku od 7% na kanalu ispred Dječje kuće i 12,7% na perilu Brajda, što ukazuje na potrebu za dodatnom kalibracijom metoda proračuna. Rad također razmatra metode prikupljanja podataka o geometriji kanala i procesu konstrukcije protočne krivulje. Analizom rezultata dobivenih ADCP uređajem sugerira se potreba za optimizacijom metoda mjerenja i proračuna protoka.

KLJUČNE RIJEČI: mjerenje brzine vode, otvoreni vodotok, metode mjerenja, vodotok Brajda, geometrija kanala, brzina strujanja, ADCP uređaj

ABSTRACT

Measuring the speed of water in open watercourses is crucial for flow analysis, water resource management, and protection against floods and erosion. In this paper, various methods of measuring water speed are examined, including both traditional and modern techniques. The advantages and disadvantages of each method, as well as their practical applications, are analyzed. The paper's focus is the Brajda watercourse in Rijeka, where measurements of channel geometry and flow velocity were conducted at two locations: Brajda Weir and the channel in front of the Children's Home. The comparison between calculated and measured flows revealed a difference of 7% at the channel in front of the Children's Home and 12.7% at the Brajda Weir, indicating the need for further calibration of the calculation methods. The study also considers methods for collecting data

on channel geometry and the process of constructing flow rating curves. Analysis of results obtained with the ADCP device suggests the need for optimization of measurement and flow calculation methods

KEYWORDS: water speed measurement, open watercourse, measurement methods, Brajda watercourse, channel geometry, flow velocity, ADCP device

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	MJERENJE BRZINE VODE U OTVORENOM KANALU I IZRAČUN PROTOKA	2
2.1.	Uvodno o mjerenju brzine vode u otvorenom kanalu	2
2.2.	Mjerenje brzine vode	2
2.2.1.	Hidrometrijsko krilo	3
2.2.2.	Hidrometrijski plovci.....	4
2.2.3.	Pito cijev	6
2.2.4.	Elektromagnetski mjerač brzine strujanja vode.....	7
2.2.5.	ADCP.....	9
2.3.	Mjerenje geometrije profila kanala.....	12
2.3.1.	Uvodno o mjerenju geometrije profila kanala.....	12
2.3.2.	Način mjerenja geometrije profila.....	12
2.4.	Izračun protoka.....	16
3.	KONSTRUIRANJE PROTOČNE KRIVULJE	19
3.1.	Uvodno o konstrukciji protočne krivulje.....	19
3.2.	Načini konstruiranja protočne krivulje	19
4.	PROTOK VODOTOKA BRAJDA (RIJEKA).....	22
4.1.	Uvodno o vodotoku Brajda.....	22
4.2.	Opis instrumenata i načina mjerenja	23
4.3.	Opis prikupljenih podataka.....	25
4.4.	Geometrija kanala.....	26
5.	PROTOK	28
5.1.	Protok na perilu Brajda.....	28
5.2.	Protok na kanalu ispred Dječje kuće	28
6.	DISKUSIJA REZULTATA	30
7.	ZAKLJUČAK.....	32
8.	LITERATURA	33

POPIS SLIKA

Slika 1. Hidrometrijsko krilo i njegova primjena u vodi [5], [1].....	4
Slika 2. Hidrometrijski površinski plovci (a), dubinski plovak (c i d) i plovak – palica (b); mjere iskazane u cm [4].....	5
Slika 3. Načelno mjerenje brzine vode Pitotovom cijevi [4].....	7
Slika 4. Elektromagnetski mjerač brzine strujanja vode OTT Nautilus (Slika autora.)	8
Slika 5. ADCP uređaj (Slika autora)	10
Slika 6. Mobilni način mjerenja strujanja vode ADCP uređajem (Slika autora.)	10
Slika 7. Podaci zabilježeni u aplikaciji za ADCP uređaj (Slika autora.).....	11
Slika 8. Oprema za geodetsko mjerenje uz pomoć nivelmana [14]	13
Slika 9. Mjerenje geometrije profila uz pomoć nivelmana [15].....	14
Slika 10. Trodimenzionalni model kanala dobiven LiDAR metodom [20]	16
Slika 11. Protočna krivulja [21].....	20
Slika 12. Perilo Brajda (Slika autora.).....	22
Slika 13. Mjerenje brzine strujanja elektromagnetskim mjeračem na perilu Brajda (Slika autora.).....	24
Slika 14. Uređaj provodi mjerenje dok ne stabilizira očitavanje i prikaže konačnu brzinu (Slika autora.)	24
Slika 15. Prikaz geometrije kanala na perilu Brajda (Slika autora.).....	26
Slika 16. Prikaz geometrije kanala ispred Dječje kuće (Slika autora.).....	27
Slika 17. Podaci očitani u aplikaciji a dobiveni pomoću ADCP uređaja na perilu Brajda .	30
Slika 18. Podaci očitani u aplikaciji a dobiveni pomoću ADCP uređaja na kanalu ispred Dječje kuće	31

POPIS TABLICA

Tablica 1. Koeficijent k u odnosu susjednih brzina u okomicama profila kanala.....	18
Tablica 2. Prikaz brzina dobivenih mjerenjem elektromagnetskim mjeračem brzine strujanja vode na perilu Brajda.....	25
Tablica 3. Prikaz brzina dobivenih mjerenjem elektromagnetskim mjeračem brzine strujanja vode na kanalu ispred Dječje kuće	26
Tablica 4. Prikaz površina pojedine lamele na čijoj sredini se nalazi okomica, srednjih brzina pojedine okomice te koeficijenta k potrebnih za izračun protok na perilu Brajda ...	28
Tablica 5. Prikaz površina pojedine lamele na čijoj sredini se nalazi okomica, srednjih brzina pojedine okomice te koeficijenta k potrebnih za izračun protok na kanalu ispred Dječje kuće	29

1. UVOD

Ključan aspekt u hidrotehnici i vodnom gospodarstvu predstavlja značaj mjerenja brzine vode u otvorenim vodotocima. Točno mjerenje brzine vode omogućuje analizu protoka, planiranje upravljanja vodnim resursima te zaštitu od poplava i erozije. Obradena tema uključuje opis različitih metoda mjerenja brzine vode u otvorenim kanalima, od tradicionalnih do modernih tehnoloških rješenja, pri čemu se poseban naglasak stavlja na važnost točnosti i prilagodljivosti metoda ovisno o uvjetima mjerenja. Kroz rad su prikazane prednosti i nedostaci svake od metode, kao i njihova primjena u praksi, kako bi se pružio sveobuhvatan uvid u važnost preciznog mjerenja brzine vode u otvorenim kanalima. Osim analize tehnologija mjerenja brzine, rad će se osvrnuti i na metode prikupljanja podataka o geometriji kanala. Mjerenje dimenzija i oblika kanala, kao što su poprečni presjek, dubina i širina, izravno utječe na razumijevanje protoka i sposobnost kanala za prijenos sedimenata. U radu će se također spomenuti proces konstruiranja protočne krivulje, koji uključuje prikupljanje podataka o protoku vode i visini. Posebna pažnja posvetit će se značaju vodotoka Brajda u Rijeci, kao i trenutna funkcionalnost ovog vodotoka. Za potrebe analize protoka, provedena su mjerenja geometrije kanala i brzine strujanja vode na dvije ključne lokacije: perilu Brajda i kanalu ispred zgrade Dječje kuće.

2. MJERENJE BRZINE VODE U OTVORENOM KANALU I IZRAČUN PROTOKA

2.1.Uvodno o mjerenju brzine vode u otvorenom kanalu

Mjerenje brzine vode u otvorenom kanalu ključan je postupak u hidrotehnici i vodnom gospodarstvu, jer omogućuje prikupljanje podataka potrebnih za analizu protoka vode, planiranje upravljanja vodnim resursima i zaštitu vodnih resursa kao i zaštitu od štetnog djelovanja voda. Kanali sa slobodnom vodnom površinom tečenja, kao što su, rijeke, potoci, kanali za navodnjavanje i odvodni sustavi dopuštaju vodi da slobodno teče po površini. Međutim, brzina vode u njima može varirati ovisno o obliku, nagibu i oblozi kanala te drugim prirodnim ili umjetnim utjecajima. Brzina vode u otvorenom kanalu, kao i geometrija profila kanala, određuje se kako bi se dobio protok kao rezultat umnoška brzine vode i površine omočenog oboda kanala. Metode mjerenja brzine vode su različite te mogu biti tradicionalne poput hidrometrijskog krila ili moderne pomoću akustičnih Doppler mjerača brzine (ADV) i elektromagnetskih mjerača protoka. Svaka metoda nudi različitu razinu preciznosti, primjenjivosti i jednostavnosti korištenja, ovisno o karakteristikama kanala. Razumijevanje brzine kretanja vode u otvorenim kanalima pomaže inženjerima i znanstvenicima da predviđaju ponašanje vodnih tijela, optimiziraju izgled brana, kanala i hidroelektrana, te ublažavanju utjecaja poplava i erozije [1].

2.2.Mjerenje brzine vode

Mjerenje brzine vode ima višestoljetnu povijest koja seže daleko u prošlost. Rane metode, koje datiraju još iz doba staroga Rima, uključivale su jednostavna promatranja, poput praćenja plutajućih objekata na vodi kako bi se procijenila brzina vode u rijekama i kanalima. Ovom metodom dobivale su se grube procjene, a uzrok nepreciznih mjerenja predstavljao je utjecaj vjetrova, turbulencija i drugih čimbenika. Danas se koriste raznovrsni uređaji kako bi se izmjerila brzina vode potrebna za dobivanje računskih protoka. Neki od najčešće korištenih uređaja koji će ujedno biti i opisani u nastavku su: hidrometrijsko krilo,

elektromagnetski mjerač brzine strujanja vode, hidrometrijski plovci, Pito cijev te akustični Doppler mjerač brzine, skraćeno ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) [2].

2.2.1. Hidrometrijsko krilo

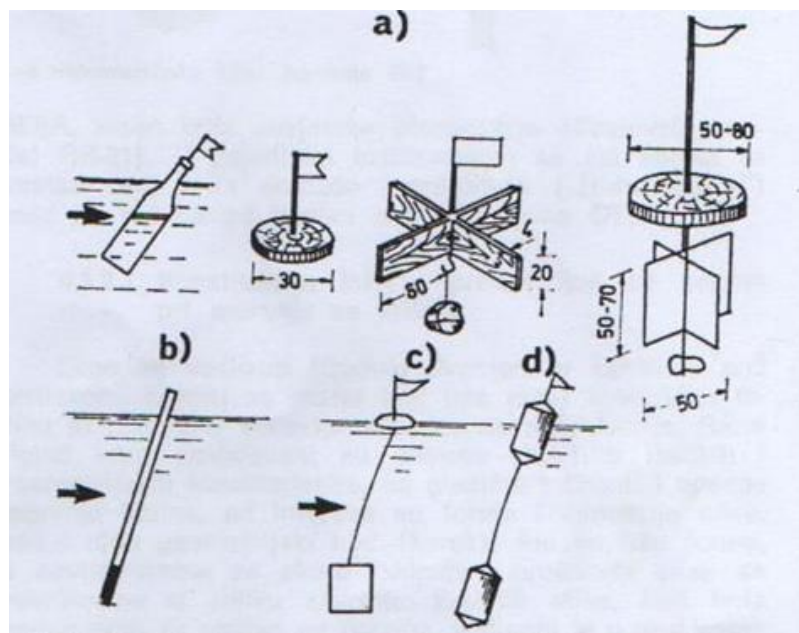
S razvojem znanosti i tehnologije dolazi do napretka u tehnikama mjerenja brzine vode, pa je tako u 18. stoljeću francuski znanstvenik Pierre-Simon Girard predstavio alat zvan hidrometrijsko krilo [Slika 1], koji je postao standardni alat za točnija mjerenja brzine vode [2]. Hidrometrijskim krilom mogu se mjeriti brzine strujanja vode u rijekama, kanalima, jezerima ili morima, a radi na principu hidrodinamičkog uzgona i omogućava precizno praćenje brzine kretanja vode na različitim dubinama. Hidrometrijsko krilo opterećeno tegom hidrodinamičkog oblika se pomoću užeta ili krutog držača postavlja u vodu [Slika 1], gdje se obrtni dio (elisa) okreće zbog strujanja vode te orijentira prema pravcu strujanja vode. Širinama duž kanala, hidrometrijsko krilo se kreće uniformnom brzinom pri čemu se bilježe brzina kretanja i broj okreta elise u sekundi. Tečenjem vode preko krila, stvara se hidrodinamički uzgon koji je proporcionalan brzini vode [3]. Mjerenjem sile uzgona koju stvara voda pri prolasku preko krila, može se odrediti točna brzina strujanja vode. Primjena hidrometrijskog krila zasniva se na premisi da između brzine okretaja elise i brzine vodene struje postoji funkcionalna ovisnost [4]. Ova metoda mjerenja često se koristi u kombinaciji sa elektronskim sistemima za bilježenje i analizu podataka, što omogućava veću preciznost i automatsko prikupljanje podataka [3].



Slika 1. Hidrometrijsko krilo i njegova primjena u vodi [5], [1]

2.2.2. Hidrometrijski plovci

Kinematska metoda mjerenja brzine vode osim hidrometrijskim krilom, može se ostvariti i uporabom hidrometrijskih plovaka [Slika 2]. Korištenjem plovaka kretanje vode postaje jasno vidljivo promatraču, a obzirom na tip plovka moguće je izmjeriti: površinsku brzinu površinskim plovkom, brzinu na nekoj određenoj dubini od površine dubinskim plovkom te srednju brzinu vode do određene dubine plovak – palicom. Plovci moraju biti vidljivi iz daljine te dio plovka koji se nalazi na površini vode ne smije biti površinski prevelik kako bi se izbjegao utjecaj vjetra na kretanje plovka [4].



Slika 2. Hidrometrijski površinski plovci (a), dubinski plovak (c i d) i plovak – palica (b); mjere iskazane u cm [4].

Metoda mjerenja brzine vode pomoću plovka na otvorenim tokovima temelji se na mjerenju puta L koji plovak prijeđe u vremenu T ili u mjerenju vremena T koje je potrebno da plovak prijeđe fiksiranu dužinu puta L pri čemu se izrazom (1) preuzetog iz [4] dobiva srednja brzina plovka na putu dužine L :

$$v = \frac{L}{T} \quad (1)$$

gdje je v (m/s) srednja brzina, L (m) dužina puta, T (s) vrijeme. Brzina određena izrazom (1) odnosi se na hidrometrijski profil smješten na ravnoj dionici između uzvodnog i nizvodnog profila udaljenih za vrijednost L . Uporabom površinskog plovka dobiva se odnos srednje brzine v_v na vertikali hidrometrijskog profila i površinske brzine v_p u granicama vidljivim iz izraza (2) preuzetog iz [4]:

$$\frac{v_v}{v_p} = 0,82 - 0,92 \quad (2)$$

gdje je v_v (m/s) srednja brzina, a v_p (m/s) površinska brzina. Odnos brzina mijenja se ovisno o dubini rijeke i hrapavosti korita. Nadalje, razlikujemo dva tipa dubinskih plovaka. Prvi tip predstavlja plovak minimalnih dimenzija povezan tankim užetom za dubinski dio plovka [Slika 2c]. Mjerenjem brzine ovim plovkom dobivamo brzinu vodene struje na dubini na kojoj se nalazi potopljeni dio plovka. Ukoliko se radi o dubini od 0,6 dubine vertikale h , površinski dio plovka imat će brzinu približno jednaku srednjoj brzini vode na vertikali. Drugi tip plovka, poznat kao dvojni plovak,

sastoji se od dva dijela približno istih zapremnina i težina [Slika 2d]. Plovak – palica se obično izrađuje od drveta ili aluminijskih teleskopskih cijevi [Slika 2b]. Ukoliko je plovak – palica potopljen do dubine od 0,9 h dobiva se srednja brzina vode na vertikali. Vrlo male brzine mjere se plovkom integratorom oblika kuglice proizvedenog od materijala lakšeg od vode kao što je drvo. Metoda mjerenja plovkom integratorom provodi se na način da se plovak potopi do dna vodotoka i zatim pusti da ispliva na površinu vode. Kada ispliva na površinu, plovak se nalazi na nekoj udaljenosti L nizvodno od mjesta potapanja. Udaljenost L proporcionalna je brzini vode na zadanoj vertikali vodotoka [4].

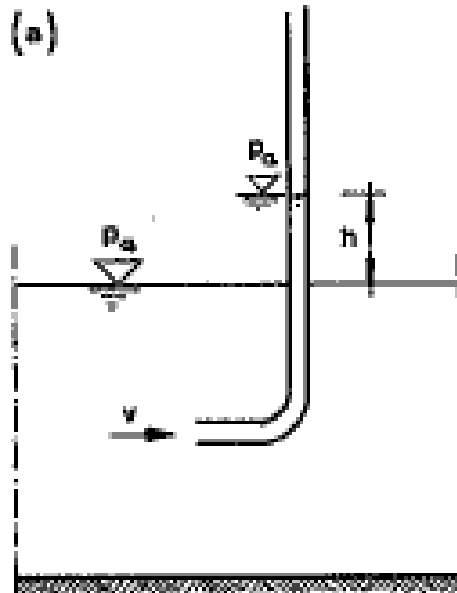
2.2.3. Pito cijev

Instrument Pitot koristi se za provođenje metode mjerenja brzine vode bazirane na promjeni energije. Mjeri se načelno transformacija kinetičke energije vode u potencijalnu energiju, tj. transformaciju dinamičkog pritiska fluida u statički pritisak. Ova metoda provodi se u laboratoriju pri čemu se dobivaju vrijednosti lokalnih brzina. U otvoreni tok se postavi cijev savijena na dnu pod pravim kutom te se otvor cijevi usmjeri uzvodno [Slika 3]. Voda će se u vertikalnom dijelu cijevi podići za neku visinu h koju možemo dobiti iz izraza (3) preuzetog iz [4]:

$$h = \frac{p_d}{\gamma} = \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

gdje je dinamički pritisak $p_d = \frac{\gamma v^2}{2g}$, v lokalna brzina kod ulaza u Pitot cijev (m/s), g ubrzanje sile teže (m/s^2), a γ specifična težina vode (m^3/kg). Iz izraza (3) moguće je dobiti formulu za brzinu vode preuzete iz [4], a glasi (4):

$$v = \sqrt{2gh} \quad (4)$$



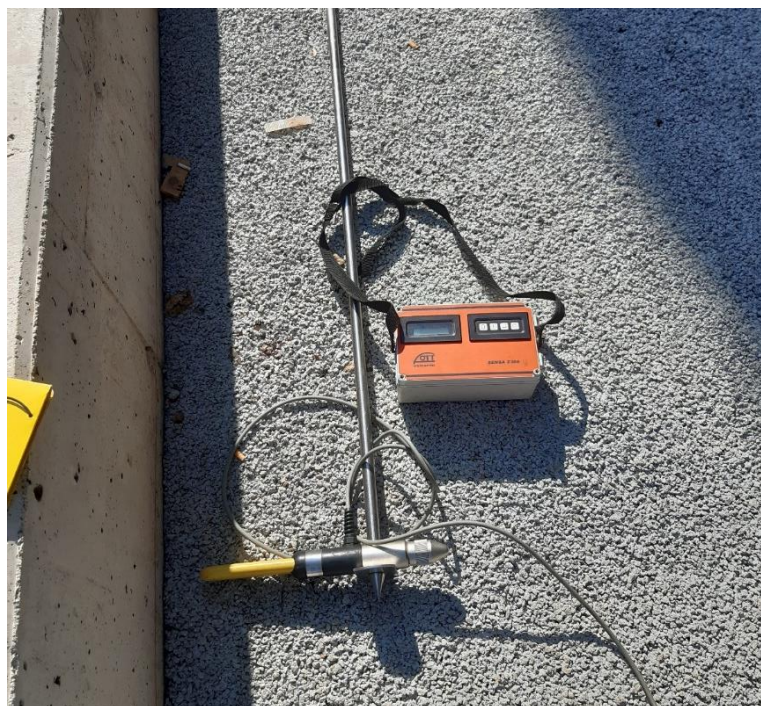
Slika 3. Načelno mjerenje brzine vode
Pitotovom cijevi [4]

Kod otvorenih tokova linija slobodnog vodnog lica odgovara pijezirometarskom pritisku, stoga izraz za visinu h (3) predstavlja razliku između razine vode toka i visine u „dinamičkoj“ cijevi. Pitotove cijevi koriste se za mjerenje brzina na hidrauličkim modelima ili na hidrotehničkim objektima gdje su brzine veće od 7 m/s pa se ne može koristiti hidrometrijsko krilo ili u slučajevima kada je mjerni profil skučen [4].

2.2.4. Elektromagnetski mjerač brzine strujanja vode

U 20. stoljeću pojavljuju se elektromagnetski mjerači brzine strujanja vode [Slika 4], koji koriste elektromagnetska polja kako bi se što preciznije izmjerila brzina vode, posebice u zamućenim vodama [6]. Rad ovih uređaja bazira se na principu Faradayevog zakona elektromagnetske indukcije prema kojemu kretanje električki vodljivog fluida kroz magnetsko polje stvara električni napon koji je proporcionalan brzini tog fluida. Zahvaljujući svome dizajnu koji ne sadrži pokretne dijelove, elektromagnetski mjerači brzine strujanja vode izdržljivi su i pouzdani u zahtjevnim uvjetima. Neovisno o obliku kanala ili prirodi

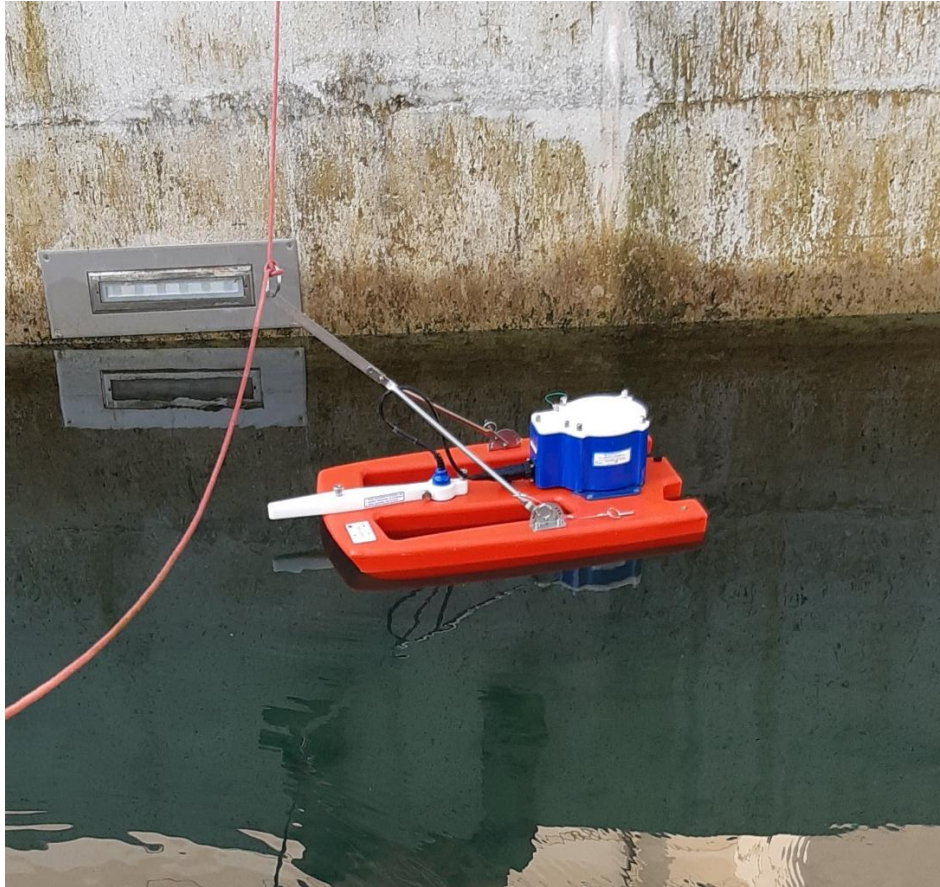
tečenja, mjerenje strujanja vode ovim uređajem dati će precizne rezultate zbog čega su posebno korisni u situacijama gdje je potrebno kontinuirano praćenje protoka ili gdje se brzina vode često mijenja. Sposobnost elektromagnetskih mjerača brzine vode da daju točne rezultate čak i pri niskim brzinama čini ih neophodnima u hidrotehničkim projektima gdje je preciznost mjerenja od ključne važnosti. Postupak mjerenja brzine vode elektromagnetskim mjeračem brzine strujanja vode sastoji se od pripreme uređaja, mjerenja brzine vode te očitavanja dobivenih podataka. Prije početka mjerenja potrebno je odrediti željenu lokaciju mjerenja, nakon čega se okomito na smjer tečenja vode u kanalu postavlja uža ili metar. Postavljena okomica mora biti na mjestu kanala gdje je strujanje ujednačeno i bez značajnih turbulencija. Kada je sve spremno senzor uređaja pričvršćen na metalni štap se spušta u kanal i postavlja na željenu dubinu. Mjerenja je potrebno provesti na više različitih dubina radi kasnijeg dobivanja preciznijih podataka o protoku. Nakon postavljanja uređaja na željenu dubinu, aktivira se mjerač te započinje generiranje elektromagnetskog polja u vodi. Uređaj inducirani napon dobiven prolaskom vode kroz elektromagnetsko polje očitava te prikazuje podatke o brzini strujanja vode na zaslonu, ali može ih i pohranjivati za kasniju upotrebu. Uređaj omogućuje i kontinuirana mjerenja brzine vode te se tako mogu pratiti promjene brzine tijekom vremena. Uz pomoć poznate površine poprečnog presjeka omočenog dijela kanala i izmjerenih brzina vode računa se ukupni protok kanala [7].



Slika 4. Elektromagnetski mjerač brzine strujanja vode OTT Nautilus (Slika autora.)

2.2.5. ADCP

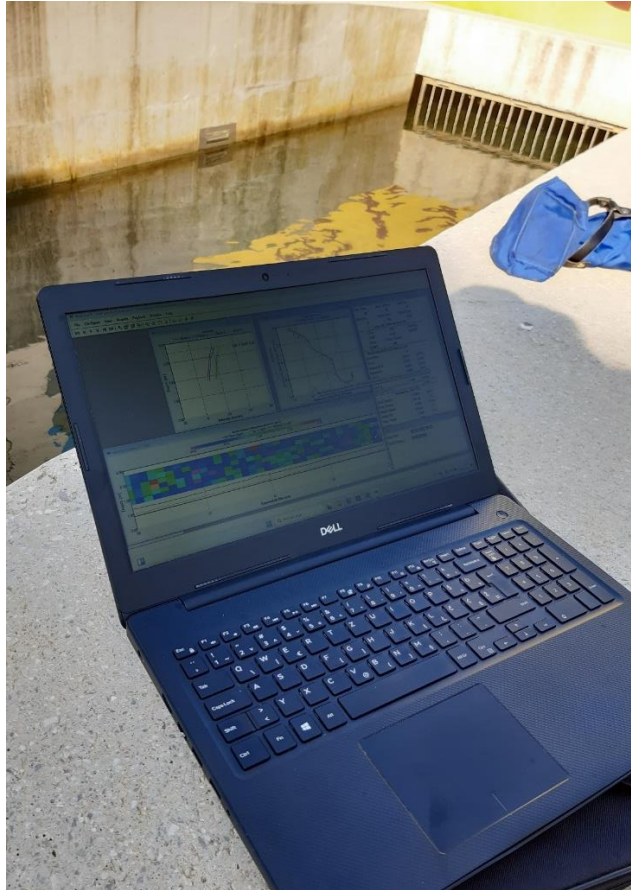
Razvojem ultrazvučne tehnologije uvodi se akustični Doppler mjerač brzine (ADCP) koji omogućuje preciznija i neinvazivna mjerenja brzine vode s mogućnošću kontinuiranog praćenja i prikupljanja podataka u realnom vremenu [8]. ADCP [Slika 5] uređaji su dio napredne tehnologije za mjerenje brzine strujanja vode i protoka u različitim vodnim tijelima, poput rijeka, jezera, estuarija i oceana. Zbog sposobnosti preciznog određivanja brzine vode na različitim dubinama i dizajna pogodnog za rad u teškim uvjetima, ADCP se smatra ključnim alatom u područjima poput hidrologije. Rad ADCP uređaja bazira se na principu Dopplerovog efekta. Dakle, ultrazvučni signali se odbijaju od suspendiranih čestica, mjehurića zraka ili drugih nečistoća u vodi i vraćaju se natrag do prijemnika u uređaju. Promjena frekvencije vraćenih signala u odnosu na emitirane signale (Dopplerov pomak) proporcionalna je brzini čestica, odnosno brzini strujanja vode. Mjerenja se obično provode na nekoliko vertikalnih stanica u vodi, što omogućuje korisnicima da dobiju detaljan profil brzine strujanja duž cijele vodene kolone. ADCP uređaj može mjeriti i smjer strujanja, koristeći više zraka za određivanje vektorske komponente brzine u tri dimenzije. ADCP može se primijeniti za stacionarno i mobilno mjerenje brzine vode. Kod stacionarnog mjerenja pogodnog za dugoročno praćenje protoka u rijekama i kanalima, ADCP uređaj se može montirati na dno vodnog tijela te kontinuirano mjeriti brzinu strujanja vode na određenom mjestu kroz vrijeme. Mobilnim načinom mjerenja potrebno je ADCP uređaj postaviti na plovilo koje se kreće preko vodnog tijela te se podaci bilježe u aplikaciji [Slika 6 i Slika 7]. Osim za mjerenje brzine strujanja vode i protoka, ADCP se još koristi i za proučavanje kretanja sedimenata u rijekama i estuarijima kako bi se lakše upravljalo procesima erozije i taloženja [9].



Slika 5. ADCP uređaj (Slika autora)



Slika 6. Mobilni način mjerenja strujanja vode ADCP uređajem (Slika autora.)



Slika 7. Podaci zabilježeni u aplikaciji za ADCP uređaj (Slika autora.)

Zaključno se razlikuju 4 najčešće korištene metode mjerenja brzina vode kao što su kinematske (hidrometrijsko krilo i plovci), termoelektrične (topla žica), elektromagnetske te metode koje se baziraju na transformaciji energije (instrument Pitot i Venturi) [4]. Razvoj tehnologije i metoda mjerenja brzine vode ključni su za razumijevanje protoka vode, upravljanje vodnim resursima te suočavanje sa problemima poput klimatskih promjena i povećane potražnje za vodom [10].

2.3.Mjerenje geometrije profila kanala

2.3.1. Uvodno o mjerenju geometrije profila kanala

Kako bi se shvatile hidrauličke karakteristike kanala potrebno je prikupiti podatke o dimenzijama i obliku kanala. Geometrija kanala, koju čini poprečni presjek, dubina, širina i oblik dna, direktno utječe na protok vode, brzinu strujanja i sposobnost kanala da prenosi sediment. Precizno mjerenje navedenih parametara omogućuje hidrolozima i inženjerima procijeniti kapacitet kanala, predvidjeti rizike od poplava, te optimizaciju dizajna i održavanje vodnih sustava. U nastavku se razmatraju različite metode i tehnike za prikupljanje podataka o geometriji kanala, počevši od klasičnih topografskih mjerenja pa sve do modernih tehnologija poput LiDAR-a i hidroakustičnih instrumenata [11].

2.3.2. Način mjerenja geometrije profila

Geometrija profila kanala može se izmjeriti na više načina. Načini mjerenja profila mogu se podijeliti na one tradicionalne i suvremene. Najčešće korištena, ali i osnovna, metoda za mjerenje geometrije profila a koja spada među tradicionalne je niveliranje (geodetsko mjerenje uz pomoć nivelmana) [Slika 8]. Jednostavnim postupkom niveliranja moguće je precizno odrediti visinske razlike između točaka duž poprečnog profila kanala. Time je stvaranje točnog prikaza oblika i nagiba terena moguće [12]. Mjerenje geometrije profila niveliranjem se provodi na način da se prvo pripremi teren, tj. odabere linija presjeka te zatim postave reperi. Odabrana linija poprečnog presjeka kanala mora biti okomita na smjer tečenja vode te treba obuhvatiti cijelu širinu kanala, uključujući i obale. Referentne točke s poznatom visinom u odnosu na neki referentni nivo, poput morske razine, predstavljaju reperi. Reperi se također koriste za kalibraciju mjerenja koja služi za otkrivanje i ispravljanje pogrešaka u mjerenju. Kalibracijom se osiguravaju točni i pouzdani podaci [13]. Za određivanje visinskih razlika duž poprečnog presjeka kanala potrebno je koristiti nivelir, optički ili digitalni, te mjerne letve [Slika 9]. Razlika u optičkom i digitalnom niveliru je što optički nivelir koristi teleskop za očitavanje visinskih razlika, dok digitalni nivelir omogućuje automatsko bilježenje podataka. Nivelir je potrebno postaviti na stabilnu točku u blizini linije presjeka gdje je dobar pregled na sve točke koje se mjere. U konačnici,

instrument mora biti stabilan te horizontalno poravnat. Kako bi bilo moguće očitati visinske razlike koriste se mjerne letve. Mjerne letve, tj. štapovi s jasno označenim metrima i centimetrima, postavljaju se na niz točaka duž poprečnog presjeka kanala koje treba izmjeriti kao što su rubovi kanala, obale i dno kanala. Kroz nivelir očitava se visina na mjernoj letvi u odnosu na referentni nivo. Očitana visina bilježi se za svaku točku duž profila. Nakon obavljenih svih mjerenja, pomoću izračuna razlika u visinama točaka moguće je izračunati nagib i oblikovati detaljan profil kanala. Profil dobiven provedenim mjerenjem koristi se za analizu protoka vode, brzine strujanja i kapaciteta kanala [13].



Slika 8. Oprema za geodetsko mjerenje uz pomoć nivelmana [14]



Slika 9. Mjerenje geometrije profila uz pomoć nivelmana [15]

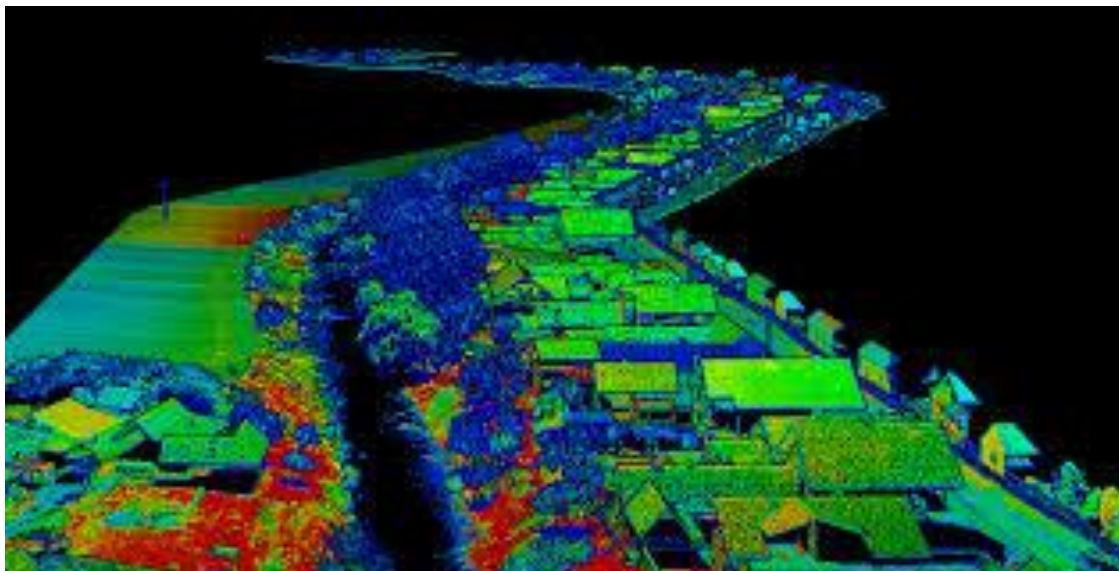
Još jedna metoda koja spada pod tradicionalne metode mjerenja jest ručno mjerenje pomoću užeta ili mjerne trake. Ova metoda može biti korisna u manjim ili lako dostupnim kanalima. Mjerna traka se koristi za mjerenje širine kanala, dok se dubina mjeri pomoću štapa ili sondiranja. Važno je napomenuti da se mjerenja dubine kanala moraju provesti u dovoljno bliskim intervalima za točno definiranje profila presjeka te na više odvojenih vertikalama. Vertikale predstavljaju mjeru dubine ili brzine pa se rubna mjerenja tretiraju jednako kao i sva ostala [16].

Razvoj tehnologije doveo je do primjene naprednijih metoda za mjerenje geometrije kanala kao što su LiDAR i hidroakustična metoda. Najnaprednijom i najpouzdanijom

tehnologijom za mjerenje geometrije kanala smatra se metoda LiDAR. Ova metoda koristi laserske zrake za precizno mapiranje terena i geometriju kanala te pruža detaljne podatke o profilu kanala. Također, LiDAR metoda često se koristi za detaljnu analizu terena na teško dostupnim mjestima ili velikim područjima gdje su tradicionalne metode mjerenja neprecizne. LiDAR metoda mjerenja radi na način da LiDAR sustav šalje niz laserskih impulsa prema tlu. Impulsi se reflektiraju od površine i vraćaju do senzora pri čemu se mjeri vrijeme povratka impulsa i pretvara u udaljenost. Ovim postupkom omogućava se precizno mapiranje površine ispod vode. Kombinacijom spomenutih podataka i informacija o položaju dobivenih iz GPS-a i orijentaciji senzora, moguće je stvoriti detaljan trodimenzionalni model terena. Prednosti LiDAR metode predstavljaju visoka preciznost, brzina prikupljanja podataka te mogućnost primjene u teškim uvjetima [17].

Metode poznate za mjerenje podvodnog dijela profila kanala zovu se hidroakustične metode. Naime, ADCP uređaji, osim za mjerenje brzine strujanja vode, koriste se i za mjerenje dubine i oblikovanja dna kanala. Slanjem akustičnih signala koji se odbijaju od dna kanala i vraćaju do prijemnika moguće je mapirati određeni profil [18].

Među suvremenim metodama nalazi se i ona koja uključuje korištenje dronova opremljenih kamerama ili LiDAR sensorima. Dron prikuplja podatke tako da se kreće iznad ciljanog područja i iz više kutova snima slike visoke rezolucije. Prikupljene slike se obrađuju specijaliziranim softverom za stvaranje 3D modela površine ili terena [Slika 10]. Softverom se usklađuju zajedničke točke na slikama koje se preklapaju te se time stvara detaljna karta terena. Za razliku od standardnih dronova koji pružaju relativno točna mjerenja, dronovi opremljeni LiDAR sensorima mogu postići točnost na razini centimetra. Ova tehnologija omogućuje brzo i učinkovito prikupljanje podataka o površinskom profilu kanala, osobito u nepristupačnim ili opasnim područjima [19].



Slika 10. Trodimenzionalni model kanala dobiven LiDAR metodom [20]

Podaci prikupljeni mjerenjem geometrije profila mogu se koristiti za izradu hidrauličkih modela koji simuliraju protok vode kroz kanal, što pomaže u planiranju zaštite od poplava i upravljanju vodnim resursima. Također, ovi podaci su ključni za dizajn novih kanala ili modifikaciju postojećih, jer omogućuju precizno izračunavanje kapaciteta kanala i optimizaciju hidrauličke učinkovitosti [11].

Za dobivanje mjera geometrije profila i brzina vode koje će se promatrati u ovome radu koristila se tradicionalna metoda ručnog mjerenja, elektromagnetski mjerač brzine strujanja vode te ADCP uređaj. Mjerenja su se provodila na dvije lokacije, potoku Brajda kod Dječje kuće te na Perilu Brajda.

2.4. Izračun protoka

Protok je hidrološka veličina koja označava količinu vode koja protekne u jedinici vremena. Izražava se u kubnim metrima po sekundi (m^3/s), a za manje protoke se koristi litra po sekundi (l/s). Protok se može dobiti proračunom iz parametara geometrije profila kanala i brzine strujanja vode u kanalu, ali i direktno volumenskom metodom ili koristeći se suvremenim metodama za mjerenje protoka poput ADCP uređaja [21].

Najjednostavniji i najtočniji postupak mjerenja protoka predstavlja volumenska metoda kojom se mjeri vrijeme punjenja posude određenog volumena. Za dobivanje protoka koristi se izraz (5) preuzet [21]:

$$Q = \frac{V}{D * t} \quad (5)$$

pri čemu je V volumen posude (l), D oznaka za promjer posude (m) i t oznaka za vrijeme (s). Mjerenje je potrebno ponavljati nekoliko puta radi prisutnih varijabilnosti rezultata mjerenja [21].

Kod mjerenja protoka na temelju mjerenja brzine vode prvo je potrebno odrediti geometriju profila kanala, nakon čega se isti dijeli na više lamela u čijim se okomicama mjeri brzina vode. Broj potrebnih okomica ovisi o obliku i veličini profila te hidrauličkim uvjetima. Za kanale s pravilnim profilom i mirnijim tokom biti će potreban manji broj okomica nego u kanalima s nepravilnim profilom i turbulentnim režimom tečenja. Najčešće dubine na kojima se mjeri brzina tečenja su: na površini kanala, 0,2 od dubine kanala H, 0,6H, 0,8H i na dnu kanala. Nakon što se izmjere brzine na određenim dubinama kanala pojedine okomice, proračunava se srednja brzina vode na svakoj okomici. Za potrebe ovoga rada koristila su se mjerenja brzine na pet navedenih dubina te se srednja brzina v_0 dobila iz izraza (6) preuzetog iz [22]:

$$v_0 = 0,1 * (v_p + 3 * v_{0,2} + 3 * v_{0,6} + 2 * v_{0,8} + v_0) \quad (6)$$

gdje je v_p površinska brzina (m/s), $v_{0,2}$ brzina na okomici na dubini 0,2H (m/s), $v_{0,6}$ brzina na okomici na dubini 0,6H (m/s), $v_{0,8}$ brzina na okomici na dubini 0,8H te v_0 brzina na dnu kanala.

Također, osim srednje brzine u pojedinoj okomici potrebno je odrediti površine lamela. Zbroj površina lamela čini ukupnu površinu A kanala. U konačnici, kada se prikupe svi potrebni podaci pomoću izraza (7), preuzetog iz [22], moguće je dobiti vrijednost protoka Q:

$$Q = \sum_1^n A_i * v_i * k_i \quad (7)$$

gdje je n broj lamela, A_i je površina (m^2) i -te lamele, v_i je srednja brzina u i -toj okomici (m/s), a k_i je koeficijent ovisan o odnosu susjednih lamela te iznosi (8):

$$k_i = \frac{3}{4} * \frac{1 - n^4}{1 - n^3} \quad (8)$$

za dobivanje odnosa susjednih lamela koristi se izraz (9) preuzet iz [22]:

$$n = \frac{v_i}{v_{i+1}} \quad (9)$$

gdje je v_i srednja brzina u i -toj okomici (m/s). Vrijednosti koeficijenta k za različite odnose srednjih brzina mogu se iščitati iz Tablice 1.

Tablica 1. Koeficijent k u odnosu susjednih brzina u okomicama profila kanala [22]

$n = \frac{v_i}{v_{i+1}}$	k
0,00	0,750
0,10	0,751
0,20	0,755
0,30	0,765
0,40	0,781
0,50	0,804
0,60	0,833
0,70	0,867
0,80	0,907
0,90	0,952
0,95	0,975
1,00	1,00

3. KONSTRUIRANJE PROTOČNE KRIVULJE

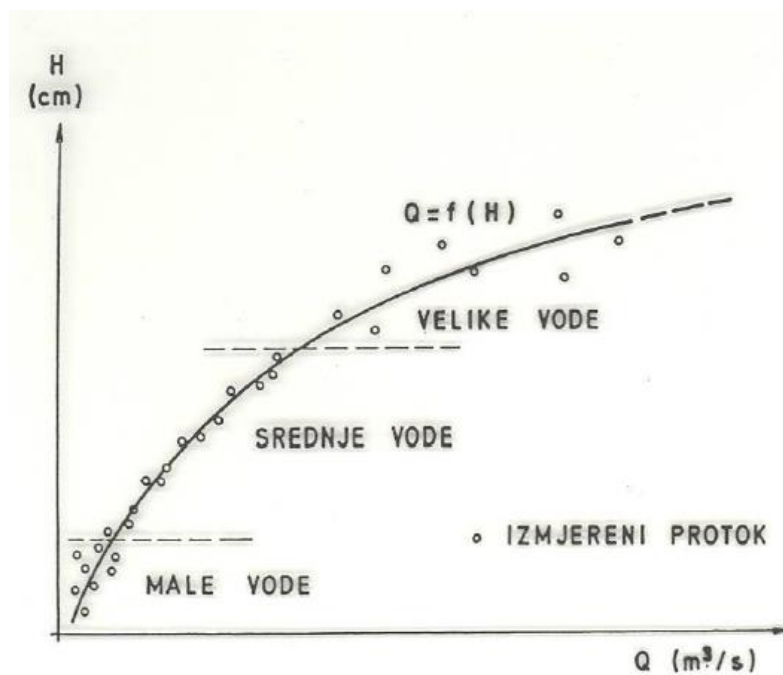
3.1.Uvodno o konstrukciji protočne krivulje

Protočna krivulja značajna je za predviđanje ponašanja vodotoka u različitim hidrološkim uvjetima. Krivulja prikazuje odnos između protoka vode u rijeci ili kanalu i visine vode. Za dobivanje mjerodavne krivulje protoka potrebno je izvršiti veći broj mjerenja kroz određeno vremensko razdoblje. Preciznom izradom protočne krivulje hidrologima se omogućuje analiza sezonske promjene, procjena kapaciteta vodnih tijela te donošenje razumnih odluka koje se odnose na upravljanje vodnim resursima, planiranje infrastrukture i zaštitu od razornih poplava. U nastavku su obuhvaćeni osnovni principi i metode koje se koriste u procesu konstruiranja protočnih krivulja, uključujući prikupljanje podataka i analitičke tehnike [23].

3.2.Načini konstruiranja protočne krivulje

Konstruiranje protočne krivulje je proces koji podrazumijeva prikupljanje i analizu podataka o protoku vode u rijekama ili kanalima. Metode koje se koriste za konstruiranje protočne krivulje su: prikupljanje podataka, određivanje odnosa vodostaja i protoka, numeričke, grafičke, matematičke te digitalne metode. Prikupljanje podataka o visini vode na određenoj lokaciji preduvjet je za konstruiranje protočne krivulje. Podaci se najčešće prikupljaju pomoću automatskih uređaja za bilježenje razine vode. Osim vodostaja potrebno je mjeriti i protok vode pomoću uređaja kao što je ADCP ili na način da ga se izračuna na temelju prikupljenih podataka o brzini vode i geometriji profila kanala. Za povezivanje izmjerenih visina vode i protoka potrebno je provesti kalibraciju. Za svaki izmjereni vodostaj potrebno je odrediti protok pritom koristeći empirijske podatke i hidrološke formule. Obzirom na prikupljene i kalibrirane podatke moguće je konstruirati grafički prikaz, krivulju koja prikazuje protok kao funkciju vodostaja [24].

Najjednostavnijom metodom za konstrukciju protočne krivulje smatra se grafička metoda kojom se ručno ili pomoću softvera može nacrtati graf na čijoj se apscisi nalaze vrijednosti vodostaja, a na ordinati veličine protoka [Slika 11]. Za dobivanje kontinuirane linije koja predstavlja odnos između vodostaja i protoka potrebno je povezati podatke. Međutim, za preciznije konstruiranje krivulje može se koristiti matematička metoda koja uključuje regresijsku analizu. Regresijskom analizom se izračunava najbolja funkcija koja odgovara skupu podataka te se time omogućuje izračunavanje protoka za bilo koju vrijednost vodostaja unutar mjernog intervala. Podaci prikupljeni tijekom mjerenja koriste se za izradu krivulje, pri čemu visina vode predstavlja nezavisnu varijablu, a protok zavisnu. Matematičkom metodom omogućuje se stvaranje empirijskog modela pogodnog za procjenu protoka na temelju izmjerene visine vode [24].



Slika 11. Protočna krivulja [21]

Napredne metode uključuju matematičko modeliranje kod kojega se koriste jednadžbe koje opisuju hidrauličke karakteristike vodotoka poput otpora podloge, širine kanala i brzine strujanja vode. Modeliranjem je moguće detaljnije predvidjeti ponašanje vodotoka. Hidrauličkim modelima koji se koriste softverskim alatima omogućena je simulacija strujanja kroz složene mreže vodotoka i kanala [25].

Za provođenje digitalnih metoda konstruiranja protočne krivulje koriste se softverski alati poput HEC-RAS ili SWMM koji koriste digitalne podatke za stvaranje krivulje. Softverskim alatima moguća je simulacija različitih varijanti protoka u različitim uvjetima. Nakon što se krivulja izradi, provjerava se s dodatnim podacima radi osiguranja njene točnosti. Ukoliko se pokaže da se određeni dio krivulje ne poklapa sa stvarnim uvjetima u terenu potrebno je izvršiti preinake. Smatra se da se najbolji rezultati dobivaju kombinacijom svih metoda konstrukcije protočne krivulje jer na taj način hidrolozi mogu kombinirati prednosti svake od metoda da bi dobili što precizniju i pouzdaniju krivulju. Zaključno se može reći da je protočna krivulja neophodan alat u hidrologiji za analizu, planiranje i upravljanje vodnim resursima [24].

4. PROTOK VODOTOKA BRAJDA (RIJEKA)

4.1.Uvodno o vodotoku Brajda

Vodotok Brajda, smješten u središnjem dijelu Rijeke, ima povijesno i urbano značenje za grad, a nekada je predstavljao ključnu odvodnu mrežu za oborinske vode s padina oko grada. U prošlosti, Brajda je bila otvoreni vodotok sve do 1939. godine kada je prekriveno i zatvoreno za javnost. Međutim, prenamjenom i revitalizacijom kompleksa Rikard Benčić vodotok Brajda se otkrio i dostupan je za javnost. Perilu Brajda moguće je prići iz unutrašnjosti kompleksa Rikard Benčić prolazeći pored Dječje kuće i Muzeja moderne i suvremene umjetnosti [Slika 12]. Na izlasku iz perila postavljena je zapornica koja služi za zatvaranje profila potoka i preusmjerenje vode kroz rasteretni kanal. Međutim, zbog nepreciznog postavljanja i ugradnje zapornice nije moguće vodu zatvoriti u potpunosti. Također, zbog ograničene propusne moći rasteretnog kanala, višak vode se preljeva preko zapornice i teče potokom. Vodotok Brajda više ne igra značajnu ulogu kao nekada, no ostaje važan dio riječkog povijesnog pejzaža [26].



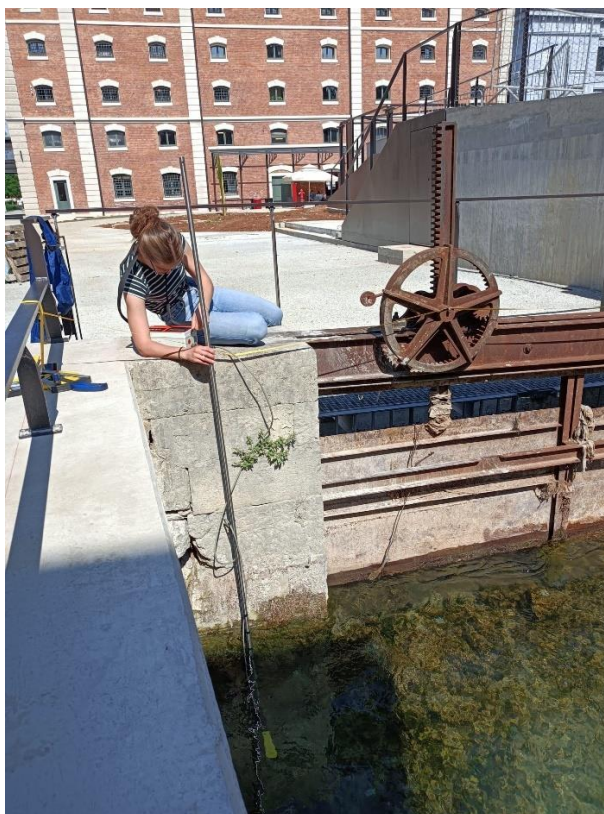
Slika 12. Perilo Brajda (Slika autora.)

4.2. Opis instrumenata i načina mjerenja

U svrhe dobivanja parametara potrebnih za proračun protoka u ovome radu koristila se metoda ručnog mjerenja geometrije profila na perilu Brajda te na otvoru vodotoka Brajda ispred zgrade Dječje kuće. Brzine strujanja vode u kanalu mjerene su uz pomoć elektromagnetskog mjerača brzina vode. Za dobivanje trenutnih vrijednosti protoka na dvjema lokacijama koristio se ADCP uređaj. Rezultati dobiveni ADCP uređajem biti će korišteni za usporedbu sa vrijednostima protoka dobivenih iz proračuna.

Ručno mjerenje geometrije profila provedeno je na način da se koristila mjerna traka za dobivanje veličine širine kanala, dok se dubina dobila podjelom širine kanala na određen broj točaka položen u istoj ravnini u koje se uronila metalna šipka sa označenim mjerama. Mjerenje dubine vršilo se na sedam točaka na perilu i pet točaka na kanalu ispred Dječje kuće.

Potrebne brzine mjerile su se elektromagnetskim mjeračem za mjerenje strujanja vode u vertikalama odabranih točaka kanala okomito na smjer tečenja vode u kanalu [Slika 13]. Na pojedinoj vertikali izmjerene su brzine na dubinama kanala kao što su površina kanala, dno kanala te na 0,2, 0,6 i 0,8 od dubine vertikale. Pri postavljanju elektromagnetskog mjerača na željenu dubinu uključuje se mjerenje brzine te se izmjerena brzina pojavljuje na ekranu uređaja [Slika 14]. Uređaj korišten prilikom mjerenja prikazan je na Slici 3 u poglavlju 2.2.4. gdje je naveden i detaljan opis načina mjerenja.



Slika 13. Mjerenje brzine strujanja elektromagnetskim mjeračem na perilu Brajda (Slika autora.)



Slika 14. Uređaj provodi mjerenje dok ne stabilizira očitavanje i prikaže konačnu brzinu (Slika autora.)

Mjerenja protoka ADCP uređajem izvršena su na način da se uređaj postavio na plovilo te položio na površinu vode. Za plovilo se zavezalo uže te se na taj način plovilo pomicalo okomito na smjer tečenja vode od lijevog do desnog ruba kanala i obrnuto pri čemu su se u aplikaciji bilježili izmjereni podaci. Detaljnije o mjerenju protoka ADCP uređajem navodi se u poglavlju 2.2.5. zajedno sa uređajem prikazanim na Slici 6.

4.3. Opis prikupljenih podataka

Provedenim mjerenjima geometrije profila utvrđene su širine kanala od 4,14 m na perilu Brajda, te 4,10 m na kanalu ispred Dječje kuće. Brzine mjerenja dobivene elektromagnetskim mjeračem strujanja vode, zajedno sa dubinom pojedine vertikale prikazane su u Tablici 2 za perilo Brajda i Tablici 3 za kanal ispred Dječje kuće.

Tablica 2. Prikaz brzina dobivenih mjerenjem elektromagnetskim mjeračem brzine strujanja vode na perilu Brajda

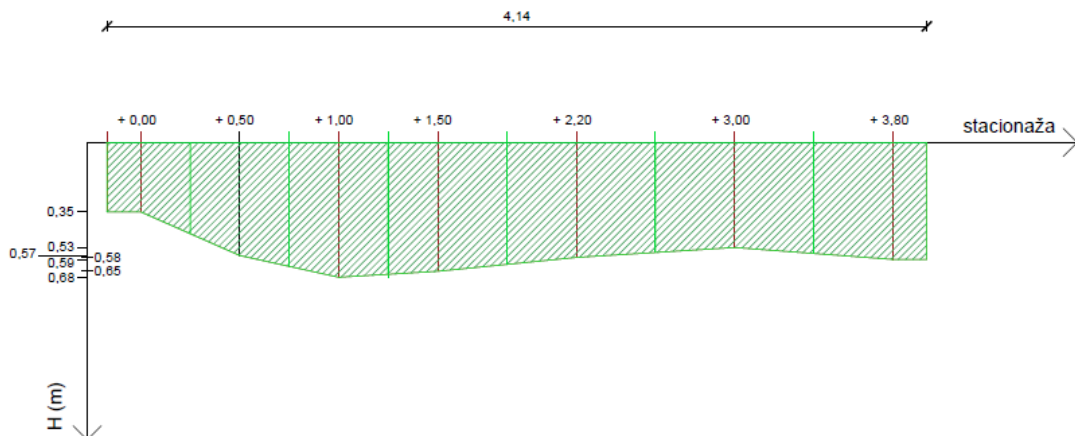
VERTIKALA		1	2	3	4	5	6	7
STAC. TOČKA		0,00	0,50	1,00	1,50	2,20	3,00	3,80
DUBINA (cm)		35	57	68	65	58	53	59
BR. TOČAKA		5	5	5	5	5	5	5
1. točka	dubina (cm)	2	2	2	2	2	2	2
	v (m/s)	0,271	0,344	0,312	0,275	0,248	0,218	0,023
2.točka	dubina (cm)	10	10	10	10	10	10	10
	v (m/s)	0,246	0,292	0,309	0,238	0,259	0,157	0,017
3.točka	dubina (cm)	20	30	40	40	30	30	40
	v (m/s)	0,168	0,269	0,223	0,24	0,211	0,128	0,011
4.točka	dubina (cm)	30	50	50	50	50	40	50
	v (m/s)	0,182	0,223	0,201	0,228	0,225	0,186	0,004
5.točka	dubina (cm)	35	52	63	62	53	48	54
	v (m/s)	0,146	0,14	0,165	0,116	0,202	0,119	0,004

Tablica 3. Prikaz brzina dobivenih mjerenjem elektromagnetskim mjeracom brzine strujanja vode na kanalu ispred Dječje kuće

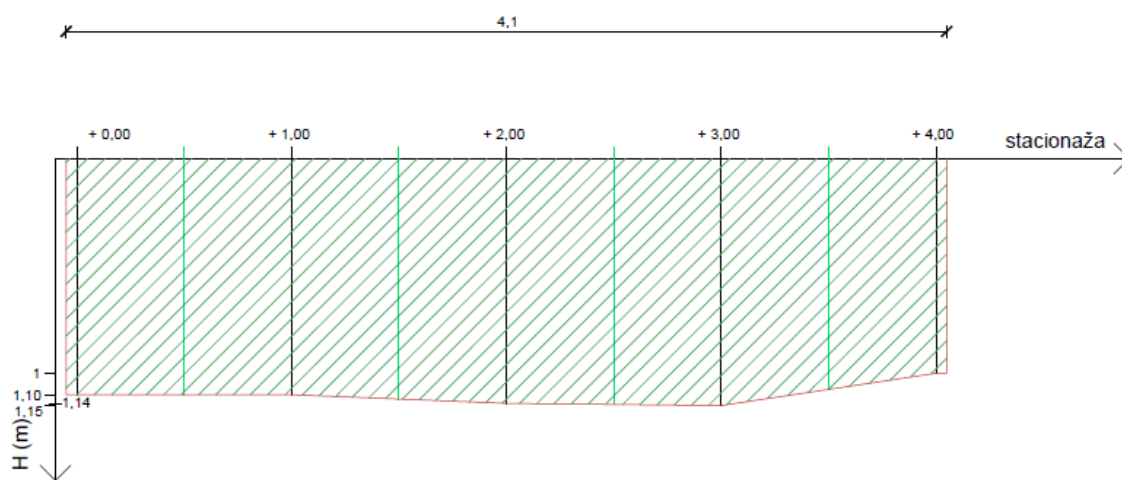
VERTIKALA		1	2	3	4	5
STAC. TOČKA		0,00	1,00	2,00	3,00	4,00
DUBINA (cm)		110	110	114	115	100
BR. TOČKA		5	5	5	5	5
1. točka	dubina (cm)	2	2	2	2	2
	v (m/s)	0,082	0,155	0,098	0,125	0,11
2.točka	dubina (cm)	20	20	20	20	20
	v (m/s)	0,083	0,155	0,116	0,142	0,083
3.točka	dubina (cm)	70	70	70	70	60
	v (m/s)	0,101	0,105	0,112	0,108	0,109
4.točka	dubina (cm)	90	90	90	90	80
	v (m/s)	0,066	0,087	0,112	0,098	0,066
5.točka	dubina (cm)	110	105	109	110	95
	v (m/s)	0,06	0,094	0,105	0,05	0,029

4.4.Geometrija kanala

Geometrija kanala ispred Dječje kuće u Rijeci pretežito je pravokutna oblika, kao i geometrija kanala na perilu Brajda. Na temelju mjera širine i dubina u pojedinoj vertikali konstruiran je poprečni profil oba kanala [Slika 15 i Slika 16]. Ukupna površina za svaki kanal izmjerena je u programu AutoCAD pomoću naredbe „PROPERTIES“ te iznosi 2,3574 m^2 za kanal na perilu Brajda i 4,5451 m^2 za kanal ispred Dječje kuće.



Slika 15. Prikaz geometrije kanala na perilu Brajda (Slika autora.)



Slika 16. Prikaz geometrije kanala ispred Dječje kuće (Slika autora.)

5. PROTOK

5.1. Protok na perilu Brajda

Kako bi se izračunao protok potrebno je odrediti površinu pojedine lamele te srednju brzinu u njenoj okomici. Broj okomica u kojima se odvalo mjerenje je sedam. U Tablici 2. navedene su brzine koje se koriste pri proračunu srednje brzine u pojedinoj okomici uz pomoć izraza (6) navedenog u poglavlju 2.4. Površine svake lamele, kao i dobivene srednje brzine i koeficijent k izražene su u Tablici 4.

Tablica 4. Prikaz površina pojedine lamele na čijoj sredini se nalazi okomica, srednjih brzina pojedine okomice te koeficijenta k potrebnih za izračun protok na perilu Brajda

Okomica	Površina	Srednja brzina	Koeficijent k
1	0,1608	0,2023	0,893
2	0,2781	0,2613	1
3	0,3313	0,2475	1
4	0,3858	0,2281	1
5	0,4361	0,2310	1
6	0,435	0,1564	1
7	0,3303	0,0119	0,750

Osim površina i srednjih brzina, proračunom su se dobile vrijednosti koeficijenta ovisnog o odnosu susjednih lamela preko izraza (8) također izraženi u Tablici 4. U konačnici kada su se sve vrijednosti unijele u izraz za protok (7), dobila se vrijednost protoka od 443 l/s.

5.2. Protok na kanalu ispred Dječje kuće

Kao i za proračun protoka na perilu Brajda, izračunate su sve potrebne vrijednosti za dobivanje protoka pomoću izraza navedenih u poglavlju 2.4.. Površine svake lamele, kao i dobivene srednje brzine i koeficijent k izražene su u Tablici 5.

Tablica 5. Prikaz površina pojedine lamele na čijoj sredini se nalazi okomica, srednjih brzina pojedine okomice te koeficijenta k potrebnih za izračun protok na kanalu ispred Dječje kuće

Okomica	Površina	Srednja brzina	Koeficijent k
1	0,605	0,0826	0,856
2	1,105	0,1203	1
3	1,1363	0,1111	1
4	1,13	0,1121	1
5	0,5688	0,0865	0,750

Unosom podataka iz Tablice 5. u izraz za protok (7) dobila se vrijednost protoka od 466 l/s.

6. DISKUSIJA REZULTATA

Usporedbom izračunatih protoka sa protokom izmjerenim ADCP uređajem primjećuje se razlika u iznosu 17,4% kod kanala ispred Dječje kuće i 11,3% za kanal na perilu Brajda. Ova razlika može biti posljedica različitih faktora koji utječu na točnost mjerenja i proračuna. Postoji mogućnost da proračunske metode nisu uzele u obzir sve varijacije u profilu vodotoka, dok ADCP precizno bilježi te promjene. Isto tako uzrok ovoj razlici može biti preciznost korištenih instrumenata i metode proračuna. Obzirom na razlike između izmjerenih i izračunatih vrijednosti, ukazuje se na potrebu za dodatnom kalibracijom metoda proračuna ili prilagođavanjem modela za specifične uvjete na terenu. U nastavku je moguće vidjeti protoke dobivene pomoću ADCP uređaja korištene za usporedbu.

Station Number: 03		Meas. No: 0																	
Station Name: perilo brajda		Date: 06/06/2024																	
Party:	Width: 3.6 m	Processed by:																	
Boat/Motor:	Area: 4.5 m ²	Mean Velocity: -0.087 m/s																	
Gage Height: 0.000 m	G.H.Change: 0.000 m	Discharge: -0.393 m ³ /s																	
Area Method: Avg. Course	ADCP Depth: 0.000 m	Index Vel.: 0.00 m/s	Rating No.: 1																
Nav. Method: Bottom Track	Shore Ens.:10	Adj. Mean Vel: 0.00 m/s	Qm Rating: U																
MagVar Method: None (0.00 °)	Bottom Est: Power (0.1667)	Rated Area: 0.000 m ²	Diff.: 0.000%																
Depth: Composite (VB)	Top Est: Power (0.1667)	Control1: Unspecified																	
Discharge Method: None		Control2: Unspecified																	
% Correction: 0.00		Control3: Unspecified																	
Screening Thresholds:		ADCP:																	
BT 3-Beam Solution: YES	Max. Vel.: 0.790 m/s	Type/Freq.: StreamPro / 2000 kHz																	
WT 3-Beam Solution: YES	Max. Depth: 1.41 m	Serial #: 1665	Firmware: 31.13																
BT Error Vel.: 0.10 m/s	Mean Depth: 1.25 m	Bin Size: 17 cm	Blank: 3 cm																
WT Error Vel.: 0.30 m/s	% Meas.: 59.41	BT Mode: 10	BT Pings: 2																
BT Up Vel.: 0.30 m/s	Water Temp.: None	WT Mode: 12	WT Pings: 6																
WT Up Vel.: 0.50 m/s	ADCP Temp.: 10.8 °C																		
Use Weighted Mean Depth: YES																			
Performed Diag. Test: NO		Project Name: 03_0.mmt																	
Performed Moving Bed Test: NO		Software: 2.26.00.04																	
Performed Compass Calibration: NO		Evaluation: NO																	
Meas. Location:																			
Tr.#	Edge Distance		#Ens.	Discharge						Width	Area	Time		Mean Vel.		% Bad			
	L	R		Top	Middle	Bottom	Left	Right	Total			Start	End	Boat	Water	Ens.	Bins		
000	R	0.00	0.00	68	-0.050	-0.202	-0.111	0.000	0.000	-0.394	3.5	4.4	08:30	08:32	0.05	-0.08	8	1	
005	R	0.00	0.00	49	-0.056	-0.243	-0.109	0.000	0.000	-0.407	4.0	4.9	08:35	08:36	0.10	-0.08	14	1	
007	R	0.00	0.00	43	-0.034	-0.255	-0.099	0.000	0.000	-0.400	3.2	4.2	08:37	08:38	0.09	-0.10	14	0	
Mean		0.00	0.00	53	-0.063	-0.234	-0.106	0.000	0.000	-0.393	3.6	4.5	Total	08:30	0.06	-0.09	11	1	
SDev		0.00	0.00	13	0.002	0.027	0.006	0.000	0.000	0.025	0.4	0.4			0.02	0.01			
SD/M		0.0%	0.0%	24.6%	5.7%	11.7%	6.0%	0.0%	0.0%	6.4%	11.5%	7.9%			21.4%	8.6%			
Remarks:																			

Slika 17. Podaci očitani u aplikaciji a dobiveni pomoću ADCP uređaja na perilu Brajda

Station Number: 02						Meas. No: 0												
Station Name: djecja kuca						Date: 06/06/2024												
Party:		Width: 3.4 m		Processed by:														
Boat/Motor:		Area: 5.2 m ²		Mean Velocity: -0.077 m/s														
Gage Height: 0.000 m		G.H.Change: 0.000 m		Discharge: -0.397 m ³ /s														
Area Method: Avg. Course		ADCP Depth: 0.000 m		Index Vel.: 0.00 m/s		Rating No.: 1												
Nav. Method: Bottom Track		Shore Ens.:10		Adj.Mean Vel: 0.00 m/s		Qm Rating: U												
MagVar Method: None (0.00°)		Bottom Est: Power (0.1667)		Rated Area: 0.000 m ²		Diff.: 0.000%												
Depth: Composite (VB)		Top Est: Power (0.1667)		Control1: Unspecified														
Discharge Method: None				Control2: Unspecified														
% Correction: 0.00				Control3: Unspecified														
Screening Thresholds:				ADCP:														
BT 3-Beam Solution: YES				Type/Freq.: StreamPro / 2000 kHz														
WT 3-Beam Solution: YES				Serial #: Firmware: 31.13														
BT Error Vel.: 0.10 m/s				Bin Size: 17 cm														
WT Error Vel.: 0.30 m/s				Blank: 3 cm														
BT Up Vel.: 0.30 m/s				BT Mode: 10														
WT Up Vel.: 0.50 m/s				BT Pings: 2														
Use Weighted Mean Depth: YES				WT Mode: 12														
				WT Pings: 6														
				Max. Vel.: 0.281 m/s														
				Max. Depth: 1.57 m														
				Mean Depth: 1.51 m														
				% Meas.: 67.55														
				Water Temp.: None														
				ADCP Temp.: 15.3 °C														
Performed Diag. Test: NO						Project Name: 1_0.mmt												
Performed Moving Bed Test: NO						Software: 2.26.00.04												
Performed Compass Calibration: NO						Evaluation: NO												
Meas. Location:																		
Tr.#	Edge Distance		#Ens.	Discharge						Width	Area	Time		Mean Vel.		% Bad		
	L	R		Top	Middle	Bottom	Left	Right	Total			Start	End	Boat	Water	Ens.	Bins	
007	R	0.00	0.00	66	-0.044	-0.259	-0.074	0.000	0.000	-0.378	3.1	4.7	08:10	08:11	0.05	-0.08	3	0
008	L	0.00	0.00	62	-0.052	-0.286	-0.092	0.000	0.000	-0.430	3.7	5.5	08:11	08:13	0.05	-0.08	5	0
009	R	0.00	0.00	57	-0.051	-0.289	-0.091	0.000	0.000	-0.431	3.5	5.3	08:13	08:14	0.06	-0.08	0	0
010	L	0.00	0.00	66	-0.041	-0.238	-0.070	0.000	0.000	-0.349	3.5	5.2	08:14	08:15	0.05	-0.07	6	0
Mean	0.00	0.00	62	-0.047	-0.268	-0.082	0.000	0.000	-0.397	3.4	5.2	Total	00:05	0.05	-0.08	3	0	
SDev	0.00	0.00	4	0.005	0.024	0.011	0.000	0.000	0.040	0.2	0.3			0.01	0.01			
SD/M	0.0%	0.0%	7.0%	11.4%	9.0%	13.9%	0.0%	0.0%	10.2%	7.0%	6.4%			10.3%	8.4%			
Remarks: mjerenja kod dječje kuće																		
prva 5/6 u 14																		
druga 6/6 u 8																		

Slika 18. Podaci očitani u aplikaciji a dobiveni pomoću ADCP uređaja na kanalu ispred Dječje kuće

7. ZAKLJUČAK

Zaključak ovog rada donosi pregled metodologije i rezultata istraživanja usmjerenih na mjerenje protoka vode u otvorenim kanalima, s posebnim naglaskom na vodotok Brajda. Analizirane su različite metode mjerenja brzine vode, uključujući tradicionalne metode kao što su hidrometrijsko krilo i plovci, kao i moderne tehnike poput elektromagnetskih mjerača i akustičnih Doppler mjerača brzine (ADCP). Protoci dobiveni pomoću ADCP uređaja pružaju referentne vrijednosti koje mogu pomoći u daljnjoj optimizaciji metoda mjerenja i proračuna protoka. U istraživanju su primijenjene metode za ručno mjerenje geometrije kanala i brzine strujanja vode. Mjerenja su provedena na dvjema lokacijama: perilu Brajda i kanalu ispred Dječje kuće. Geometrija kanala je detaljno izmjerena, uključujući širinu i dubinu na više točaka, dok su brzine strujanja mjerene elektromagnetskim mjeranjem. ADCP uređaj je korišten za dobivanje protoka u realnom vremenu. Provedena mjerenja su pokazala da je geometrija oba kanala pretežno pravokutna, a rezultati mjerenja brzine i površine kanala korišteni su za konstruiranje poprečnog profila i proračun protoka. U konačnici, protok je izračunat na temelju dobivenih podataka i uspoređen s rezultatima mjerenim ADCP uređajem. Razlike između izračunatih i izmjerenih vrijednosti protoka ukazuju na potrebu za dodatnom kalibracijom metoda proračuna.

8. LITERATURA

- [1] Zašto i čime mjeriti protok <https://hidro.dhz.hr/hidroweb/pocetna/Zastoprotok/Zastoprotok.html> , pristup 28.08.2024.
- [2] Rouse, H. (1957). *History of Hydraulics*. Iowa Institute of Hydraulic Research.
- [3] Štern, Z. (1986). *Hidrologija* (2nd ed.). Školska knjiga.
- [4] Jovanović, S., Bonacci, O., & Anđelić, M. (1977). *Hidrometrija*. Građevinski fakultet univerziteta u Beogradu.
- [5] Hidrometrijsko krilo i njegova primjena u vodi, Oprema. <https://www.hidroing.biz/oprema/>, pristup 28.08.2024.
- [6] Novak, Z., & Šimunić, V. (2011). *Mjerenje brzine strujanja vode u otvorenim kanalima: elektromagnetski mjerači*. Tehnički vjesnik, 18(3), 435-443.
- [7] Horvat, A. (2018). *Tehnologija elektromagnetskih mjerenja u hidraulici*. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje.
- [8] Simpson, M. R. (2001). *Discharge measurements using a broad range of acoustic Doppler profilers*. U.S. Geological Survey.
- [9] Simpson, M. R. (2001). *Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler* (pp. 01-01). Reston: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- [10] Marsden, B. (2015). *History of Hydrology*. Springer.
- [11] Roberson, J. A., Cassidy, J. J., & Chaudhry, M. H. (1998). *Hydraulic engineering*. John Wiley & Sons.
- [12] Anderson, J. M., & Mikhail, E. M. (1998). *Surveying, theory and practice. (No Title)*.
- [13] Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (2002). *Elementary surveying: An introduction to geomatics*.
- [14] Oprema za geodetsko mjerenje uz pomoć nivelmana, <https://eshop.wuerth.com.hr/714%2064693/set-za-niveliranje-3kom>, pristup 30.08.2024.

- [15] Mjerenje geometrije profila uz pomoć nivelmana, <https://gridbl.com/project/geodetsko-snimanje-vodnih-objekata-po-profilima-hidrografska-batimetrijska-i-klasicna-geodetska-mjerenja-i-izrada-elaborata-za-sljedece-lokacije/>, pristup 30.08.2024.
- [16] Willsman, A. (2013). Measurement, Processing and Archiving of Open Channel Flow Data. Open channel flow measurement.
- [17] Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.). (2018). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC press.
- [18] Instruments, R. D. (1996). Acoustic Doppler current profiler principles of operation: A practical primer. *RD Instruments, 1*.
- [19] Drone Photogrammetry Guide – Everything You Need To Know, <https://www.thedroneu.com/blog/drone-photogrammetry/>, pristup 30.08.2024.
- [20] Mobilno lasersko skeniranje LiDAR tehnologijom, <https://images.app.goo.gl/1s4bg7xgydYjNYz37>, pristup 30.08.2024.
- [21] Ožanić, N. (2022). Materijali s predavanja.
- [22] Žugaj, R. (2000). *Hidrologija*. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- [23] Bedient, P., B., Huber, W., C. & Vieux, B., E. (2013). *Hydrology and Floodplain Analysis* (5th Edition). Prentice Hall.
- [24] Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*.
- [25] Brunner, G., W. (1994). *HEC River Analysis System (HEC-RAS)* (147th Edition.). US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- [26] Briški, D. (2021). *Revitalizacija potoka Brajda unutar kompleksa Rikard Benčić* (Specijalistički diplomski stručni). Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet. Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:157:388642>