

Mogućnost korištenja vodenica za proizvodnju električne energije - primjer rijeke Plitvice na lokaciji Luka Ludbreška

Biškup, Lidija

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:155890>

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

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

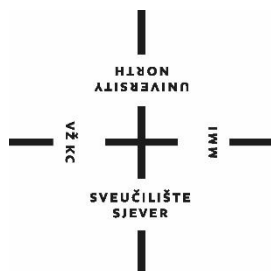


Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



DIPLOMSKI RAD br. 38/GRD/2021

**MOGUĆNOST KORIŠTENJA VODENICA ZA
PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE -
PRIMJER RIJEKE PLITVICE NA LOKACIJI
LUKA LUDBREŠKA**

Lidija Biškup

Varaždin, rujan 2021.

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Studij Graditeljstvo



DIPLOMSKI RAD br. 38/GRD/2021

**MOGUĆNOST KORIŠTENJA VODENICA ZA
PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE -
PRIMJER RIJEKE PLITVICE NA LOKACIJI
LUKA LUDBREŠKA**

Student:
Lidija Biškup, 1176/336D

Mentor:
izv.prof. dr.sc. Bojan Đurin

Varaždin, rujan 2021.

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za graditeljstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Graditeljstvo		
PRISTUPNIK	Lidija Biškup	JMBAG	0336015014
DATUM	16.09.2021.	KOLEGIJ	Vodni sustavi
NASLOV RADA	Mogućnost korištenja vodenica za proizvodnju električne energije - primjer rijeke Plitvice na lokaciji Luka Ludbreška		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Possibility of using water mills for electric energy production - the example of the river Plitvica at the location of Luka Ludbreška		
MENTOR	dr.sc. Bojan Đurin	ZVANJE	Izvanredni profesor
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. Doc.dr.sc. Danko Markovinović 2. Izv.prof.dr.sc. Bojan Đurin 3. Doc.dr.sc. Domagoj Nakić 4. Doc.dr.sc. Željko Kos 5. _____		

Zadatak diplomskog rada

BROJ 38/GRD/2021

OPIS

Diplomski rad prikazati će mogućnost korištenja vodenica kao turbina za proizvodnju električne energije na rijeci Plitvici kod Luke Ludbreške. Proračunati će se potencijalne snage takvih turbina, uz detaljan opis hidrometrijskih mjerenja, koja su nužna za navedeno.

Predloženi okvirni sadržaj rada po poglavljima je:

- Uvod
- Opis tradicionalnih vodenica
- O vodicama kao vrsti turbina za proizvodnju električne energije
- Hidrometrijska mjerenja za potrebe dimenzioniranja vodeničkih kola
- Analiza dobivenih rezultata
- Zaključak
- Literatura

ZADATAK URUČEN 16.09.2021.





IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Lidija Biškup (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Moćnost korištenja vodenica za proizvodnju električne energije – primjer rijeke Plitvice na lokaciji Luka Ludbreška (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Biškup Lidija

(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Lidija Biškup (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Moćnost korištenja vodenica za proizvodnju električne energije – primjer rijeke Plitvice na lokaciji Luka Ludbreška (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Biškup Lidija

(vlastoručni potpis)

Predgovor

Zahvaljujem mentoru izv.prof. dr.sc. Bojanu Đurinu na pomoći prilikom izrade ovog rada. Zahvaljujem se i kolegicama sa fakulteta koje su sa mnom sudjelovale u hidrološkim mjerenjima i time doprinijele izradi ovog rada.

Zahvaljujem svim kolegama i prijateljima na podršci te svima ostalima koji su na bilo koji način pridonijeli ovom mom uspjehu.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj obitelji i dečku Nevenu jer su uvijek bili uz mene, vjerovali u mene, radovali se sa mnom lijepim trenucima i bodrili me u teškim trenucima te pružali veliku podršku tokom cijelog studija. Veliko hvala za sve!

Lidija Biškup

Sažetak

Porastom svjesnosti o ograničenoj količini neobnovljivih izvora energije i njihovom štetnom utjecaju na okoliš, obnovljivi izvori energije postaju sve privlačniji i potrebni. Najznačajniji oblik obnovljive energije predstavlja hidroenergija, a posljednjih godina raste interes za korištenje energetskeg potencijala malih vodotoka. U ovom radu opisane su vodenice kao tradicijska postrojenja za iskorištavanje energije vodotoka te potencijal njihovog korištenja u svrhu proizvodnju električne energije. Vodenička kola kao vrsta turbine pokazale su se ekološki prihvatljivije i isplativije od tipičnih impulsnih i reakcijskih turbina. Jedna zapuštena vodenica pronađena je na rijeci Plitvici u blizini Ludbrega pa se za tu lokaciju izvršio proračun snage jedne takve turbine. Prije samog proračuna potrebno je bilo provesti hidrološka mjerenja, a opis i rezultati mjerenja također su prikazani u radu.

Ključne riječi: hidroenergija, vodenice, turbina, rijeka Plitvica, hidrološka mjerenja

Summary

With an increase in awareness of the limited amount of non-renewable energy sources and their harmful impact on the environment, renewables are becoming more attractive and necessary. The most significant form of renewable energy is hydropower, and in recent years there has been growing interest in using the energy potential of small water flow. This paper describes water plants as traditionally lined up for harnessing the energy of water flows and the potential of their using for the purpose of electricity generation. Water wheels as a type of turbine proved to be more environmentally friendly and cost-effective than typical action and reaction turbines. One neglected water mill was found on the Plitvica River near Ludbreg, so the power calculation of one such turbine was carried out for the site. Before the calculation, it was necessary to carry out hydrological measurements, and the description of measurement and measurement results are also presented in this paper.

Keywords: hydropower, water mills, turbine, Plitvica River, hydrological measurements

Popis korištenih kratica

A	površina poprečnog presjeka toka
A_L	uronjena površina lopatice/kola
ADCP	eng. Acoustic Doppler Current Profiler Naziv metode (uređaja) za mjerenje protoka
ADV	eng. Acoustic Doppler Velocimeter Naziv metode (uređaja) za mjerenje protoka
B.R.	eng. blockage ratio blokadni omjer
c	brzina zvuka
C_p	koeficijent snage
d₁	nizvodna dubina vode
d₂	uzvodna dubina vode
f_D	Dopplerov pomak frekvencije
f_s	frekvencija zvuka iz stabilnog izvora (iz prijemnika)
FT2	FlowTracker2
g	gravitacijsko ubrzanje
HPM	eng. Hydrostatic Pressure Machine postrojenje za hidrostatski tlak
HPW	eng. Hydrostatic Pressure Wheels kola hidrostatskog tlaka
ΔH	razlika u visinama
P	snaga
P_{kin}	kinetička energija toka
v₁	srednja brzina toka
v₂	brzina lopatice
v_r	relativna brzina gibanja između izvora zvuka i prijemnika
Q	protok
η	učinkovitost
θ	kut između vektora relativne brzine plovila i smjera gibanja vala
ρ	gustoća vode

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Opis tradicionalnih vodenica.....	4
2.1. Gradnja i princip rada vodenica	4
2.2. Korištenje vodenica.....	7
3. O vodenicama kao vrsti turbina za proizvodnju električne energije.....	8
3.1. Vrste turbina za hidroelektrane	8
3.2. Vrste vodenica i njihovi radni rasponi	12
3.3. Dimenzioniranje turbina.....	15
3.3.1. Teorijska razmatranja.....	15
4. Hidrometrijska mjerenja za potrebe dimenzioniranja vodeničkih kola	19
4.1. ADCP metoda	19
4.2. ADV metoda	21
4.2.1. SonTek FlowTracker2 ADV uređaj	22
4.3. Hidrološka mjerenja – terenski rad	27
4.3.1. Opis lokacije	27
4.3.2. Postupak mjerenja	34
4.3.3. Rezultati mjerenja	38
4.3.3.1. Rezultati prvog dana mjerenja 02.06.2021.	38
4.3.3.2. Rezultati drugog dana mjerenja 04.06.2021	43
4.3.3.3. Rezultati trećeg dana mjerenja 03.09.2021	47
5. Analiza dobivenih rezultata.....	55
5.1. Prvo mjerenje, 02. lipanj 2021.	56
5.2. Drugo mjerenje, 04. lipanj 2021.	57
5.3. Treće mjerenje, 03. rujan 2021.	58
5.4. Usporedba dobivenih rezultata.....	61
6. Zaključak.....	62
7. Literatura	64
Popis slika	66

1. Uvod

Energija je sposobnost tijela ili sustava da obavi neki rad te se u prirodi, tehnici i industriji pojavljuje u različitim oblicima. Osnovni oblici energije u prirodi su potencijalna, kinetička, električna, kemijska, toplinska i nuklearna energija. Energija može nastati iz različitih izvora, a ti izvori mogu se podijeliti na obnovljive i neobnovljive izvore. Neobnovljivi izvori energije su fosilna (ugljen, nafta i prirodni plin) i nuklearna goriva (uran, plutonij), čija su nalazišta i zalihe ograničene te samim tim podložna konačnom iscrpljivanju. Za razliku od njih, karakteristika obnovljivih izvora energije jest da su neiscrpni, odnosno neprestano se obnavljaju u prirodi. U obnovljive izvore energije ubrajamo sunčevu energiju, energiju vjetra, energiju vode, geotermalnu energiju i energiju iz biomase [1].

Naša trenutna civilizacija, koju karakterizira visok stupanj potrošnje, predstavlja sustav koji treba ogromnu količinu energije da bi se održao stabilnim. Ova razina održava se zahvaljujući intenzivnom korištenju energije koja se izvlači iz okoliša. Termodinamički gledano, ako se ništa ne poduzme, energetske resursi će se srednjoročno iscrpiti, što će uzrokovati ozbiljnu i nepopravljivu degradaciju okoliša. Kako se cijena nafte i utjecaji njezine uporabe kao izvora energije na okoliš povećavaju, put prema obnovljivim izvorima energije postaje sve privlačniji i potrebniji. Opće je poznato da je hidroenergija najbolje razvijen i daleko najvažniji oblik obnovljive energije. Proizvodnja električne energije korištenjem gravitacijske sile pada ili tečenja vode doživjela je sve veću potražnju nakon industrijske revolucije. Početkom 20. stoljeća komercijalne tvrtke u nekoliko dijelova svijeta gradile su mnoge male hidroelektrane [2]. Danas je, posebice u razvijenim zemljama, veliki dio prirodnog hidroenergetskog potencijala za proizvodnju električne energije već iskorišten te zbog toga posljednjih godina raste interes za korištenje energetske potencijala malih vodotoka. Upravo o energetske potencijalu malih vodotoka biti će riječi u ovome radu.

Republika Hrvatska ima veliki hidroenergetski potencijal, no on još uvijek nije u dovoljnoj mjeri iskorišten. Izgradnja hidroelektrana u Hrvatskoj, od svojih prvih početaka 1895. godine, zabilježila je najveći rast nakon Drugog svjetskog rata kada započinje značajnije korištenje hidroenergetskog potencijala u Hrvatskoj. U razdoblju puštanja u pogon prve hidroelektrane Jaruga do danas izgrađeno je 25 hidroelektrana. Prema studiji *Mogućnosti korištenja vodnog potencijala u Strategiji energetske razvitka Republike Hrvatske* [3], u budućnosti se u našoj državi planira izvesti još 60 hidroelektrana.

Osim velikim hidroelektranama, u Republici Hrvatskoj pažnja se predaje i malim hidroelektranama. Sustavni pristup istraživanju energetskeg potencijala za male hidroelektrane pokrenut je početkom osamdesetih godina prošlog stoljeća. Kada se govori o maloj hidroelektrani, prva asocijacija je da se radi o samostalnom objektu za proizvodnju električne energije predviđene isključivo za plasman u elektroenergetski sustav. Uz tu pretpostavku može se konstatirati da je to relativno jednostavan građevinski objekt s pripadajućom infrastrukturom. Međutim, malu hidroelektranu interesantnije je promatrati kao segment višenamjenskog objekta. Ostali segmenti mogu biti vodocrpilišta, ribogojilišta, mostovi, različiti rekreacijsko-turistički i hotelsko-ugostiteljski objekti itd. Mala hidroelektrana u tom slučaju može predavati proizvedenu električnu energiju drugim građevinama u sklopu jednog takvog višenamjenskog objekta. Mogućnost proizvodnje energije na mjestu njene potrošnje bitno smanjuje troškove prijenosa energije u odnosu na međusobno dislocirane izvore i potrošače energije. Agregati malih hidroelektrana mogu se ugrađivati i u stare i razrušene mlinove odnosno objekte hidroelektrana, jer je male hidroelektrane najpovoljnije locirati na prirodnim kaskadama, a u većini slučajeva upravo na takvim prirodnim vodnim stepenicama su se u prošlosti već gradili takvi objekti (mlinovi i vodenice). Zbog zaštite kulturne baštine poželjno je prilagoditi male hidroelektrane ugradnji u ovakve objekte, jer, iako je ulaganje u male hidroelektrane potaknuto željom za ostvarivanjem novih izvora prihoda, kao posredna korist javlja se i interes za trajnom zaštitom tradicionalnog narodnog graditeljstva od daljnjeg uništenja [3].

U Hrvatskoj su do industrijske revolucije vodenice bile najvažniji prerađivački pogoni. Prve vodenice, kakve su već bile razvijene u Bizantu, pojavile su se na našim rijekama u 12. stoljeću, a u Kini i Indiji su bile poznate još u antičko doba, kada su i razvijeni gotovo svi oblici vodenica te raširena njihova primjena. Vodenica je tradicijsko postrojenje za iskorištavanje energije vodotoka. Najčešće se rabila za pogon mlinskoga kamena za mljevenje žita, maslina i kukuruza, pile jarmače i drugih pilanskih strojeva, naprava za mekšanje sukna i obradu tekstila, kovačkih maljeva i dr. Vodenice su bile drvene ili zidane zgrade uz vodotoke ili kanale kojima se dovodila voda, a u njima se nalazilo postrojenje, radionica s radnim strojevima te druge pomoćne prostorije. Vodeničko kolo glavni je dio postrojenja, koji obavlja pretvorbu energije vode koja pada ili teče u okretanje glavnog vratila, s kojeg se dalje mehaničkim prijenosom privodi do radnih strojeva. Kolo je veći drveni kotač s nizom lopatica raspoređenih približno radijalno po obodu, na koji se usmjerava voda. Kotač je kod nekih vodenica postavljen vodoravno (s uspravnim vratilom), ili, kod većine njih, uspravno (s vodoravnim vratilom) [4].

Čelične čigre (koloturi) i osovine olakšale su gradnju vodenica kašikara na malim potocima. Vodenica kašikara je vrsta vodenice s horizontalnim vodnim kolom i mlaznicom (badnjem).

Dobila je ime po žličastim (kašikastim) lopaticama koje su smještene na obodu kola, a kolo se nalazi ispod vodenice i pričvršćeno je na vertikalnu osovinu koja u unutrašnjosti pokreće mlinsko kamenje. Ove vodenice smatraju se najstarijim tipovima vodenica. Njihova glavna karakteristika je da se mogu pokretati relativno malim količinama vode ako je brzina vode dovoljno velika. Ovakvim vodenicama mljelo se sporo, ali se ipak mljelo. U veće vodenice ugrađuju se turbine i grade brane koje zamjenjuju mlinove s više kola. Mlinovi vodenice postaju savršenstvo narodne tehničke vještine, osobito tamo gdje su te vodenice služile i kao pilane, što se često nalazi u gorskim krajevima. Usprkos velikim naporima da se vodenice očuvaju jer su one bile izvor egzistencije mnogih ljudi, u promjenama vremena vodenice gube bitku u borbi s modernim mlinovima na paru i motornim mlinovima na dizel gorivo i električnu energiju koji ne ovise o vodi niti o godišnjem dobu, nego idu za potrošačima, a ne moraju potrošači ići za mlinovima. No, što je najzanimljivije, mlinovi su propali poslije Drugoga svjetskog rata, odnosno kada su električni čekićari, tj. mali električni kućni mlinovi omogućili svakom seljaku da si samelje ono što mu treba [5]. U novije su doba kola nekih vodenica zamijenile male vodne turbine. Te su turbine konstruirane tako da imaju veću snagu od klasičnog drvenog kola.

2. Opis tradicionalnih vodenica

2.1. Gradnja i princip rada vodenica

Sagraditi vodenicu bilo je veliko i cijenjeno umijeće, ali u isto vrijeme i veoma zahtjevno, a izvodili su je posebni majstori, što domaći, što oni iz Mađarske. Takvi majstori ujedno su izrađivali i riječne skele i čamce. Svaka pojedinačna vodenica bila je pravo remek djelo, jedinstven primjer drvenog stroja u kojem skoro da i nije bilo metalnog dijela.

Dravska vodenica sastojala se od glavnog čamca (*komp*) na kojem je smještena vodenična kućica, te *navodnice*, odnosno manjeg bočnog čamca. Komp je bio širok 4 metra, dubok jedan metar, dok mu je dužina ovisila o veličini vodenične kućice. Navodnica je dolje bila široka jedan metar, duboka također jedan metar, a dužina joj je bila 10-12 metara. Komp su se izrađivali od dasaka debljine 2,5 cm, a navodnice od 8 cm. U proreze između dasaka stavljala se mahovina i kudjelja, a to se pričvrstilo limenim *klanficama* da ne bi propuštale vodu. Komp i navodnica su prema struji vode bili malo zašiljeni da se panjevi i granje ne bi zaustavljali i oštećivali konstrukciju. Koristila se uglavnom birana piljena hrastovina, a drvo se dobivalo od Imovne općine. Svaki mlin morao se obnavljati barem svakih deset godina jer je drvo trunulo. Prema nekim zapisima, komp i navodnica davno su se prije izrađivali iz izdubljenih hrastovih debla, koje su zvali *lade*. Tek kad je ponestalo debelih trupaca prišlo se izradi od piljenih dasaka [6].

Horizontalna drvena osovinu s širokim vodeničkim kolom ležala je s jedne strane na navodnici, a s druge strane ispod mlina na kompu. Tako se vodeničko kolo okretalo snagom vode. Na kraju te osovine, u podnožju mlina, uglavljen je bio manji kotač (*trib*) s bočno usađenim *palcima* po obodu koji su imali ulogu zupčanika. Trib je pokretao drugo kolo (*vretenka*) koje je bilo postavljeno na donjem dijelu okomite osovine. Gornji dio spomenute osovine bio je uglavljen u mlinski kamen. Vretenka je također jedna vrsta kola u koju su usađene takozvane *cevi*, podeblje čvrste kratke palice kružno usađene i učvršćene s gornje i donje strane. Okretanjem kola zvanog trib, palci su ulazili između cevi i okretali vretenko, odnosno osovinu s mlinskim kamenom. Cijela transmisija izrađena je od drva. Kamenje je u kućici bilo na povišenom dijelu tako da je brašno curilo u drvene pretince iz kojih se grabilo u vreće. Mlinar je imao posebnu prostoriju u kojoj se odmarao, a u njoj je bila peć i zvonu koje ga je upozoravalo dok bi žito iscurilo. Cijeli mlin bio je vezan gredama, lancima ili užadi s obalom, a do mlina se išlo preko brvi. Na obali je bila podignuta brvnara (*koča*) sa žitom. U kasnu jesen, prije same pojave leda, vodenice su prestajale s radom, a splavi s mlinom uvlačile su se iz plovnog dijela u mirnije dravske uvale (*zatone*) radi zaštite od leda. Uvlačenje se obavljalo tako da se na čvrstoj obali zakopalo nekoliko drvenih stupova, a na

svakom je bio utaknut *štubel* (šuplje deblo) oko kojeg je bilo namotano uže. Štubel se okretao pomoću debelog kolca, te namatajući uže pomalo privlačio mlin k obali. Taj težak i zahtjevan posao obavljalo je 50-100 ljudi. Tom prilikom trebalo je biti veoma oprezan, jer su se vodenice mogle otrgnuti, a voda bi ih znala odnijeti i zdrobiti ih. Prema jednom podatku, izgleda da je bilo i ljudskih žrtava kod uvlačenja. Nesreće su se događale i mimo zime, posebice prilikom naglih porasta vodostaja rijeka [6]. Na slici 2.1. prikazana je fotografija vodenice iz Ferdinandovca koju je jedan mještatin pronašao na tavanu svoje kuće. Navedena fotografija prikazuje izgled dravske vodenice, na žalost, ne njezin prvotni izgled, već njezino derutno stanje, no i iz toga se može predočiti njihov nekadašnji izgled i zamisliti način funkcioniranja vodenice.



Slika 2.1. Fotografija vodenice iz Ferdinandovca; primjer dravske vodenice [7]

Mlinovi potočari građeni su uz vodu koja se iskopanim, pa i drvenim kanalima dovodila do vodeničnog kola (*naper*, *nalevna*). To je takozvano naljevno kolo na koje voda pada s gornje strane. Takvo kolo puno je uže od vodeničnog kola. Podljevno kolo bilo je karakteristično za riječnu vodenicu. Tu je voda zahvaćala kolo s donje strane, jer je snaga tekuće riječne vode bila daleko veća. Vlasnik je oko mlina morao posjedovati veću površinu zemlje jer je njom odvodni kanal morao vratiti vodu natrag u korito potoka. Na potoku je uzvodno od mlina bila sagrađena brana koja je zadržavala i čuvala vodu u koritu ili manjem jezercu za vrijeme manjeg dotoka. Kad je vode bilo previše ispuštala se po potrebi otvaranjem opusta (*zapor*). Na dovodnom kanalu bio

je pak ugrađen manji opust kojim se regulirao dotok vode na kolo. Vodenično kolo s osovinom počivalo je na dva stupa. Ostali postroj bio je sličan kao i kod dravske vodenice. U glavnoj prostoriji s postrojenjem bila je i soba u kojoj je stanovao mlinar, dok je u drugoj bilo smješteno žito i brašno. Postoji zapis koji navodi riječi jednog mlinara da je njegova vodenica, koja je pokretala dva para kamenja, mogla samljeti u prosjeku 50-60 vreća dnevno [6]. Na slici 2.2. prikazan je jedan mlin potočar sa takozvanim naljevnim kolom. Riječ je o Friščićevoj mlinu u Prigorcu koji leži na potoku *Bistrica*. Mlin je sagrađen 1956. godine, no dvadesetak godina kasnije prestao je s radom zbog pomanjkanja vode u Bistrici. Mlin je obnovljen 2004. godine, a 2016. godine dobio je novo kolo. U mlinu se još i danas proizvodi brašno, no proizvodi ga sam vlasnik mlina iz svojeg žita. Brašna se ne proizvodi puno jer ni vode nema previše. Na izvor Bistrice je danas priključen vodovod, pa za mlin ostane samo ekološki minimum određen zakonom, a to je dovoljno tek za 10 kilograma brašna na sat. Friščićevo mlin danas je dio turističke ponude ivanečkog kraja, a ujedno i jedini očuvani i funkcionalni mlin na potoku Bistrici.



Slika 2.2. Friščićevo mlin u Prigorcu; primjer mlina potočara [8]

2.2. Korištenje vodenica

Kao što je spomenuto u odlomku prije, vodeničko kolo okretalo se snagom vode. Ovisno o snazi vode, vodenička kola mogla su biti podljevna ili naljevna. Na rijekama su se gradila takozvana podljevna kola, gdje je voda zahvaćala kolo s donje strane, jer je snaga vode bila dovoljno velika da može okretati kolo na taj način. S druge pak strane, na potocima je snaga vode bila relativno mala, a ljeti je često bio i manji dotok vode, pa su se gradila naljevna kola. Karakteristika naljevnih kola je da voda na kolo pada s gornje strane i ono je puno uže od podljevnog kola. Neovisno o vrsti kola, svako kolo bilo je pričvršćeno na horizontalnu osovinu, koja je s druge strane bila uglavljena u manji kotač u podnožju mlina. Okretanjem kola, a time i horizontalne osovine, okretao se i taj manji kotač koji je, ulaganjem *palaca* (zupčanika) između *cevi*, pokretao drugo kolo koje je bilo postavljeno na donjem dijelu okomite osovine. Gornji dio spomenute osovine bio je uglavljen u mlinski kamen, pri čemu se i taj dio okretao i na taj način služio za mljevenje žita.

Mljevenje se obavljalo pomoću dva kamena zvanih *gornak* i *dolnak*. Gornji kamen (*gornak*) imao je rupu u sredini u koju se sipalo žito iz ljevkaste drvene nasipne posude. Žito se mljelo okretanjem gornjeg kamena, dok je donji (*dolnak*) bio stabilan. Kamenje je bilo izvana obloženo drvenom oplatom. Kroz poprečne utore (*remiše*) kamen je okretanjem izbacivao brašno van. Oštrina kamenja s vremenom se potrošila pa se ono moralo klepati posebnim čekićima. Kamenje se nabavljalo iz Mađarske (crvenkaste boje), Austrije i Bosne [6].

3. O vodenicama kao vrsti turbina za proizvodnju električne energije

Već je naglašeno da su vodna kola (vodeni kotači) bila najraniji hidraulični strojevi koji su se u antici koristili za pretvaranje energije vode u mehaničku energiju. Zbog njihove jednostavne instalacije, niskih troškova održavanja te zahvaljujući mogućnosti korištenja lokalne radne snage i materijala za njihovu izgradnju, danas se vodna kola ponovno koriste za opskrbu energijom, osobito u udaljenim područjima i zemljama u razvoju. Konkretno, vodna kola se ugrađuju u tekuću vodu gdje nema razlika u nagibu [9].

3.1. Vrste turbina za hidroelektrane

Turbina je sastavni dio hidroelektrane koja snagu toka pretvara u mehaničku energiju. U osnovi, turbine se mogu klasificirati kao akcijske (impulsne) i reakcijske. Impulsnim, odnosno akcijskim turbinama smatraju se Peltonove, Turgo i Crossflow turbine, specificirane da kinetičku energiju toka koriste za okretanje lopatica te na taj način proizvode mehaničku energiju, pri čemu nema pada tlaka na turbini jer se nalaze izvan vode ili su samo lopatice jednim malim dijelom uronjene u vodu. Druga vrsta su reakcijske turbine, čija je glavna karakteristika da su potpuno uronjene u vodu te snaga proizlazi iz pada tlaka na turbini, a obodna brzina pretvara se u snagu vratila. Turbine zasnovane na ovakvom principu rada su Propelerne, Francisove i Kaplanove turbine.

Peltonove turbine koriste se na padovima do 2000 m, Francisove turbine do 700 m, a Kaplanove turbine do 40 m. Tamo gdje su prisutne visine od nekoliko metara, Francis i Kaplan turbine mogu se skalirati i instalirati, ali nisu isplative. Utjecaj na okoliš je značajan jer ove turbine zahtijevaju cijevi pod tlakom, difuzor i rešetke kako bi se izbjegao prolaz sedimenta i ribe kroz turbinu. Peltonove turbine nisu prikladne zbog male brzine protoka pri čemu može doći do kovitljanja toka. Kao posljedica toga su u posljednjim desetljećima na tržište uvedeni novi hidroenergetski pretvarači za mjesta s malim geodetskim padom, poput Arhimedovih vijaka, gravitacijskih vodnih kola i potočnih vodnih kola te hidrokinetičkih turbina. Ovi su mehanizmi ekološki prihvatljiviji i isplativiji od tipičnih impulsnih i reakcijskih turbina jer je brzina njihove rotacije sporija i ne zahtijevaju cijevi pod tlakom, tako da su rizici vezani uz kretanje riba i problemi sa zaustavljenim i nakupljenim sedimentima svedeni na minimum [9].

Arhimedovi vijci i gravitacijska vodna kola koriste se na mjestima gdje postoji pad u koritu kanala, pri čemu se stvara razlika u visini. Pritisak na lopatice stvara težina vode, odnosno javlja se hidrostatski tlak koji ovisi samo o dubini vode nad lopaticama. Stoga se takvi pretvarači hidroenergije nazivaju gravitacijska postrojenja ili pretvarači hidrostatičkog tlaka. Arhimedovi vijci i gravitacijska vodna kola općenito se koriste od 0,5 m do 6-8 m visinske razlike, a djelomično su uronjeni u vodu. Arhimedovi vijci rotiraju se oko osi nagnute od 22° do 35° u vodoravnom smjeru, dok je rotacijska os gravitacijskih vodnih kola vodoravna [9]. Na slici 3.1. prikazana su tri Arhimedova vijka te se jasno vidi njihov nagib. Od gravitacijskih vodnih kola, podljevna kola koriste se za visinske razlike između 0,5 i 1,5 m, a nadljevna kola za razlike u visinama između 2,5 i 6 m. Podljevno i nadljevno kolo prikazana su na slici 3.2.a i 3.2.b.



Slika 3.1. Tri paralelna Arhimedova vijka [10]



Slika 3.2. Gravitacijska vodna kola: a) Podljevno vodno kolo (preuzeto iz [9]); b) Nadljevno vodno kolo [10]

Potočna vodna kola, odnosno vodenice, koriste se u istim hidrauličkim uvjetima kao i hidrokinetičke turbine – u tekućoj vodi bez visinske razlike, u režimu nesmetanog protoka (ili kod vrlo malog pada tako da je potencijalna energija manja od kinetičke). Za razliku od hidrokinetičkih uređaja, rotacijska os vodenica je vodoravna, kao kod gravitacijskih vodnih kola (slike 3.3., 3.4. i 3.5.), te je postavljena preko slobodne površine vode, tako da samo najniži dio kotača dolazi u kontakt s vodenim tokom. Vodenice se mogu koristiti u različite svrhe, primjerice za opskrbu lokalnih aktivnosti i mlinova energijom (slika 3.3.), proizvodnju električne energije (slika 3.4.) te kao uređaj za crpljenje vode u kanalima za navodnjavanje, tzv. pumpe (slika 3.5.). Za proizvodnju električne energije, na vratilo se mora postaviti električni generator. Umjesto toga, u spiralnim crpkama, spiralna cijev omotana je oko središnje osovine vodeničkog kola. Voda iz rijeke/vodotoka prikuplja se vanjskim rubom cijevi (nalazi se po obodu kotača). Voda teče duž cijevi, od ruba cijevi do osovine kotača, gdje cijev povezana sa riječnom stranom dovodi vodu do krajnjeg korisnika [9].



Slika 3.3. Vodenica za proizvodnja mehaničke energije (preuzeto iz [9])



Slika 3.4. Vodenica za proizvodnju električne energije [9]



Slika 3.5. Vodenica za crpljenje vode u kanalu za navodnjavanje (tzv. pumpa) [9]

Vodenice su posebno isplative na mjestima gdje se lokalna proizvodnja i materijali mogu upotrijebiti za njihovu izgradnju, poput ruralnih područja i zemalja u razvoju. Jednostavne su konstrukcije (potrebno je malo građevinskih radova), s niskim troškovima ugradnje, malim ulaganjima u održavanje te velikom kulturnom i estetskom vrijednošću. Potpuna implementacija takve tehnologije može dovesti do osnivanja mnogih malih riječnih hidroelektrana, što će zauzvrat stvoriti održivi razvoj, industriju i radna mjesta [9].

3.2. Vrste vodenica i njihovi radni rasponi

U tekućoj vodi samo se kinetička energija toka mogla iskoristiti pomoću vodeničkog kola, no performanse i hidrauličko ponašanje vodeničkog kola zapravo ovise o Froudeovom broju, koji definira kakav je tok (subkritičan/miran, kritičan ili superkritičan/silovit tok) i blokadnom omjeru. Blokadni omjer (eng. blockage ratio, B.R.) definiran je kao

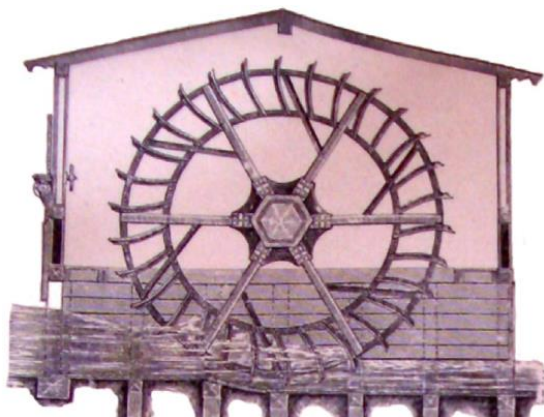
$$B.R. = A_L/A \quad (1)$$

gdje je: A_L – uronjena površina lopatice/kola

A – površina poprečnog presjeka toka

U slučaju malog blokadnog omjera, prisutnost kola bitno ne mijenja polje protoka unutar kanala, osim u samoj blizini kola zbog procesa ulaska i izlaska lopatice te interakcije između fluida i strukture. To je klasičan primjer vodeničkih kola ugrađenih u duboke tokove i velike rijeke te se takva kola također nazivaju i plutajuća kola, a izlazna im snaga ovisi o blokadnom omjeru. Ako se blokadni omjer povećava, veći dio toka prisiljen je proći kroz kolo, povećavajući izlaznu snagu. Na primjer, za $B.R. = 0,2$ povećanje izlazne snage zbog učinka blokade iznosi 30% u odnosu na neometanu konfiguraciju, dok za $B.R. \leq 0,05$ ono iznosi manje od 10%. Ako se blokadni omjer nastavi povećavati ($B.R. \rightarrow 1$), gubici snage u riječnom toku nastali prisutnošću kola bili bi toliko veliki da bi se u subkritičnom toku javilo prepoznatljivo širenje korita, a protok koji može proći nizvodno ovisi samo o brzini rotacije kola. Ovakav slučaj moguć je kod vodeničkih kola ugrađenih u plitku vodu, gdje je duljina lopatice slična dubini vode, a visinska razlika izaziva pokretanje kola. Ako je režim neometanog toka superkritičan, uzvodni tok može se pretvoriti u subkritičan, ili može ostati superkritičan, ovisno o tangencijalnoj brzini kotača [9].

U skladu sa svime navedenim, identificirati se mogu tri vrste vodeničkih kola – vodenička kola u plitkom subkritičnom toku, koja se nazivaju kola hidrostatskog tlaka (HPW, eng. Hydrostatic Pressure Wheels), vodenička kola u plitkom superkritičnom toku (kinetička kola) te vodenička kola u dubokom toku (plutajuća kola). Navedene vrste vodeničkih kola prikazane su na slici 3.6.



a)



b)



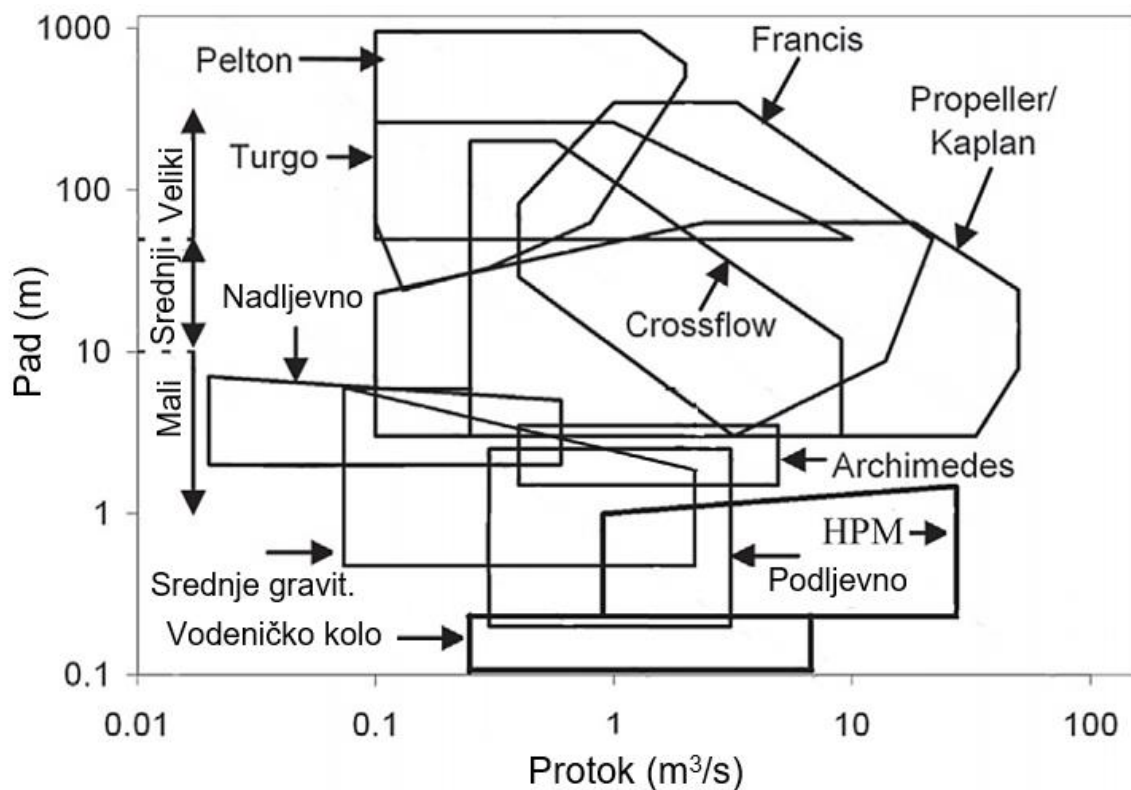
c)



d)

Slika 3.6. Vodenička kola u: a) subkritičnom plitkom toku [10], b) superkritičnom plitkom toku (preuzeto iz [9]), c) dubokom toku (preuzeto iz [9]) i d) postrojenje za hidrostatski tlak s dijagonalnim lopaticama za smanjenje otpora lopatica (preuzeto iz [9])

Najoptimalniji dizajn HPW-a (u smislu učinkovitosti i manjeg opterećenja) je postrojenje za hidrostatski tlak (HPM, eng. hydrostatic pressure machine), slika 3.6.d, namjerno osmišljen za samostalno stvaranje hidrauličkog pada. Na taj se način očekuje da će najveće razlike u visini biti 2,5 m. Klasični HPW-ovi su hidroenergetska postrojenja gdje se radna površina lopatice proteže od korita kanala do uzvodne površine vode, dok se u HPM-u radna površina lopatice proteže od korita kanala do nizvodne površine vode. Prostor HPM -a potpuno je napunjen, a protok koji može proći kroz HPM ne ovisi o dubini vode uzvodno, već samo o dimenzijama kotača i brzini vrtnje. Radni rasponi vodeničkih kola i HPM-a prikazani su na slici 3.7. te su uspoređeni s drugim turbinama [9].



Slika 3.7. Radni dijagram turbina. Vodenička kola i HPM istaknuti su debljim linijama jer se o njima raspravljalo u ovom radu (prilagođeno iz [10])

Obično se odabir hidroturbina temelji na specifičnoj brzini turbine, odnosno bezdimenzionalnom parametru koji uključuje pad, izlaznu snagu i brzinu izlaznog vratila. Uz to se i uobičajeno područje primjene turbina koristi za pomoć pri odabiru [12], kako je prikazano na slici 3.7. Radni dijagram turbina prikazuje područja primjene pojedinih turbina u ovisnosti od protoka i pada. Sve navedeno dovodi do odabira Peltonovih i Turgo turbina za velike padove, Crossflow (poprečno protočnih) i radijalnih (Francisovih) turbina za srednje padove te propelernih turbina i vodeničkih kola za male padove. Vodenička kola koriste se za područja bez ili sa vrlo malim padovima, ostvarujući radni protok između 0,5 i 8 m³/s. Nešto veći protok, a ujedno i održavanje većeg pada, može se postići HPM-om, kod kojeg radni protok može ići i do 50 m³/s.

3.3. Dimenzioniranje turbina

Već je spomenuto da se tokovi, ovisno o Froudeovom broju, dijele na subkritičan/miran, kritičan ili superkritičan/silovit tok. U ovom radu pažnja će biti posvećena samo plitkim subkritičnim tokovima, budući da se samo u njima mogu provesti hidrološka mjerenja ručnim mjernim uređajem dostupnim za obavljanje istih. Plitki tokovi su subkritični kada je dubina vode veća od kritične dubine, a superkritični kada je dubina vode manja od kritične dubine, dok je kritična dubina toka ona dubina kod koje tok ima minimalnu energiju. Za potrebe ovog rada smatra se da su vodeni tokovi plitki ako je duljina lopatice vrlo slična dubini vode, a prisutnost kola stvara veliki učinak začepljenja (B.R. je gotovo 1). Na slici 3.6.a i 3.6.b prikazana su dva primjera kola u plitkom toku.

U subkritičnim plitkim tokovima brzina kojom tok može teći nizvodno kroz kolo ovisi o dimenzijama i brzini okretanja kola. Za HPW, vrtložni protok ovisi i o uzvodnoj razini vode (na koju kotač utječe jer kotač stvara širenje korita). Suprotno tome, kod HPM-a uzvodna razina vode ne utječe na vrtložni protok, budući da je prostor HPM-a već potpuno napunjen vodom. U tom slučaju, kada bi dotok u kanal bio veći od protoka koji može proći kroz HPM, razina vode uzvodno teoretski bi se približila beskonačnoj. Međutim, povećanje neće biti neograničeno jer će s određenom razinom vode kotač postati potopljen. Stoga su uzvodne hidraulične građevine, poput ispusnih brana, potrebne za održavanje željene uzvodne razine vode, kao i visinskih razlika za pogon kotača. To vrijedi i za HPW ako se želi određena uzvodna dubina vode [9].

3.3.1. Teorijska razmatranja

U ovom odlomku biti će prikazane teorijske jednadžbe za procjenu izlazne snage vodeničkog kola u plitkoj vodi. U jednadžbama koje se nalaze u literaturi pretpostavljene su određene pretpostavke, iako one nisu uvijek navedene, a to su:

- 1) ponašanje je jednodimenzionalno i razmatra se stacionarno strujanje
- 2) samo jedna lopatica dolazi u interakciju s protokom
- 3) lopatica je okomita na brzinu toka

Najjednostavniji pokušaj procjene izlazne snage P bio bi kad bi teorija impulsa bila primijenjena na lopatici brzine v_2 u neograničenom toku, zanemarujući hidrostatičku silu nastalu zbog visinske razlike lopatica:

$$P = \rho A (v_1 - v_2)^2 v_2 \quad (2)$$

gdje je: A – uronjena površina lopatice/kola
 v_1 – brzina toka
 v_2 – brzina lopatice
 ρ – gustoća vode [9]

Teorijski model pokazuje najveću snagu kada je omjer $v_2/v_1 = 0.33$. Normalizacijom jednadžbe (2) u kinetičku energiju predstojećeg toka $P_{kin} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$ ($A \cdot v_1 = Q$, gdje je Q približna vrijednost protoka), dobiva se koeficijent snage. Stoga se proširenjem jednadžbe (2) snaga vodeničkog kola u plitkom toku može procijeniti kao:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p v_1^3 \quad (3)$$

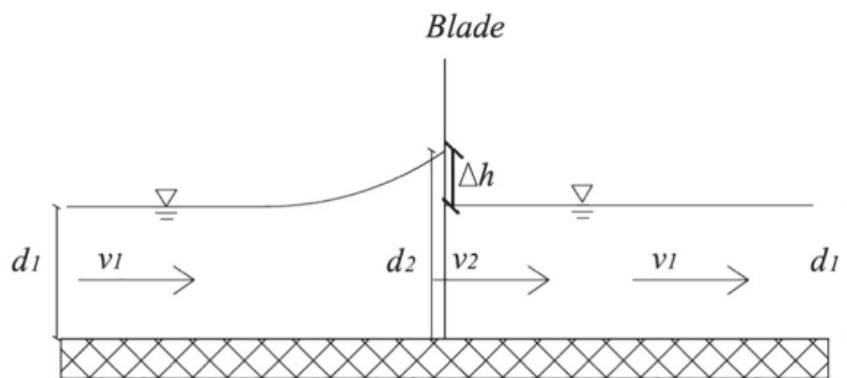
Vrijednost koeficijenta C_p je funkcija od v_2/v_1 , a njegov teorijski maksimum iznosi $C_p = 16/27$ (0,593) (Betzov limit) [9].

Budući da razlika u visini nije uzeta u obzir, jednadžba (3) vrijedi za vodenička kola čije su dimenzije manje od kanalskih (niski blokadni omjeri), odnosno vodenička kola u dubokoj vodi, ili kada je $v_2 \approx v_1$ (u kasnijem slučaju $C_p \rightarrow 0$). To je zato što, kada je $v_2 \leq v_1$ u plitkoj vodi, razlika u visini nije zanemariva (zbog visokog omjera začepjenja), pa se za procjenu izlazne snage mora uzeti u obzir teoretski postupak prikazan na slici 3.8. Budući da se subkritičnim tokovima upravlja nizvodno, samo uzvodno od lopatice brzina toka je jednaka tangencijalnoj brzini lopatice, koja je manja od brzine neometanog toka. Zbog toga se uzvodna razina vode povećava, kao posljedica efekta potpunog začepjenja. Otuda proizlazi razlika u visini, iako bi prvotna situacija bila stanje nulte visinske razlike. Nizvodno, brzina toka je neometana brzina toka, budući da subkritični tokovi ne ovise o uzvodnim rubnim uvjetima. Stoga se s teorijskog gledišta prethodna razmatranja moraju uzeti u obzir. Razmatrajući HPW s beskonačnim promjerom i zanemarujući gubitke snage zbog turbulencija, propuštanja i dotjecanja/otjecanja, učinkovitost se može izračunati jednadžbom (4):

$$\eta = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d_1}{d_2} \right) \quad (4)$$

gdje je: d_1 – dubina vode u neometanom predjelu (nizvodna razina vode)
 d_2 – uzvodna dubina vode ($d_1 \leq d_2$)

Jednadžba (4) izvedena je normalizacijom izlazne snage (uzrokovane hidrostatičkim silama koje djeluju na lopaticu zbog razlike u visinama $\Delta H = d_2 - d_1$) na izlaznu snagu $P_{in} = \rho g Q \Delta H$. Učinkovitost procijenjena jednadžbom (4) je nešto viša od eksperimentalnih rezultata za $0,6 \leq d_1/d_2 \leq 0,9$. Turbulentni gubitci mogu se procijeniti pomoću $P_{turb} = \frac{1}{2} \rho A C_p v_b^3$, gdje je A površina lopatice, $C_d = 1,5$ koeficijent otpora i v_b brzina vrha lopatice ($v_b \approx v_2$) [9].



Slika 3.8. Hidrauličko ponašanje vodeničkih kola i teorijski prijenos energije između toka vode i lopatica kola u plitkom subkritičnom toku [9]

Optimizirani dizajn HPW-a je postrojenje za hidrostatski tlak (HPM), namjerno dizajniran da se ponaša poput nasipa, s lopaticama koje su podložne minimalnom otporu tijekom rotacije u vodi. Standardne dimenzije HPM-a su s vanjskim promjerom (najveći promjer) tri puta većim od nizvodne dubine vode, dok je središnji promjer kola velik koliko i dubina vode nizvodno (slika 3.9.). To znači da središnji dio kola ima promjer jednak visinskoj razlici razina vode, a lopatice duljine slične nizvodnoj dubini. Dubina vode uzvodno kreće se do najviše razine središnjeg dijela kola. Lopatice su postavljene dijagonalno kako bi se smanjio otpor (vidi sliku 3.6.d). HPM ima manji promjer od uobičajenih HPW i kompaktniji je. Ako se gubitci uslijed turbulencija i propuštanja uzmu u obzir, izlazna snaga može se procijeniti jednadžbom (5):

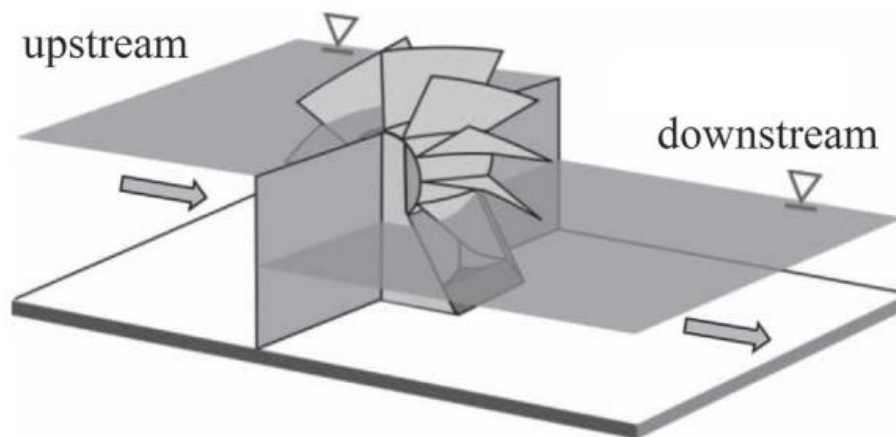
$$P = \eta_{th} P_{in} - \gamma Q_l \Delta H - K v_m^3 \quad (5)$$

gdje je:

- P_{in} – ulazna snaga, $P_{in} = \rho g Q (d_1 - d_2)$
- η_{th} – učinkovitost procijenjena jedn. (4), ali korigirana uzimanjem u obzir da promjer kola nije beskonačno velik
- Q_l – protok, može se procijeniti kao $Q_l = Q (1 - dh/\Delta H)$, pri čemu je dh razlika kinetičkog tlaka
- K – faktor gubitaka uslijed turbulencija, $K = 1/2 f \rho b l$, pri čemu je b širina lopatice, l linearna duljina oštrice te $f = 2,5$
- v_m – prosječna tangencijalna brzina lopatice

Koeficijent K je empirijski koeficijent koji uključuje sve gubitke snage koji se javljaju u HPM -u (isključujući propuštanja) [9].

U djelu N. Lintona, *Field trials and development of a hydrostatic pressure machine*, razvijena je teorija koja se temelji na jednadžbama kontinuiteta i momenata, pri čemu je svaki gubitak snage (neizravno uključen u koeficijent K u jednadžbi (5)) procijenjen. Prema tom teorijskom modelu, učinkovitost bi se mogla procijeniti s odstupanjem od 5% od eksperimentalnih podataka.



Slika 3.9. Shematski crtež postrojenja za hidrostatički tlak (HPM). Prikazane su slobodne površine uzvodno i nizvodno [9]

Za potrebe izrade ovog rada, a za izračun snage turbina koje koriste kinetičku energiju vode koristit će se jednadžba (3) iz ovog rada. Maksimalna teorijska vrijednost koeficijenta snage C_p spomenutog u jednadžbi (3) iznosi 59,3% i poznata je pod nazivom Betzov limit. Kod turbina manjih snaga iskoristivost je u praksi dosta niža zbog značajnih gubitaka. Iz tog razloga usvojena učinkovitost za kinetičku turbinu u ovom radu iznosi 30% prema [11], odnosno vrijednost koeficijenta snage $C_p = 0,30$, što proizlazi kao preporuka iz mnoge literature te iskustvenih spoznaja.

4. Hidrometrijska mjerenja za potrebe dimenzioniranja vodeničkih kola

Za korištenje hidrokinetičke energije vode potrebna su precizna hidrološka mjerenja. Hidrološka mjerenja, odnosno mjerenja protoka rijeka u Hrvatskoj, izvode Hrvatske vode i Državni hidrometeorološki zavod te se ona provode na brojnim lokacijama u Hrvatskoj. U današnje se vrijeme hidrološka mjerenja izvode pomoću ADCP (eng. Acoustic Doppler Current Profiler) metode, no budući da je ona skuplja od tradicionalnog načina mjerenja, neka mjerenja se i dalje izvode korištenjem jeftinijih metoda, kao što je mjerenje korištenjem boe (plutače) ili mjerenje propelerom. Mjerenja se također mogu obavljati i pomoću ADV (eng. Acoustic Doppler Velocimeter) uređaja, čiji je princip rada vrlo sličan principu rada ADCP uređaju, no uz nešto jednostavniju i lakšu provedbu. Upravo je ADV uređaj korišten za hidrološka mjerenja kojima su se prikupili podaci potrebni za izradu ovog rada.

4.1. ADCP metoda

ADCP metoda provodi se ADCP uređajem koji pomoću emisije akustičnih impulsa te na temelju Dopplerovog efekta određuje presjek (profil) promatranog vodotoka, kao i podjelu polja brzine (profile brzina) i dubine na tom presjeku, na temelju kojih se određuje protok vodotoka. Prilikom određivanja brzine vodenog toka pomoću ADCP uređaja koriste se zvučni valovi u ultrazvučnom polju, pri čemu se obično koriste frekvencije veće od 300000 Hz. Mjerenje brzine vodotoka uz pomoć ADCP-a temelji se na fizičkom principu primjetne promjene frekvencije. Primjetna promjena frekvencije određenog izvora zvuka javlja se kada se izvor kreće relativno prema nekom promatraču. Prilikom mjerenja brzine vodotoka, ADCP emitira zvučni impuls u vodeni stupac kroz svoj prijemnik. Prijemnik istovremeno generira povratni odjek signala koji se reflektira od čestica suspendiranih u vodi, koje su uvijek prisutne u većem ili manjem broju. Reflektirani signal se prvo analizira i uspoređuje s emitiranim signalom primjenom autokorelacijskih funkcija i algoritama. Reflektirani signal mora imati oblik sličan izvorno emitiranom. Nakon toga izračunava se Dopplerov pomak te se pomoću njega određuje brzina strujanja vodotoka. Dopplerov pomak izračunava se prema formuli (7):

$$f_D = 2f_s \frac{v_r}{c} \cos \theta \quad (7)$$

gdje je:

f_D – Dopplerov pomak frekvencije

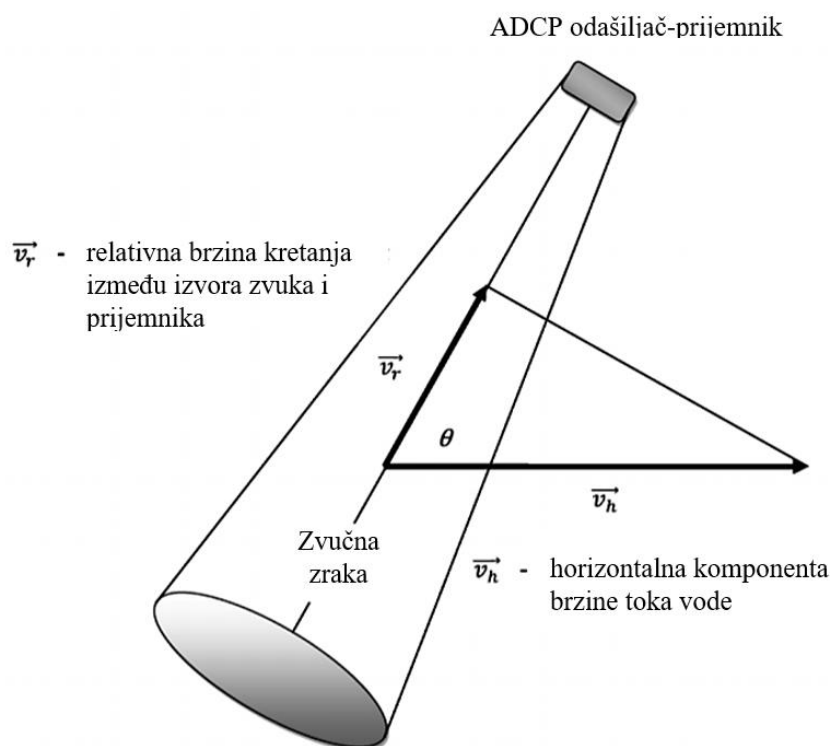
f_S – frekvencija zvuka iz stabilnog izvora (iz prijemnika)

v_r – relativna brzina gibanja između izvora zvuka i prijemnika

c – brzina zvuka

θ – kut između vektora relativne brzine plovila i smjera gibanja vala (slika 4.1.)

U isto vrijeme se određuje i dubina na isti način [13].

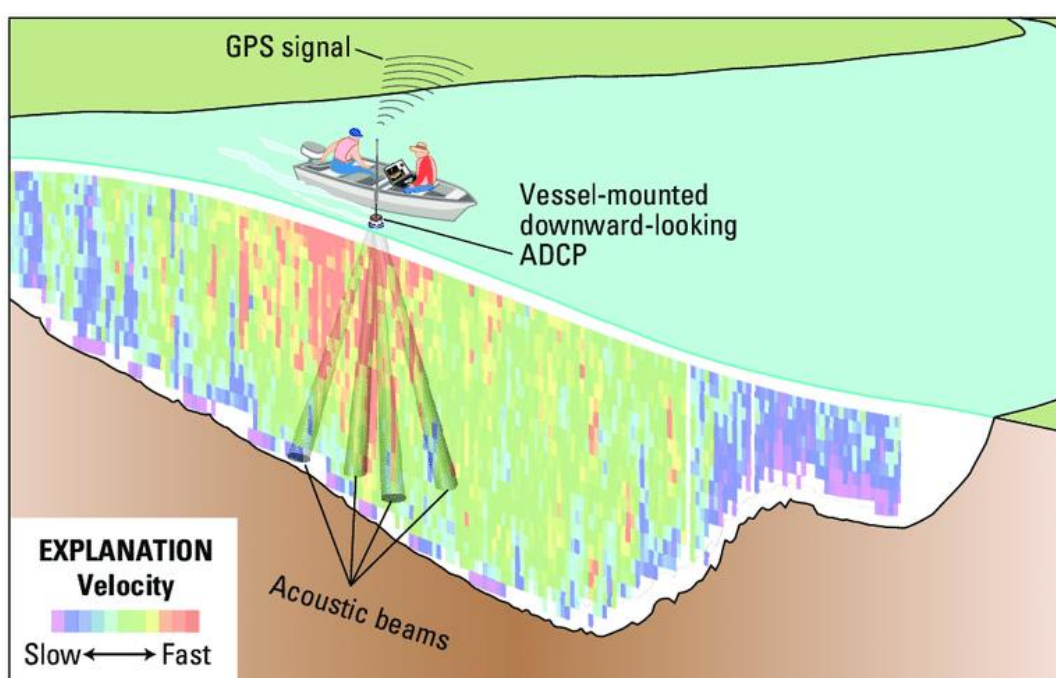


Slika 4.1. Mjerenje protoka pomoću ADCP metode [13]

ADCP uređaj pričvršćen je za plovilo na način da je uronjen u vodu i usmjeren prema dnu vodotoka. U kućištu uređaja najčešće se postavljaju četiri akustična prijmnika nagnuta pod kutom od približno 25° u odnosu na vertikalnu os uređaja. Na slici 4.2. prikazan je izgled jednog ADCP uređaja gdje je vidljiv položaj prijemnika. Svaki prijemnik stvara svoj vlastiti ultrazvučni signal te određuje brzinu i dubinu vodotoka. Na taj način uređaj u potpunosti prekriva prostor ispod sebe [13]. Na slici 4.3. karikirano je prikazan način mjerenja protoka pomoću ADCP uređaja.



Slika 4.2. ADCP uređaj [14]

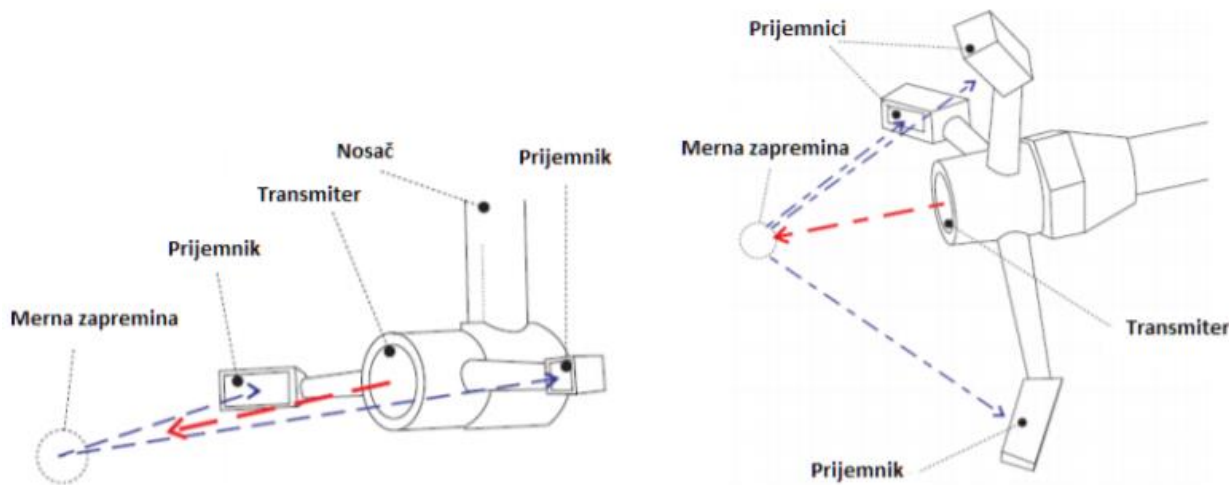


Slika 4.3. Ilustracija mjerenja protoka pomoću ADCP uređaja pričvršćenog za plovilo [15]

4.2. ADV metoda

ADV uređaj (eng. Acoustic Doppler Velocimeter) je senzorski sustav temeljen na akustičkom doplerskom principu te je pogodan za visoko rezolucijska mjerenja trodimenzionalnih brzina. Opremljen je sučeljem zasnovanim na računalnom sučelju koje omogućuje postavljanje instrumenata, imenovanje datoteka i vizualni nadzor u stvarnom vremenu za tri komponente protoka iz jednostavnog izbornika [16]. Klasična dispozicija sonde podrazumijeva upotrebu dva,

tri ili četiri prijemnika od 1-10 MHz i jednog centralno pozicioniranog odašiljača (transmitera) od 1-10 MHz (slika 4.4.). Prijemnici su radijalno postavljeni sa odmakom od 90, 120 ili 180 stupnjeva, u zavisnosti od njihovog broja, tako da formiraju krug oko centralnog odašiljača [17].



Slika 4.4. Različite dispozicije ADV sonde; na lijevoj strani je varijanta sa dva prijemnika, a na desnoj sa tri [17]

ADV uređaji rade korištenjem tehnike koherentne obrade impulsa u impuls (obično se naziva impulsno koherentna ili PC). Oni odašilju jedan vrlo kratak zvučni impuls, bilježe njegov povratni signal (tj. refleksiju od čestica u tekućini), a zatim u kratko vrijeme odašilju drugi impuls, identičan prvom. Svaki povratak detektiraju akustički prijemnici usmjereni u udaljeni volumen uzorkovanja (slika 4.4.). Instrument mjeri faznu razliku između dva povrata i pomoću toga izračunava Dopplerov pomak, koji je izravno proporcionalan brzini fluida. Mjerenja brzine izvedena pulsno koherentnom obradom vrlo su precizna, ali imaju ograničenu najveću mjerljivu brzinu [18].

4.2.1. SonTek FlowTracker2 ADV uređaj

Kao što je ranije spomenuto, ADV uređaj korišten je za potrebe izrade ovog rada, odnosno za hidrometrijska mjerenja. Točnije, riječ je o uređaju naziva FlowTracker2 Handheld-ADV marke SonTek. SonTek FlowTracker2 (FT2) ručni je instrument za mjerenje protoka sa 2D sondom. Ovakva sonda ima samo 2 prijemnika kojima se bilježe povratni signali, međusobno postavljenih pod kutom od 120 stupnjeva. Na slici 4.5. prikazana je sonda uređaja korištenog za mjerenja, gdje se jasno vide odašiljač te prijemnici signala, kao i njihov međusobni položaj.



Slika 4.5. 2D sonda korištena prilikom hidroloških mjerenja

Prije samog mjerenja, uređaj je potrebno sastaviti jer se on nalazi rastavljen i spremljen u svojem specijalnom kovčegu koji sprječava moguća oštećenja uređaja (slika 4.6.). Uređaj se sastavlja od šest glavnih dijelova, koji su također vidljivi na slici 4.6., a to su: gornja i donja šipka za podešavanje, sonda s pripadajućim kabelom, konzola za montažu, uređaj za upravljanje mjerenjem te baterije.



Slika 4.6. Dijelovi mjernog uređaja FlowTracker2

Sam instrument sastoji se od (slika 4.7.) [19]:

1. Sonda FlowTracker2,
2. Tipkovnica,
3. Ručni uređaj (sastoji se od procesorske elektronike baterija, tipkovnice i LCD zaslona),
4. Odjeljak za baterije,
5. LCD zaslon,
6. Kabel sonde,
7. Komunikacijski priključak.



Slika 4.7. Dijelovi instrumenta [19]

Prilikom sastavljanja uređaja, a također i prilikom njegovog korištenja i kasnije prilikom rastavljanja, potrebno je veliku pažnju posvetiti rukovanju sondom, kako ne bi došlo do eventualnih oštećenja senzora. Još jedna bitna stavka je dobro postavljanje i zatezanje ručnog uređaja na vrh gornje šipke za podešavanje pomoću konzole za montažu, kako prilikom rada ručni uređaj ne bi pao u vodu ili na neku drugu podlogu i oštetio se. Ručni uređaj izdržao bi privremeno poniranje jer je dizajniran za takve izvanredne situacije, no nije namijenjen za podvodni rad pa bi najbolje bilo izbjegavati bilo kakav kontakt s vodom. Na slici 4.8. prikazan je pogled na konzolu za montažu te su jasno vidljivi dijelovi koje treba dobro učvrstiti kako bi ručni uređaj bio stabilan i siguran. Na slici 4.9. prikazan je izgled sastavljenog uređaja spremnog za rad.



Slika 4.8. Nosač za montažu – spajanje ručnog uređaja na vrh gornje šipke za podešavanje [19]



Slika 4.9. Uređaj FlowTracker2 spreman za rad

Uređaj FlowTracker2 prikladan je za mjerenja u uvjetima niskog do srednjeg protoka, ovisno o brzini i dubini vode. Postupak mjerenja temelji se na sljedećim koracima:

- a) Prikupiti i provjeriti podatke o mjernom mjestu prije samog mjerenja
- b) Odabrati mjesto mjerenja na temelju raznih kriterija. Stanje i uvjeti toka mijenjaju se s vremenom pa je preporučeno da se postojeće mjerno mjesto ocijeni tijekom svake vježbe mjerenja na terenu
- c) Za nova mjerna mjesta preporučeno je da korisnik izvrši provjere na licu mjesta na nekoliko točaka duž presjeka kanala, kako bi dobio procjenu raspona brzina, dubine vode i geometrije kanala
- d) Izvršiti dijagnostičko ispitivanje prije mjerenja. Sondu postaviti u vodu dalje od podvodnih prepreka koje bi mogle ometati mjerenje
- e) Razvući mjernu traku preko mjerenog dijela kako bi se lakše određivale mjerne postaje. Mjerna traka treba biti okomita na smjer glavnog toka i orijentaciju kanala
- f) Dubina vode mjeri se na svakoj postaji pomoću šipke mjernog uređaja
- g) Vremenski interval mjerenja obično varira između 40 i 60 sekundi za mjerenja brzine, ovisno o uvjetima protoka
- h) Određivanje srednje brzine za svaku postaju. Softver predlaže metodu od šest desetina ili dvije točke, ovisno o pragu dubine u metodi 0,6 i izmjerenoj dubini vode
- i) Držati sondu podalje od biljaka i drugih mogućih predmeta u vodotoku koji bi mogli značajno utjecati na mjerenja brzine

ADV uređaji prikupljaju tri osnovne vrste podataka: brzinu, jačinu signala i ocjene koeficijenta korelacije. Brzina se prikazuje u dvije ili tri dimenzije, ovisno o konfiguraciji ADV uređaja, te je gotovo isključivo parametar od najvećeg interesa. Međutim, druga dva parametra sadrže vrijedne informacije o kakvoći podataka. Podaci o jačini signala obično su razmatrani u smislu amplitude signala ili omjera signal/šum (SNR). Za SonTek ADV uređaje, amplituda signala mjeri se unutarnjim logaritamskim jedinicama koje se nazivaju brojačima. Ocjena koeficijenta korelacije izravno je mjerenje kvalitete ADV podataka. Jednostavno rečeno, to je mjera koliko dobro čestice unutar volumena uzorkovanja održavaju svoj relativni položaj jedna prema drugoj tako da se jakost i relativne faze pojedinih odjeka impulsa ne mijenjaju od jednog do drugog impulsa. Prikazuje se kao postotak, pri čemu 100% znači da se održava savršena fazna koherentnost između impulsa, a šum ne postoji. Kada signalom dominira šum, a nema koherentnosti faza, koeficijent korelacija je 0%. Tipičan prag za prihvaćanje podataka je koeficijent korelacije od 70% ili veći, iako to može varirati ovisno o okruženju i primjeni [18].

4.3. Hidrološka mjerenja – terenski rad

Hidrološka mjerenja za potrebe ovog rada provedena su na rijeci Plitvici, u mjestu Luka Ludbreška pored Ludbrega, u Varaždinskoj županiji. Mjerenja su obavljena u nekoliko navrata, točnije tri različita dana sa različitim vremenskim odmakom kako bi se dobili što vjerniji rezultati i kasnije što bolja procjena moguće snage turbine. Navedena hidrološka mjerenja provedena su mjernim uređajem SonTek FlowTracker2, opisanim u prethodnom podpoglavlju.

4.3.1. Opis lokacije

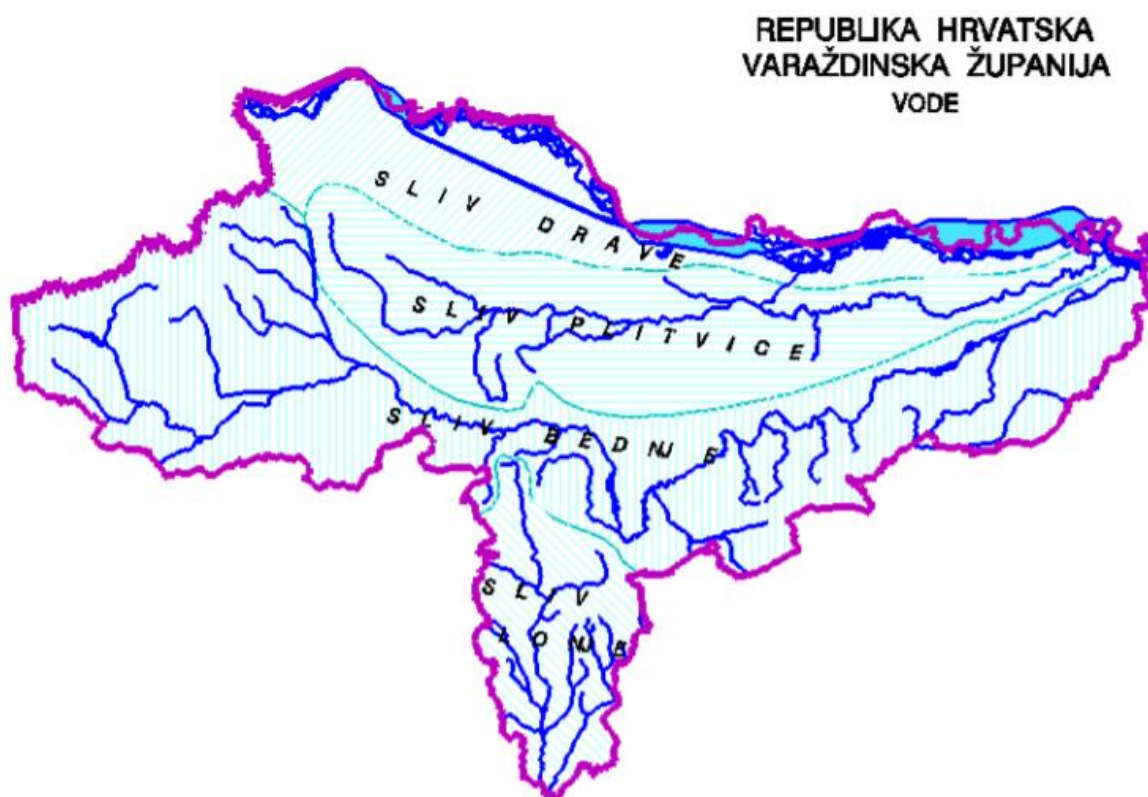
Rijeka Plitvica je 65 km dugačka desna pritoka rijeke Drave. Izvire na području sjeveroistočnih brežuljaka Maceljskog gorja, točnije na lokalitetu Abrahamov brijeg u općini Vinica u Hrvatskom zagorju, te cijelim svojim tokom prolazi Varaždinskom županijom [20]. U rijeku Dravu ulijeva se kod mjesta Mali Bukovec, blizu ušća rijeke Bednje također u Dravu. Manja je od Bednje i kraća, ali je zato brža i bistrija te je zbog toga bogata raznim ribljim vrstama, a u njoj se za toplijih dana može i osvježiti [21]. Na slici 4.10. prikazan je tok rijeke Plitvice uklopljen u tokove ostalih rijeka na području sjeverozapadne Hrvatske.



Slika 4.10. Tok rijeke Plitvice [22]

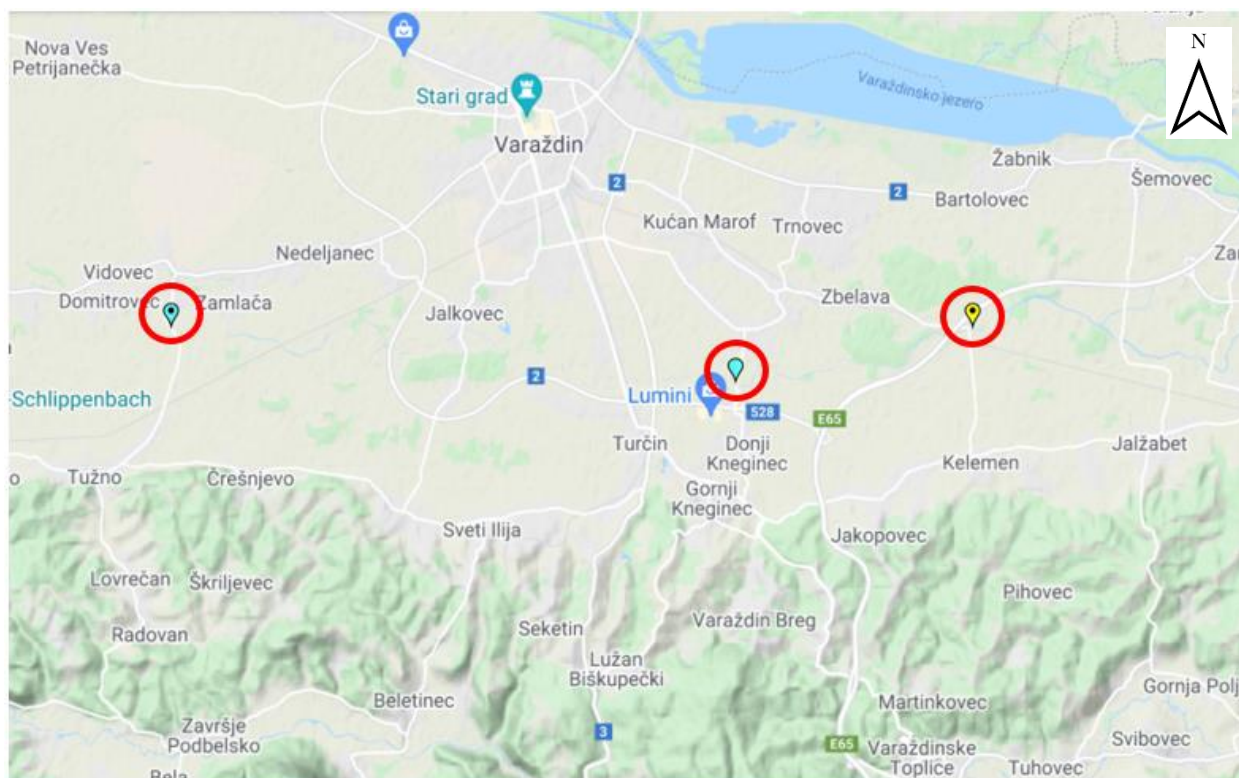
Izvor Plitvice nalazi se na 216 metara nadmorske visine, a ušće na 135 mnv. Cijelim svojim tokom je regulirana i polja su skroz do obala. Jedino je od sela Vrbanovec do sela Hrastovljan zabranjena sječa drva i uređenje obala zbog zaštićenog staništa dabra. Prosječne dubine toka su od pola metra do metar, iako ima mjesta gdje dubina doseže i do dva metra. Dno je pretežno šljunčano, a na mjestima gdje je sporiji tok je pješčano ili muljevito. Rijeka je široka od mjestimično dva do sedam, osam metara, a u prosjeku četiri do pet metara [23]. Uz tok Plitvice nalazi se 18 naselja, a najveća od njih su Jalkovec, Vrbanovec, Selnik i Veliki Bukovec.

Površina sliva Plitvice iznosi oko 144 km². Granice slivnog područja određene su Maceljskim gorjem na zapadu, slivnim područjem rijeke Drave na sjeveru i sjeverozapadu te slivnim područjem rijeke Bednje na jugu i jugozapadu, što je moguće vidjeti i na slici 4.11. Južna granica prema Bednji je uska i ide grebenom varaždinskog Topličkog gorja sve do Ludbrega, gdje i Plitvica i Bednja teku u ravnici. Vododjelnicu Plitvice i Bednje nakon Ludbrega teško je odrediti, kao i vododjelnicu Plitvice i Drave, a sve to zbog nizinskog toka aluvijalnim područjem sastavljenim od dravskoga nanosa šljunka i pijeska prekrivenim tankim slojem humusa. Tok Plitvice karakterizira niski pad koji je dodatno smanjen mlinskim ustavama [24].



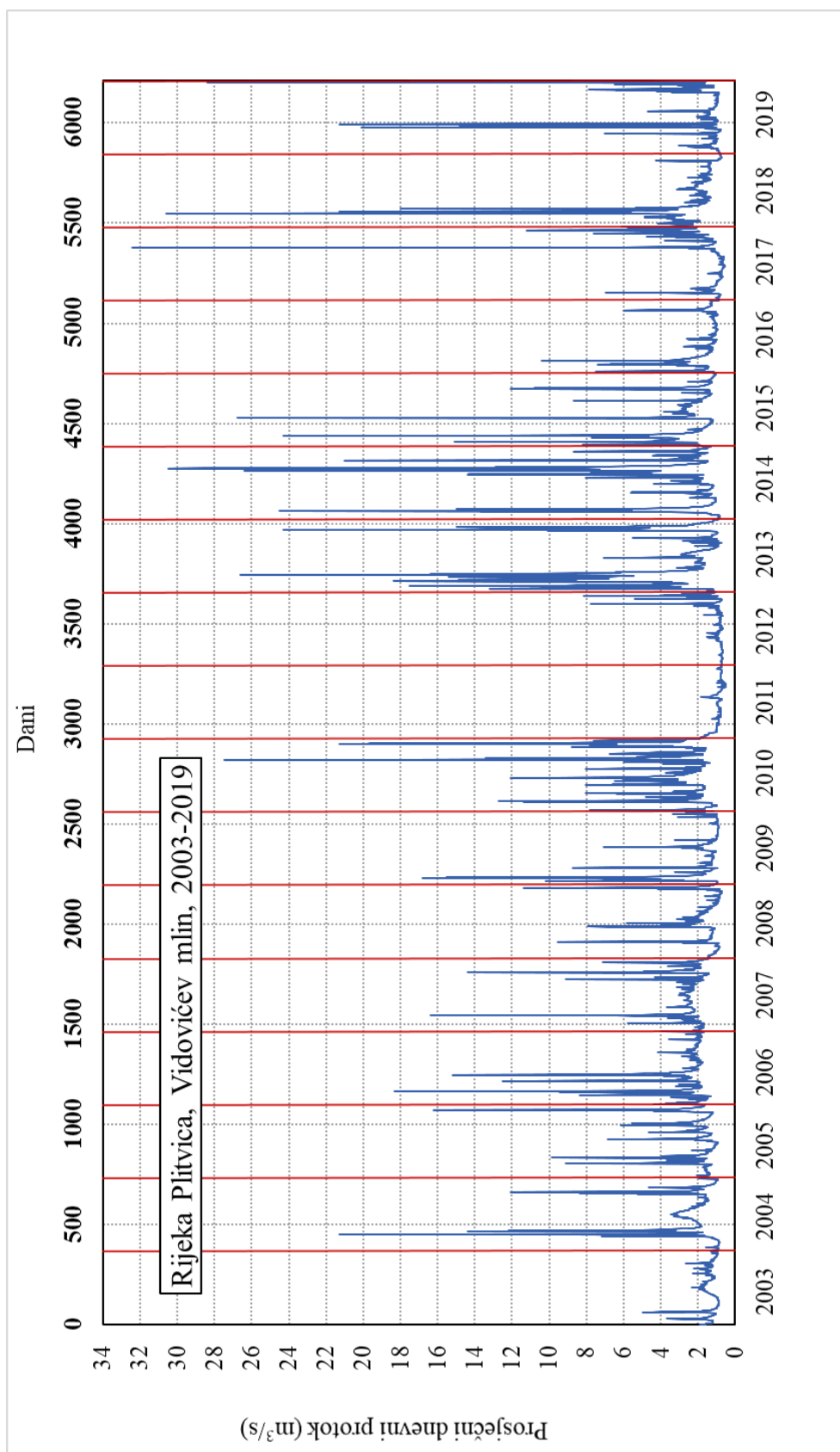
Slika 4.11. Slivovi rijeka u Varaždinskoj županiji [24]

Rijeku Plitvicu karakterizira pluvijalni (kišni) režim. Drugim riječima, protoci i vodostaji ove rijeke ponajviše ovise o intenzitetu i količini oborina na njezinom slivu. Iz tog razloga se maksimalni protoci očekuju neposredno nakon velikih kiša, odnosno u proljeće i u jesen. U svrhu praćenja protoka, odnosno vodostaja, na Plitvici postoje tri hidrološke postaje, a to su Kneginec Donji, Krkanec i Vidovićevo mlin kod Zbelave [25]. Na slici 4.12. crvenom bojom su označene navedene hidrološke postaje, s lijeva na desno: Krkanec, Kneginec Donji, Vidovićevo mlin.

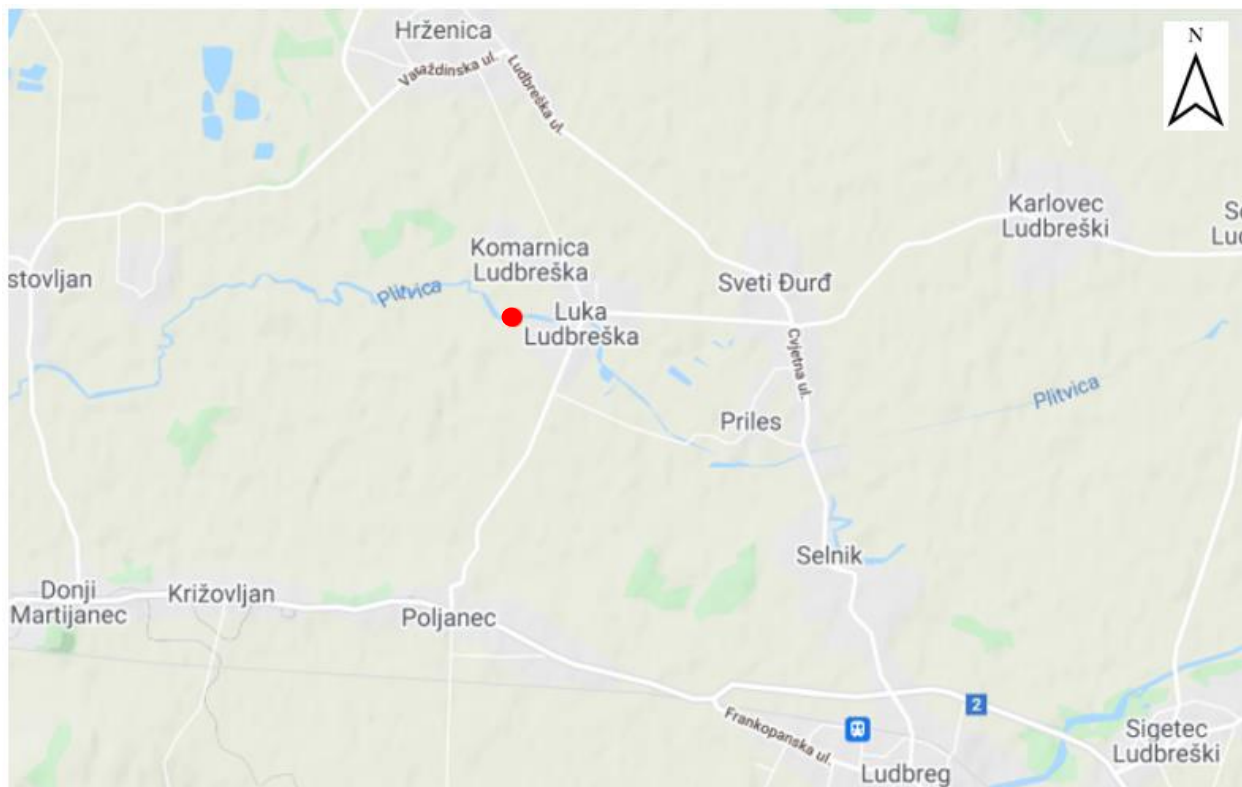


Slika 4.12. Hidrološke postaje na rijeci Plitvici [25]

Hidrološke postaje Krkanec i Vidovićevo mlin su automatske postaje, što znači da mjerene podatke dojavljaju automatski u zadanim intervalima. Postaja Kneginec Donji nije automatska već se očitavanja moraju raditi osobno na licu mjesta. Postaja Vidovićevo mlin najpoznatija je na rijeci Plitvici, a s radom je počela u lipnju 2002. godine. Od tada se mjeri vodostaj, a od 01. siječnja 2003. godine mjeri se i protok. Na slici 4.13. grafički su prikazane vrijednosti srednjeg dnevnog protoka kroz godine zabilježene na hidrološkoj postaji Vidovićevo mlin. Ovakav prikaz naziva se hidrogram, a iz ovog hidrograma može se vidjeti kako je Plitvica rijeka izrazito bujičnog karaktera sa naglim i višestrukim povećanjem protoka.



Slika 4.13. Hidrogram srednjeg dnevnog protoka za razdoblje od 01.01.2003.g. do 31.12.2019.g. na hidrološkoj postaji Vidovićevo mlin [25]



Slika 4.15. Lokacija hidroloških mjerenja (prilagođeno iz [25])



Slika 4.16. Vodenica u Luki Ludbreškoj



Slika 4.17. Pogled na lokaciju mjerenja stotinjak metara nizvodno od vodenice



Slika 4.18. Lokacija mjerenja kod zapornice

4.3.2. Postupak mjerenja

Postupak mjerenja započinje traženjem pogodne lokacije za mjerenje. Nakon pronalaska lokacije odlazi se na mjesto same lokacije vidjeti kakvo je terensko stanje. Dolaskom na lokaciju pregledava se je li teren pogodan za mjerenje te može li se sigurno ući u vodu. U konkretnom slučaju, dolaskom do vodenice u Luki Ludbreškoj i pregledom lokacije zaključeno je da se ne može ući u vodu kod same vodenice jer je voda preduboka. Sljedeća zamisao bila je mjerenje uzvodno od vodenice, no nakon pokušaja ulaska u vodu na tri različita mjesta utvrđeno je da je korito uzvodno od vodenice previše muljevito da bi se mjerenja mogla obaviti na siguran način. Zatim se pregledao nizvodni dio toka, gdje je na od prilike stotinjak metara od vodenice pronađeno pogodno mjesto za mjerenje. Nakon pronalaska lokacije potrebno je pripremiti teren za mjerenje. Obale i korito treba očistiti od biljaka i raslinja kako bi se osigurao siguran pristup i neometano mjerenje. Nakon toga se na lijevu i desnu obalu vodotoka postave nepomični štapovi za koje se pričvrsti mjerna traka. Na slici 4.19. prikazano je postavljanje mjerne trake na mjernoj lokaciji.



Slika 4.19. Postavljanje mjerne trake na mjernoj lokaciji u Luki Ludbreškoj

Mjerna traka proteže se okomito na tok vode te služi za što lakše i pravilnije određivanje mjernih stacionaža jer mjerenja moraju biti u pravilnom rasteru. U pravilu se kao raster odabire jedna dvadesetina ukupne širine rijeke na mjestu mjerenja, što je preporuka Svjetske Meteorološke Organizacije. Na Plitvici su prva dva mjerenja obavljena u rasteru od 1 metar, a treće i četvrto mjerenje u rasteru od 0,5 metara. Nakon postave mjerne trake može se pristupiti mjerenju, prije kojeg je još potrebno sastaviti instrument, budući da se on nalazi rastavljen u kuferu. Instrument se uključuje nakon ulaska u vodu te se upisuju osnovni podaci o mjerenju, a to su lokacija i operater koji je izvršio mjerenje, kako bi se lakše snalazilo prilikom analize i obrade rezultata mjerenja. Nakon toga se radi automatska provjera *Beam Check* koja vrši provjeru kontrole kvalitete prikupljenih podataka, kako bi se utvrdilo jesu li uvjeti protoka pogodni za mjerenje. Prilikom provjere instrument šalje zvučne signale u vodotok te se iscertava omjer signal/šum povratnog signala u odnosu na opseg za svaki prijemnik instrumenta. Provjera se radi kako bi se utvrdila učinkovitost mjerenja, pronašle moguće smetnje ili za provjeru kvalitete povratnog signala. Ako je provjera zadovoljena, može se početi s mjerenjem.

Mjerenje započinje upisivanjem nulte točke sa stacionažom nula i dubinom nula metara jer se radi o točki na kontaktu obale i vodnog lica te se od nje počinje računati udaljenost. Za ovu točku potrebno je još naznačiti radi li se o lijevoj ili desnoj obali, kako bi instrument znao pravilno bilježiti i kasnije interpretirati podatke. Na kraju mjerenja se zadnja stacionaža također upisuje sa dubinom od nula metara iz istog razloga kao i prva, te se tada također određuje o kojoj se obali radi. Osim lijeve i desne obale, moguće je izabrati i opciju *otvoreni tok* te se ova opcija odabire za sve ostale stacionaže koje nisu rubne. Na svakoj stacionaži prvo se upisuje udaljenost od početne (nulte) stacionaže, pri čemu udaljenosti između stacionaža moraju biti u pravilnom rasteru. Što je raster manji, to su mjerenja preciznija. Zatim se očita dubina vode pomoću podjela na šipki mjernog uređaja te se upisuje u uređaj, nakon čega uređaj odredi na kojoj dubini će se obaviti mjerenje. Softver predlaže metodu od šest desetina ili od dvije točke (0,2/0,8), ovisno o pragu dubine u metodi 0,6 i izmjerenoj dubini vode. U prva dva mjerenja češće se koristila metoda 0,2/0,8, odnosno mjerenja su vršena na dvije različite dubine, u trećem mjerenju mjereno je samo na šest desetina dubine jer je dubina bila relativno mala, dok se prilikom četvrtog mjerenja iskoristila pogodnost uređaja da uz metodu 0,2/0,8 nudi i dodatno mjerenje na 0,6 dubine pa su se mjerenja mjestimično vršila i na tri različite dubine. Vremenski interval mjerenja obično varira između 40 i 60 sekundi za mjerenja brzine, ovisno o uvjetima toka. Prilikom mjerenja instrument treba biti stabilan i vertikalno postavljen, a veoma je bitno i sondu držati okomito na tok vode te podalje od biljaka i drugih predmeta koji bi mogli utjecati na očitavanje senzora. Na kvalitetu mjerenja utječu mnogi parametri koje je potrebno uzeti u obzir, primjerice već spomenute biljke na dnu korita ili neke druge smetnje koje uređaj prepoznaje. Mjerenje nikad ne obavlja samo jedna

osoba, već moraju biti dvije da si međusobno pomažu prilikom kretanja kroz rijeku, čiji tok ponekad može biti poprilično jak, a dno korita nepredvidivo i veoma neugodno za kretanje. Osim pomaganja prilikom kretanja, dvije osobe mogu surađivati prilikom samog mjerenja na način da jedna osoba drži instrument i upisuje potrebne podatke u uređaj, a druga očitava dubinu vode pomoću šipke instrumenta i postavlja sondu na potrebnu dubinu, čime se znatno ubrza proces mjerenja. Na slici 4.20. može se vidjeti takva suradnja kolegice i mene prilikom mjerenja na rijeci Plitvici. Nakon završetka mjerenja, rezultate mjerenja je moguće pregledati na samom uređaju, ali isto tako ih je moguće i prebaciti na računalo, gdje je njihov pregled daleko lakši i pregledniji. Podaci sadrže informacije o lokaciji, vremenu mjerenja, metodi mjerenja, geometriji vodotoka (širina, dubina, površina), protoku, brzinama vode, temperaturi vode i slično.



Slika 4.20. Timski rad prilikom mjerenja

Opisanim načinom provela su se mjerenja prvi, drugi i treći dan na lokaciji stotinjak metara nizvodno od vodenice te treći dan na mjestu nekadašnje pregrade (zapornice) kod vodenice. Prvotni plan bio je na ovakav način provesti mjerenja samo na lokaciji nekadašnje zapornice kod vodenice kako bi se dobili podaci potrebni za proračun snage turbine, jer je zamisao rada bila izračunati moguću snagu turbine u obliku vodeničkog kola koja bi zamijenila staro vodeničko kolo na nekoj vodenici, odnosno koja bi se smjestila u ulazni kanal jer se time dobiva veća brzina tečenja vode. No dolaskom na teren zatečeno stanje nije dopuštalo da se takva mjerenja obave. Naime, na mjestu gdje je nekada bila zapornica kojom se regulirala uzvodna razina vode i koje se nalazi u ravnini vodeničkog kola, danas su dva željezna stupa koji se nalaze između betoniranih zidova. Između betonskog zida na lijevoj obali rijeke i prvog željeznog stupa nalazi se drvena

pregrada koja je bila dio zapornice, a preostala dva otvora nemaju nikakve pregrade jer se ona potrgala prilikom zadnje velike poplave. Rijeka svojim tokom nosi razne stvari, grane drveća, travu, smeće i slično te s vremenom dođe do zaustavljanja takvih stvari na stupovima i njihovog gomilanja, a time i začepljenja otvora te sprječavanja prolaska vode. Takva situacija bila je i u lipnju ove godine kada smo došli raditi mjerenja. Dva otvora bila su začepljena i voda je mogla prolaziti samo kroz zadnji otvor gdje još postoji pregrada, koja je u tom trenutku bila dignuta. Uslijed toga je tok uzvodno od pregrade bio predubok, a nizvodno od pregrade previše silovit da bi se moglo ući u vodu i obaviti mjerenja. Zbog navedene situacije su mjerenja obavljena stotinjak metara nizvodno od vodenice kako bi se dobio ukupni protok koji će poslužiti za izračun podataka potrebnih u proračunu snage turbine, a na mjestu otvora kod nekadašnje zapornice kroz koji je prolazila voda izmjerena je širina otvora te dubina vode koja je u tom trenutku prolazila kroz otvor. U ovoj situaciji trebalo je improvizirati pa je dubina vode izmjerena pomoću dugog tankog drveta (slika 4.21.). Isti postupak ponovljen je i drugog dana mjerenja, a u međuvremenu između drugog i trećeg dana mjerenja je područje kod nekadašnje zapornice očišćeno te se treće mjerenje moglo obaviti na samom mjestu nekadašnje zapornice. Taj dan obavljeno i mjerenje na lokaciji stotinjak metara nizvodno, gdje su rađena prva dva mjerenja, no ono sada nije potrebno za proračun u ovom radu, već služi samo kao kontrolno mjerenje.



Slika 4.21. Mjerenje dubine vode kod pregrade

4.3.3. Rezultati mjerenja

Nakon provedenih mjerenja, rezultate je potrebno obraditi. Radi bolje preglednosti i lakšeg upravljanja podacima, rezultati dobiveni mjernim instrumentom su premješteni na računalo, pri čemu je također olakšana i njihova analiza i obrada. U nastavku rada prikazani su rezultati mjerenja te su u poglavlju 5. *Analiza dobivenih rezultata* i obrađeni. Mjerenja su rađena u različitim vremenskim intervalima kako bi se vidjela promjena brzina i protoka, ali i svih ostalih karakteristika vodotoka. Prvi puta su mjerenja izvršena 02. lipnja, drugi puta 04. lipnja te treći puta 03. rujna 2021. godine. Prvi i drugi dan izmjerene su dubine vode koja je prolazila kroz otvor na području nekadašnje zapornice i uz to širina samog otvora, te je mjernim instrumentom izvršeno mjerenje stotinjak metara nizvodno od vodenice kako bi se dobio protok. Trećeg dana moguće je bilo izvršiti mjerenje instrumentom na samom mjestu nekadašnje zapornice te je to i učinjeno. Uz to je treći dan izvršeno i mjerenje na lokaciji stotinjak metara nizvodno, no ono nije više potrebno za proračun, već samo za usporedbu sa prethodna dva mjerenja.

4.3.3.1. Rezultati prvog dana mjerenja 02.06.2021.

Kao što je ranije spomenuto, mjerenje instrumentom trebalo je biti izvršeno na mjestu nekadašnje zapornice, no budući da okolnosti to nisu dozvoljavale, na tom mjestu izmjerena je samo širina otvora kroz koji je voda prolazila te dubina same vode na tom otvoru. Mjerenja instrumentom provedena su stotinjak metara nizvodno od vodenice kako bi se dobio ukupni protok. Širina otvora izmjerena je metrom, a dubina vode tankim drvetom koje je uronjeno u vodu pa izvađeno van, nakon čega se metrom izmjerila duljina omočenog dijela drveta. Izmjereno je da širina otvora iznosi 1,10 metara, a dubina vode prvog dana iznosila je 79 centimetara.

Rezultati mjerenja provedenih instrumentom mogu se premjestiti na računalo, a prikazani na računalu mogu se spremati kao *.pdf datoteka i kao takvi se prikazuju na nekoliko stranica. Prva stranica sadrži opće informacije o lokaciji i rezultatima mjerenja. Tako su na samom početku stranice ispisani podaci o imenu i broju mjerne postaje, osobi koja je izvršila mjerenje, početku i kraju mjerenja u realnom vremenu, koordinatama početne lokacije mjerenja te nekoliko podataka o samom uređaju kojim je mjerenje izvršeno. Nakon toga ispisani su osnovni podaci dobiveni mjerenjem, kao što su broj stacionaža, ukupna širina vodotoka, najveća dubina i slično. Izgled prve stranice izvještaja s rezultatima mjerenja prikazan je na slici 4.22. te ona ujedno prikazuje i rezultate prvog mjerenja na Plitvici u Luki Ludbreškoj, na lokaciji stotinjak metara nizvodno od vodenice, izvršenog 02. lipnja 2021. godine.



Discharge Measurement Summary

Site name	Luka
Site number	1
Operator(s)	LiD
File name	20210602-150014_Luka.ft
Comment	

Start time	2.6.2021. 14:16	Sensor type	Top Setting
End time	2.6.2021. 14:48	Handheld serial number	FT2H2025030
Start location latitude	46,281	Probe serial number	FT2P2024010
Start location longitude	16,582	Probe firmware	1.30
Calculations engine	FlowTracker2	Handheld software	1.6.4

# Stations	Avg interval (s)	Total discharge (m³/s)
12	40	1,794

Total width (m)	Total area (m²)	Wetted Perimeter (m)
10,700	6,838	10,980

Mean SNR (dB)	Mean depth (m)	Mean velocity (m/s)
39,359	0,639	0,262

Mean temp (°C)	Max depth (m)	Max velocity (m/s)
18,663	0,880	0,415

Discharge Uncertainty		
Category	ISO	IVE
Accuracy	1,0 %	1,0 %
Depth	0,2 %	3,8 %
Velocity	0,5 %	3,8 %
Width	0,2 %	0,2 %
Method	1,3 %	
# Stations	4,2 %	
Overall	4,6 %	5,4 %

Discharge equation	Mid Section
Discharge uncertainty	IVE
Discharge reference	Rated

Data Collection Settings	
Salinity	0,000 PSS-78
Temperature	-
Sound speed	-
Mounting correction	0,000 %

Summary overview

No changes were made to this file
Quality control warnings

Slika 4.22. Izgled prve stranice izvještaja s rezultatima mjerenja – opće informacije o lokaciji i rezultatima prvog mjerenja 02.06.2021.

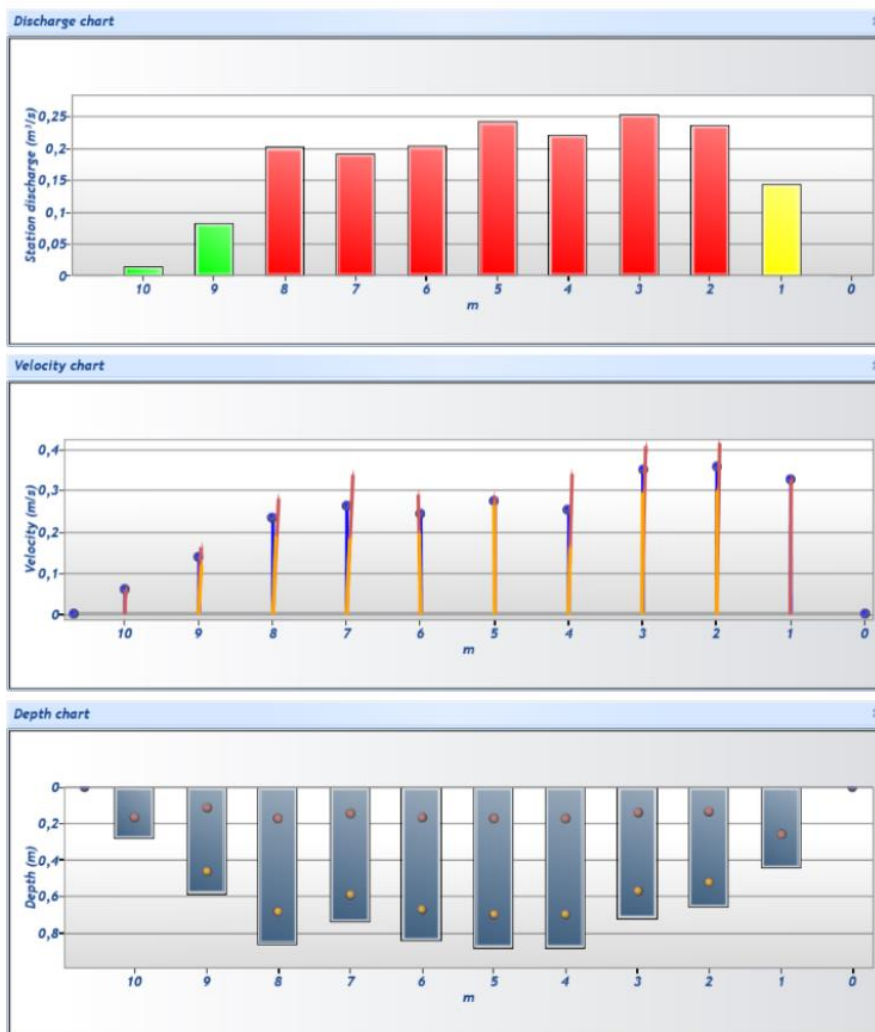
Druga stranica izvještaja sadrži dijagrame koji grafički prikazuju dobivene rezultate mjerenja. Na prvom dijagramu prikazane su izmjerene vrijednosti protoka po stacionažama, na drugom izmjereni iznosi brzina tečenja vode po stacionažama, dok treći dijagram prikazuje dubine na svakoj stacionaži. Za očekivati je da će najveći iznosi protoka i brzina biti zabilježeni na sredini vodotoka, osim ako ima nekih prepreka ili drugih okolnosti koje narušuju normalan tok rijeke. Druga stranica izvještaja sa podacima prvog mjerenja prikazana je na slici 4.23.



Discharge Measurement Summary

Site name	Luka
Site number	1
Operator(s)	LiD
File name	20210602-150014_Luka.ft
Comment	

Station Warning Settings	
Station discharge OK	Station discharge < 5,000%
Station discharge caution	5,000% >= Station discharge < 10,000%
Station discharge warning	Station discharge >= 10,000%



Slika 4.23. Druga stranica izvještaja – grafički prikaz rezultata prvog mjerenja 02.06.2021.

Na trećoj stranici izvještaja rezultati mjerenja su prikazani u tabelarnom obliku. Tablica se sastoji od 14 stupaca i onoliko redaka koliko je mjerenja izvršeno. Pojedine stacionaže mogu imati i više mjerenja, ovisno o dubini i metodi mjerenja koju uređaj ponudi. U prvom stupcu nalazi se redni broj mjerne stacionaže, u drugom vrijeme početka svakog mjerenja, a u trećem stupcu nalazi se lokacija mjerne stacionaže, odnosno udaljenost mjerne stacionaže od nulte stacionaže, koja ovisi o rasteru mjerenja. U četvrtom stupcu prikazana je metoda mjerenja. Metoda mjerenja ovisi o dubini vode na pojedinoj stacionaži, koja je prikazana u petom stupcu. U šestom stupcu naznačeno je na kojem postotku dubine je pojedino mjerenje izvršeno. Ovaj podatak bitan je za one stacionaže koje nemaju samo jedno mjerenje, već dva ili tri mjerenja na različitim dubinama, a odnosi se na metodu mjerenja. U sedmom stupcu nalazi se iznos dubine na kojoj je mjerenje izvršeno, povezana sa prethodnim stupcem gdje je naznačen postotak dubine. U preostalim stupcima upisani su rezultati dobiveni mjerenjem, točnije iznosi brzina, površina i protoka za pojedine stacionaže. Na slici 4.24. prikazan je način tabelarnog prikazivanja rezultata mjerenja, pri čemu navedeni podaci pripadaju prvom obavljenom mjerenju.

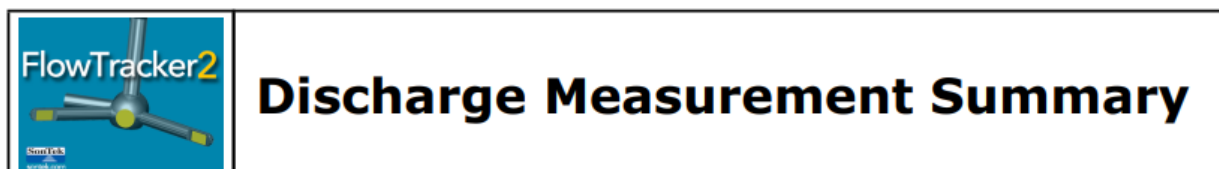


Site name	Luka
Site number	1
Operator(s)	LiD
File name	20210602-150014_Luka.ft
Comment	

St#	Time	Location (m)	Method	Depth (m)	%Depth	Measured Depth (m)	Samples	Velocity (m/s)	Correcti on	Mean Velocity (m/s)	Area (m ²)	Flow (m ³ /s)	%Q
0	14:16	0,000	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,327	0,000	0,000	0,000 ✓
1	14:17	1,000	0,6	0,440	0,600	0,264	80	0,327	1,000	0,327	0,440	0,144	8,027 ✓
2	14:19	2,000	0,2/0,8	0,660	0,200	0,132	80	0,415	1,000	0,358	0,660	0,236	13,161 ✓
2	14:19	2,000	0,2/0,8	0,660	0,800	0,528	80	0,300	1,000	0,358	0,660	0,236	13,161 ✓
3	14:22	3,000	0,2/0,8	0,720	0,200	0,144	80	0,408	1,000	0,352	0,720	0,254	14,131 ✓
3	14:22	3,000	0,2/0,8	0,720	0,800	0,576	80	0,296	1,000	0,352	0,720	0,254	14,131 ✓
4	14:25	4,000	0,2/0,8	0,880	0,200	0,176	80	0,341	1,000	0,252	0,880	0,222	12,347 ✓
4	14:25	4,000	0,2/0,8	0,880	0,800	0,704	80	0,162	1,000	0,252	0,880	0,222	12,347 ✓
5	14:29	5,000	0,2/0,8	0,880	0,200	0,176	80	0,285	1,000	0,275	0,880	0,242	13,487 ✓
5	14:29	5,000	0,2/0,8	0,880	0,800	0,704	80	0,265	1,000	0,275	0,880	0,242	13,487 ✓
6	14:32	6,000	0,2/0,8	0,840	0,200	0,168	80	0,290	1,000	0,244	0,840	0,205	11,402 ✓
6	14:32	6,000	0,2/0,8	0,840	0,800	0,672	80	0,197	1,000	0,244	0,840	0,205	11,402 ✓
7	14:36	7,000	0,2/0,8	0,740	0,200	0,148	80	0,339	1,000	0,261	0,740	0,193	10,775 ✓
7	14:36	7,000	0,2/0,8	0,740	0,800	0,592	80	0,184	1,000	0,261	0,740	0,193	10,775 ✓
8	14:39	8,000	0,2/0,8	0,860	0,200	0,172	80	0,281	1,000	0,235	0,860	0,202	11,278 ✓
8	14:39	8,000	0,2/0,8	0,860	0,800	0,688	80	0,190	1,000	0,235	0,860	0,202	11,278 ✓
9	14:42	9,000	0,2/0,8	0,580	0,200	0,116	80	0,163	1,000	0,142	0,580	0,082	4,577 ✓
9	14:42	9,000	0,2/0,8	0,580	0,800	0,464	80	0,120	1,000	0,142	0,580	0,082	4,577 ✓
10	14:46	10,000	0,6	0,280	0,600	0,168	80	0,061	1,000	0,061	0,238	0,015	0,815 ✓
11	14:48	10,700	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,061	0,000	0,000	0,000 ✓

Slika 4.24. Treća stranica izvještaja – tabelarni prikaz rezultata prvog mjerenja 02.06.2021.

Četvrta stranica izvještaja prikazuje postavke provjere kvalitete i upozorenja koja su se javljala prilikom mjerenja. U ovom slučaju najčešće upozorenja bilo je da stacionaže sadrže veliki dio ukupnog protoka. Slika 4.25. prikazuje izgled četvrte stranice izvještaja za prvo provedeno mjerenje. Na petoj i šestoj stanici izvještaja prikazani su dijagrami automatske provjere *Beam Check*, no oni nam u ovom radu nisu važni jer ne sadrže nikakve važne podatke. Prilikom svakog mjerenja automatska provjera je prošla bez ikakvih upozorenja i to je bio dokaz da su lokacije pogodne za mjerenje.



Site name	Luka
Site number	1
Operator(s)	LiD
File name	20210602-150014_Luka.ft
Comment	

Quality Control Settings	
Maximum depth change	50,000%
Maximum spacing change	100,000%
SNR threshold	10,000 dB
Standard error threshold	0,010 m/s
Spike threshold	10,000%
Maximum velocity angle	20,000 deg
Maximum tilt angle	5,000 deg

Quality control warnings							
St#	Time	Location (m)	Method	Depth (m)	%Depth	Measured Depth (m)	Warnings
2	14:19	2,000	0,2/0,8	0,660	0,200	0,132	High Stn % Discharge
2	14:19	2,000	0,2/0,8	0,660	0,800	0,528	High Stn % Discharge
3	14:22	3,000	0,2/0,8	0,720	0,200	0,144	High Stn % Discharge
3	14:22	3,000	0,2/0,8	0,720	0,800	0,576	High Stn % Discharge
4	14:25	4,000	0,2/0,8	0,880	0,200	0,176	Large SNR Variation,High Stn % Discharge
4	14:25	4,000	0,2/0,8	0,880	0,800	0,704	Large SNR Variation,High Stn % Discharge
5	14:29	5,000	0,2/0,8	0,880	0,200	0,176	Large SNR Variation,High Stn % Discharge
5	14:29	5,000	0,2/0,8	0,880	0,800	0,704	Large SNR Variation,High Stn % Discharge
6	14:32	6,000	0,2/0,8	0,840	0,200	0,168	High Stn % Discharge
6	14:32	6,000	0,2/0,8	0,840	0,800	0,672	High Stn % Discharge
7	14:36	7,000	0,2/0,8	0,740	0,200	0,148	High Stn % Discharge
7	14:36	7,000	0,2/0,8	0,740	0,800	0,592	High Stn % Discharge
8	14:39	8,000	0,2/0,8	0,860	0,200	0,172	High Stn % Discharge
8	14:39	8,000	0,2/0,8	0,860	0,800	0,688	High Stn % Discharge
9	14:42	9,000	0,2/0,8	0,580	0,200	0,116	Velocity Angle > QC
9	14:42	9,000	0,2/0,8	0,580	0,800	0,464	Velocity Angle > QC
10	14:46	10,000	0,6	0,280	0,600	0,168	Boundary Interference
11	14:48	10,700	None	0,000	0,000	0,000	Water Depth > QC

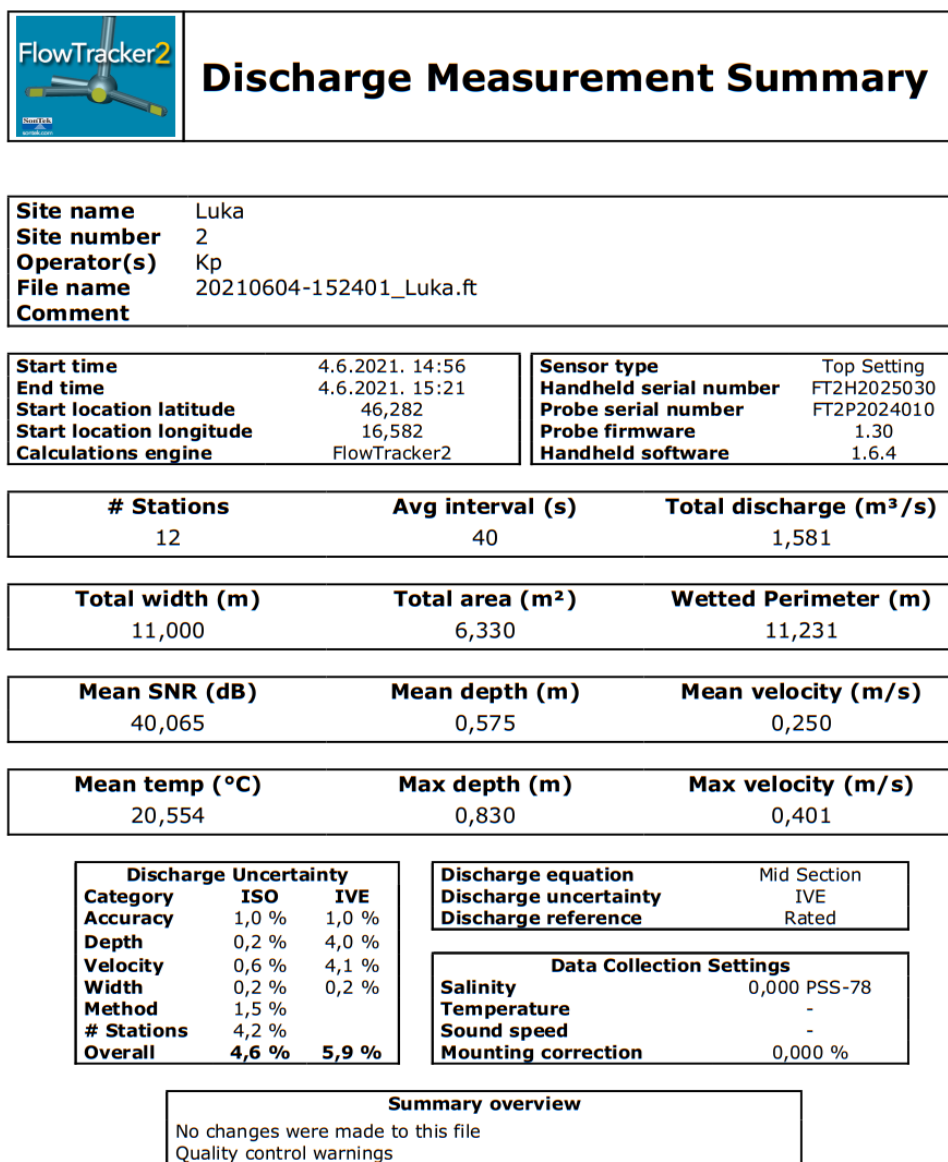
Slika 4.25. Četvrta stranica izvještaja – postavke provjere kvalitete i upozorenja prilikom prvog mjerenja

02.06.2021.

4.3.3.2. Rezultati drugog dana mjerenja 04.06.2021


Drugog dana mjerenje je provedeno na jednaki način kao i prvog dana mjerenja. Okolnosti su bile identične onima iz dva dana ranije pa je istim drvetom izmjerena dubina vode koja je prolazila kroz otvor na području nekadašnje zapornice, a otvor je isti onaj otvor od dva dana ranije pa mu je i širina ista i iznosi 1,10 metara. Dubina vode ovog dana iznosila je 76 centimetara. Uz to je također mjernim instrumentom izvršeno mjerenje stotinjak metara nizvodno od vodenice kako bi se dobio protok.

Rezultati drugog mjerenja, kao i svi ostali rezultati mjerenja, prikazani su na identičan način kao i za prvo mjerenje, ali se razlikuju u samim vrijednostima rezultata. Opće informacije o lokaciji i rezultatima drugog mjerenja obavljenog 04. lipnja 2021. godine prikazane su na slici 4.26. Drugo mjerenje obavljeno na istom mjestu kao prvo, odnosno stotinjak metara nizvodno od vodenice, no rezultati nisu posve jednaki.



Slika 4.26. Opće informacije o lokaciji i rezultatima drugog mjerenja 04.06.2021.

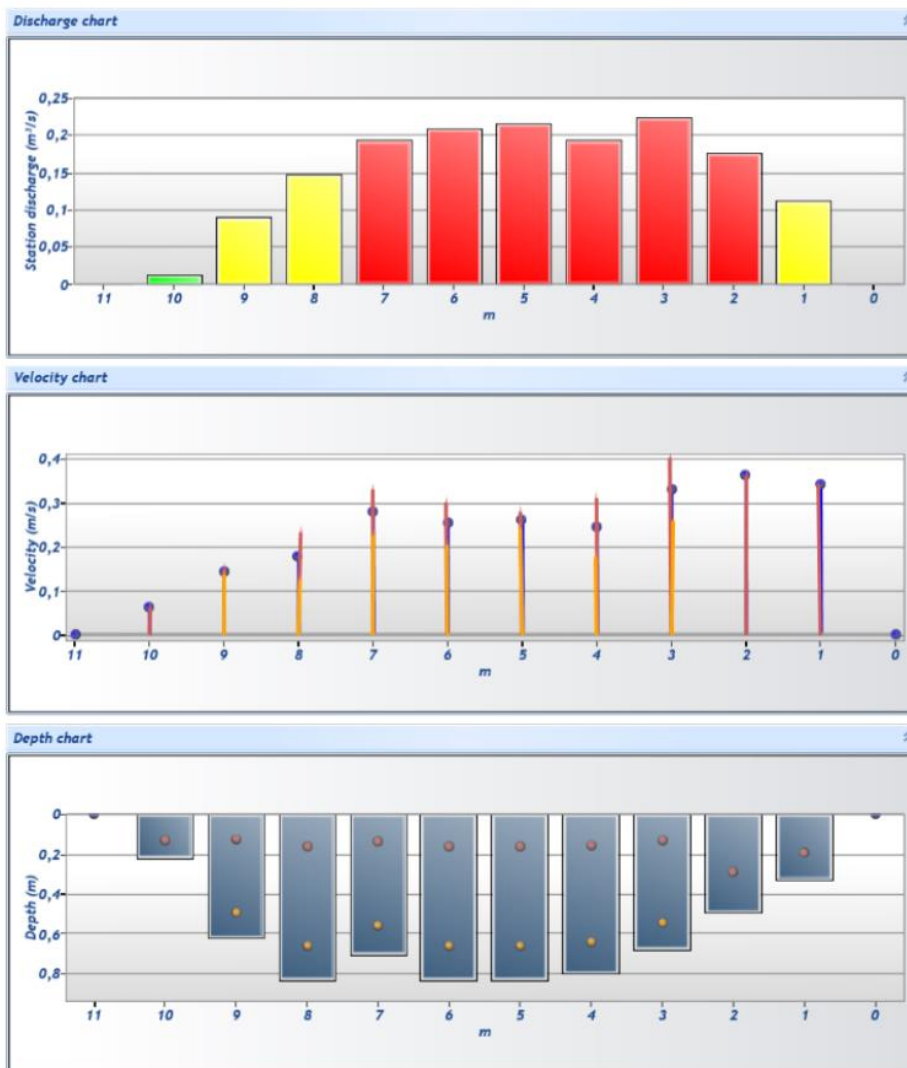
Grafički prikaz rezultata drugog mjerenja prikazan je dijagramima na slici 4.27. Na prvom dijagramu također su prikazane izmjerene vrijednosti protoka po stacionažama, kao i za prvo mjerenje, na drugom dijagramu prikazani su izmjereni iznosi brzina tečenja vode po stacionažama, a treći dijagram prikazuje dubine na svakoj stacionaži.



Discharge Measurement Summary


Site name	Luka
Site number	2
Operator(s)	Kp
File name	20210604-152401_Luka.ft
Comment	

Station Warning Settings	
Station discharge OK	Station discharge < 5,000%
Station discharge caution	5,000% >= Station discharge < 10,000%
Station discharge warning	Station discharge >= 10,000%



Slika 4.27. Grafički prikaz rezultata drugog mjerenja 04.06.2021.

Tabelarni prikaz rezultata drugog mjerenja sličan je kao i kod prikaza rezultata prvog mjerenja, odnosno način prikaza je isti, samo su podaci u tablici drugačiji. I ova tablica ima 14 stupaca, a broj redaka ovisi o broju izvršenih mjerenja. Tabelarni prikaz rezultata drugog mjerenja prikazan je na slici 4.28.



Discharge Measurement Summary

Site name Luka
Site number 2
Operator(s) Kp
File name 20210604-152401_Luka.ft
Comment

Measurement results														
St#	Time	Location (m)	Method	Depth (m)	%Depth	Measured Depth (m)	Samples	Velocity (m/s)	Correction	Mean Velocity (m/s)	Area (m ²)	Flow (m ³ /s)	%Q	
0	14:56	0,000	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,341	0,000	0,000	0,000	✓
1	14:57	1,000	0,6	0,330	0,600	0,198	80	0,341	1,000	0,341	0,330	0,112	7,113	✓
2	14:59	2,000	0,6	0,490	0,600	0,294	80	0,362	1,000	0,362	0,490	0,178	11,232	✓
3	15:01	3,000	0,2/0,8	0,680	0,200	0,136	80	0,401	1,000	0,330	0,680	0,225	14,201	✓
3	15:01	3,000	0,2/0,8	0,680	0,800	0,544	80	0,259	1,000	0,330	0,680	0,225	14,201	✓
4	15:04	4,000	0,2/0,8	0,800	0,200	0,160	80	0,310	1,000	0,243	0,800	0,195	12,303	✓
4	15:04	4,000	0,2/0,8	0,800	0,800	0,640	80	0,176	1,000	0,243	0,800	0,195	12,303	✓
5	15:06	5,000	0,2/0,8	0,830	0,200	0,166	80	0,279	1,000	0,261	0,830	0,216	13,677	✓
5	15:06	5,000	0,2/0,8	0,830	0,800	0,664	80	0,242	1,000	0,261	0,830	0,216	13,677	✓
6	15:09	6,000	0,2/0,8	0,830	0,200	0,166	80	0,300	1,000	0,252	0,830	0,209	13,237	✓
6	15:09	6,000	0,2/0,8	0,830	0,800	0,664	80	0,204	1,000	0,252	0,830	0,209	13,237	✓
7	15:12	7,000	0,2/0,8	0,700	0,200	0,140	80	0,330	1,000	0,278	0,700	0,194	12,292	✓
7	15:12	7,000	0,2/0,8	0,700	0,800	0,560	80	0,225	1,000	0,278	0,700	0,194	12,292	✓
8	15:14	8,000	0,2/0,8	0,830	0,200	0,166	80	0,233	1,000	0,179	0,830	0,149	9,399	✓
8	15:14	8,000	0,2/0,8	0,830	0,800	0,664	80	0,125	1,000	0,179	0,830	0,149	9,399	✓
9	15:17	9,000	0,2/0,8	0,620	0,200	0,124	80	0,151	1,000	0,145	0,620	0,090	5,667	✓
9	15:17	9,000	0,2/0,8	0,620	0,800	0,496	80	0,138	1,000	0,145	0,620	0,090	5,667	✓
10	15:19	10,000	0,6	0,220	0,600	0,132	80	0,063	1,000	0,063	0,220	0,014	0,878	✓
11	15:21	11,000	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,063	0,000	0,000	0,000	✓

Slika 4.28. Tabelarni prikaz rezultata drugog mjerenja 04.06.2021.

Postavke provjere kvalitete i upozorenja koja su se javljala prilikom drugog mjerenja prikazane su na slici 4.29. Jedno od najčešćih upozorenja bila su upozorenja za razne smetnje na dnu korita te da stacionaže sadrže veliki dio ukupnog protoka.



Discharge Measurement Summary

Site name Luka
Site number 2
Operator(s) Kp
File name 20210604-152401_Luka.ft
Comment

Quality Control Settings	
Maximum depth change	50,000%
Maximum spacing change	100,000%
SNR threshold	10,000 dB
Standard error threshold	0,010 m/s
Spike threshold	10,000%
Maximum velocity angle	20,000 deg
Maximum tilt angle	5,000 deg

Quality control warnings							
St#	Time	Location (m)	Method	Depth (m)	%Depth	Measured Depth (m)	Warnings
2	14:59	2,000	0,6	0,490	0,600	0,294	High Stn % Discharge
3	15:01	3,000	0,2/0,8	0,680	0,200	0,136	Large SNR Variation,High Stn % Discharge
3	15:01	3,000	0,2/0,8	0,680	0,800	0,544	Large SNR Variation,High Stn % Discharge
4	15:04	4,000	0,2/0,8	0,800	0,200	0,160	Large SNR Variation,High Stn % Discharge
4	15:04	4,000	0,2/0,8	0,800	0,800	0,640	Large SNR Variation,High Stn % Discharge
5	15:06	5,000	0,2/0,8	0,830	0,200	0,166	High Stn % Discharge
5	15:06	5,000	0,2/0,8	0,830	0,800	0,664	High Stn % Discharge
6	15:09	6,000	0,2/0,8	0,830	0,200	0,166	High Stn % Discharge
6	15:09	6,000	0,2/0,8	0,830	0,800	0,664	High Stn % Discharge
7	15:12	7,000	0,2/0,8	0,700	0,200	0,140	Standard Error > QC,High Stn % Discharge
7	15:12	7,000	0,2/0,8	0,700	0,800	0,560	Standard Error > QC,High Stn % Discharge
10	15:19	10,000	0,6	0,220	0,600	0,132	Large SNR Variation
11	15:21	11,000	None	0,000	0,000	0,000	Water Depth > QC

Slika 4.29. Postavke provjere kvalitete i upozorenja prilikom drugog mjerenja 04.06.2021.

4.3.3.3. Rezultati trećeg dana mjerenja 03.09.2021

Treći dan mjerenja bio je tri mjeseca nakon prva dva mjerenja, točnije 03. rujna 2021. godine. U međuvremenu je područje nekadašnje zapornice očišćeno pa se moglo ući u vodu i napraviti mjerenje mjernim instrumentom. Tog dana provedeno je mjerenje i na lokaciji prvih dvaju mjerenja, stotinjak metara nizvodno od vodenice, no ono u ovom slučaju nije potrebno za proračun.

Rezultati trećeg mjerenja su drugačiji od rezultata prva dva mjerenja jer su i karakteristike lokacije drugačije. Naime, prva dva mjerenja obavljena su u koritu rijeke Plitvice te rezultati imaju karakteristike uobičajenog vodotoka, dok je treće mjerenje izvršeno na mjestu gdje je nekada bila zapornica kojom se regulirala razina vode uzvodno od kola i koje se nalazi u ravnini vodeničkog kola. Taj dio je ravan i betoniran te se u tom području danas nalaze dva željezna stupa između betoniranih zidova. Time se ovo područje dijeli na tri dijela, pri čemu je prilikom ovog mjerenja voda prolazila samo kroz dva otvora, a treći otvor, koji je prilikom prva dva mjerenja bio slobodan i kroz koji je tada voda prolazila, sada je bio zatvoren jer je pregrada, koja je jedini opstali dio nekadašnje zapornice, bila spuštena i sprječavala prolazak vode kroz treći otvor. Rezultati trećeg mjerenja prikazani su u nastavku rada. Prvo su prikazane opće informacije o lokaciji i rezultatima mjerenja na slici 4.30.

Site name	Plit mlim	
Site number	4	
Operator(s)	Helena	
File name	20210903-142716_Plit mlim.ft	
Comment		

Start time	3.9.2021. 14:10	Sensor type	Top Setting
End time	3.9.2021. 14:24	Handheld serial number	FT2H2025030
Start location latitude	46,282	Probe serial number	FT2P2024010
Start location longitude	16,581	Probe firmware	1.30
Calculations engine	FlowTracker2	Handheld software	1.7

# Stations	Avg interval (s)	Total discharge (m³/s)
10	40	0,280

Total width (m)	Total area (m²)	Wetted Perimeter (m)
4,700	0,938	4,700

Mean SNR (dB)	Mean depth (m)	Mean velocity (m/s)
43,187	0,199	0,299

Mean temp (°C)	Max depth (m)	Max velocity (m/s)
18,396	0,200	-1,560


Discharge Uncertainty			Discharge equation		Mean Section
Category	ISO	IVE	Discharge uncertainty	IVE	
Accuracy	1,0 %		Discharge reference	Rated	
Depth	1,8 %				
Velocity	15,1 %				
Width	0,6 %				
Method	8,9 %				
# Stations	5,1 %				
Overall	18,4 %				

Data Collection Settings	
Salinity	0,000 PSS-78
Temperature	-
Sound speed	-
Mounting correction	0,000 %

Summary overview	
No changes were made to this file	
Quality control warnings	

Slika 4.30. Opće informacije o lokaciji i rezultatima trećeg mjerenja 03.09.2021.

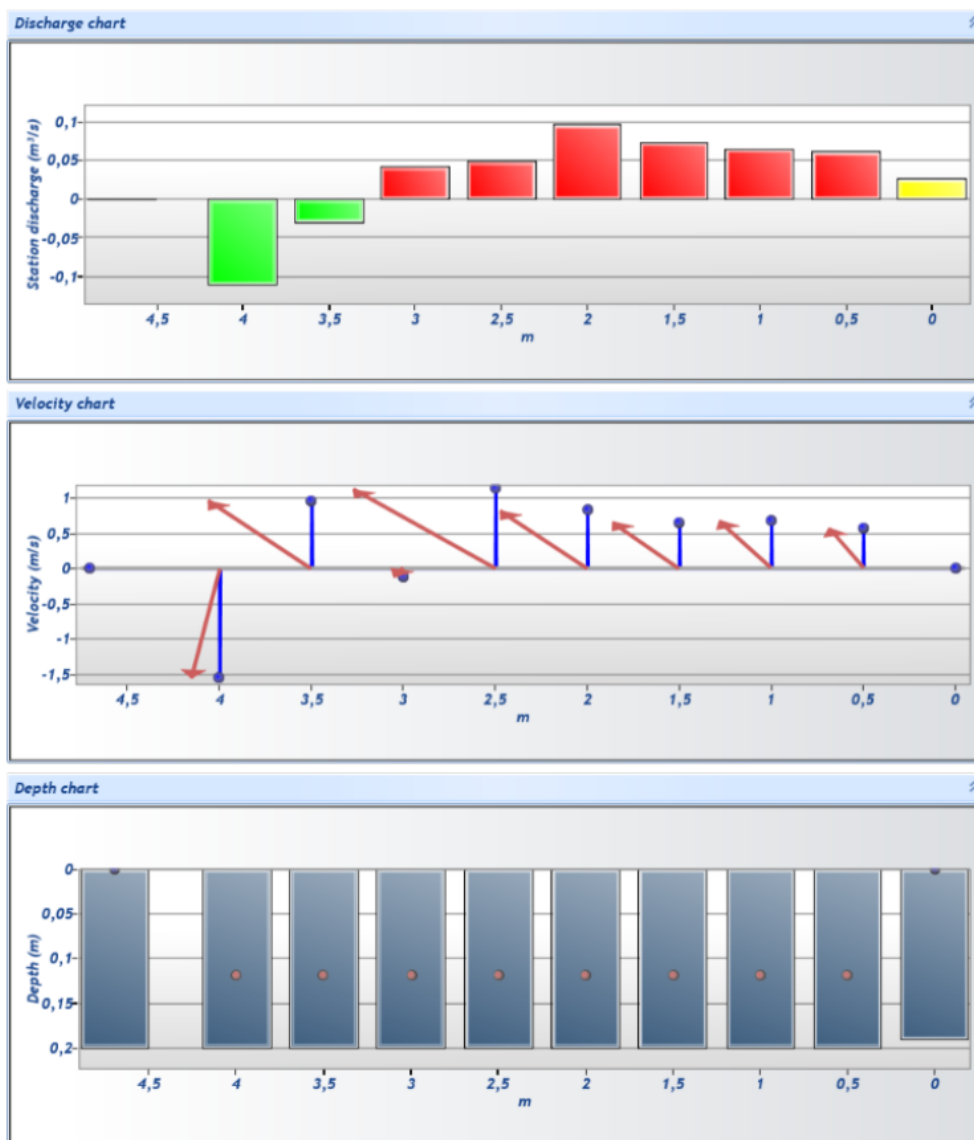
Na slici 4.31. vidljiv je grafički prikaz rezultata trećeg mjerenja predložen dijagramima. Kao i svi prijašnji dijagrami, i ovi prikazuju izmjerene vrijednosti protoka, brzina te dubina na pojedinim stacionažama.



Discharge Measurement Summary


Site name	Plit mlim
Site number	4
Operator(s)	Helena
File name	20210903-142716_Plit mlim.ft
Comment	

Station Warning Settings		
Station discharge OK	Station discharge < 5,000%	■
Station discharge caution	5,000% >= Station discharge < 10,000%	■
Station discharge warning	Station discharge >= 10,000%	■



Slika 4.31. Grafički prikaz rezultata trećeg mjerenja 03.09.2021.

Tabelarni prikaz rezultata trećeg mjerenja prikazan je na slici 4.32. Način prikaza rezultata je jednak kao i u svim do sada navedenim tabelama, samo veličina tabele varira u ovisnosti od količine podataka.




Discharge Measurement Summary

Site name Plit mlim
Site number 4
Operator(s) Helena
File name 20210903-142716_Plit mlim.ft
Comment

Measurement results														
St#	Time	Location (m)	Method	Depth (m)	%Depth	Measured Depth (m)	Samples	Velocity (m/s)	Correction	Mean Velocity (m/s)	Area (m ²)	Flow (m ³ /s)	%Q	
0	14:10	0,000	None	0,190	0,000	0,000	0	0,000		0,285	0,098	0,028	9,898	✓
1	14:12	0,500	0,6	0,200	0,600	0,120	80	0,570	1,000	0,620	0,100	0,062	22,115	✓
2	14:14	1,000	0,6	0,200	0,600	0,120	80	0,671	1,000	0,661	0,100	0,066	23,557	✓
3	14:16	1,500	0,6	0,200	0,600	0,120	80	0,650	1,000	0,735	0,100	0,074	26,221	✓
4	14:17	2,000	0,6	0,200	0,600	0,120	80	0,821	1,000	0,974	0,100	0,097	34,729	✓
5	14:18	2,500	0,6	0,200	0,600	0,120	80	1,128	1,000	0,502	0,100	0,050	17,904	✓
6	14:20	3,000	0,6	0,200	0,600	0,120	80	-0,123	1,000	0,423	0,100	0,042	15,065	✓
7	14:21	3,500	0,6	0,200	0,600	0,120	80	0,968	1,000	-0,296	0,100	-0,030	-10,550	✓
8	14:22	4,000	0,6	0,200	0,600	0,120	80	-1,560	1,000	-0,780	0,140	-0,109	-38,938	✓
9	14:24	4,700	None	0,200	0,000	0,000	0	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	✓

Slika 4.32. Tabelarni prikaz rezultata trećeg mjerenja 03.09.2021.

Za treće mjerenje također su slikom 4.33. prikazane postavke provjere kvalitete i upozorenja koja su se javljala prilikom mjerenja. Upozorenja su najviše upozoravala na turbulentno okruženje te na neravnomjernu raspodjelu protoka duž presjeka.



Discharge Measurement Summary

Site name Plit mlim
Site number 4
Operator(s) Helena
File name 20210903-142716_Plit mlim.ft
Comment

Quality Control Settings	
Maximum depth change	50,000%
Maximum spacing change	100,000%
SNR threshold	10,000 dB
Standard error threshold	0,010 m/s
Spike threshold	10,000%
Maximum velocity angle	20,000 deg
Maximum tilt angle	5,000 deg

Quality control warnings							
St#	Time	Location (m)	Method	Depth (m)	%Depth	Measured Depth (m)	Warnings
1	14:12	0,500	0,6	0,200	0,600	0,120	High Stn % Discharge
2	14:14	1,000	0,6	0,200	0,600	0,120	Standard Error > QC, Velocity Angle > QC, High Stn % Discharge
3	14:16	1,500	0,6	0,200	0,600	0,120	Velocity Angle > QC, High Stn % Discharge
4	14:17	2,000	0,6	0,200	0,600	0,120	Velocity Angle > QC, High Stn % Discharge
5	14:18	2,500	0,6	0,200	0,600	0,120	Velocity Angle > QC, High Stn % Discharge
6	14:20	3,000	0,6	0,200	0,600	0,120	Boundary Interference, Standard Error > QC, Velocity Angle > QC, High Stn % Discharge
7	14:21	3,500	0,6	0,200	0,600	0,120	Standard Error > QC, Velocity Angle > QC
8	14:22	4,000	0,6	0,200	0,600	0,120	Standard Error > QC, Velocity Angle > QC

Slika 4.33. Postavke provjere kvalitete i upozorenja prilikom trećeg mjerenja 03.09.2021.

Kontrolno mjerenje na lokaciji prvih dvaju mjerenja

Kontrolno mjerenje provedeno je na istoj lokaciji kao i prva dva mjerenja, stotinjak metara nizvodno od vodenice, no ovog puta ne kako bi poslužilo za proračun snage turbine, već za usporedbu sa prethodna dva mjerenja provedena na toj lokaciji te sa mjerenjem kod zapornice.

Ovo mjerenje malo se razlikuje od prva dva, a razlika je u tome što je prilikom ovog mjerenja raster mjerenja bio 0,5 metara, a ne 1 metar kao u prva dva mjerenja. Samim time ima više mjernih stacionaža, a dodatna razlika leži u tome što su mjerenja na pojedinim stacionažama vršena na čak tri različite dubine, dok se prilikom prva dva mjerenja mjerenje vršilo samo na jednoj ili dvije dubine, budući da je zbog vegetacije mjerni uređaj javljao da ima promjena dubine. Drugim riječima, mjerni uređaj je nudio opcije mjerenja na više točaka kod jedne stacionaže radi otklanjanja mogućih grešaka, odnosno povećanja preciznosti mjerenja. Zbog svega spomenutoga, ovi rezultati razlikovati će se u količini podataka, biti će prikazano više mjernih stacionaža i više točaka mjerenja, ali će krajnji rezultat u suštini biti jednak. Cjeloviti prikaz općih informacija o lokaciji i rezultatima mjerenja prikazan je na slici 4.34.

Site name	Plit luke		Sensor type	Top Setting	
Site number	3		Handheld serial number	FT2H2025030	
Operator(s)	Helena		Probe serial number	FT2P2024010	
File name	20210903-125228_Plit luke.ft		Probe firmware	1.30	
Comment					
Start time	3.9.2021. 11:40		Handheld software	1.7	
End time	3.9.2021. 12:49				
Start location latitude	46,282				
Start location longitude	16,581				
Calculations engine	FlowTracker2				
# Stations	Avg interval (s)	Total discharge (m³/s)			
19	40	0,552			
Total width (m)	Total area (m²)	Wetted Perimeter (m)			
9,200	4,116	9,417			
Mean SNR (dB)	Mean depth (m)	Mean velocity (m/s)			
30,633	0,447	0,134			
Mean temp (°C)	Max depth (m)	Max velocity (m/s)			
17,298	0,620	0,326			
Discharge Uncertainty			Discharge equation		
Category	ISO	IVE	Mean Section		
Accuracy	1,0 %		IVE		
Depth	0,2 %		Rated		
Velocity	3,1 %				
Width	0,1 %				
Method	1,6 %				
# Stations	2,6 %				
Overall	4,5 %				
Data Collection Settings					
Salinity	0,000 PSS-78				
Temperature	-				
Sound speed	-				
Mounting correction	0,000 %				
Summary overview					
No changes were made to this file					
Quality control warnings					

Slika 4.34. Opće informacije o lokaciji i rezultatima kontrolnog mjerenja 03.09.2021.

Na slici 4.35. prikazana je grafička interpretacija rezultata kontrolnog mjerenja pomoću dijagrama. Ovi dijagrami su nešto detaljniji od prethodnih jer je raster mjerenja bio manji, no to ne čini bitnu razliku u odnosu na prethodne. Oni također prikazuju izmjerene vrijednosti protoka po stacionažama prvim dijagramom, izmjereni iznosi brzina tečenja vode po stacionažama drugim dijagramom te dubine na svakoj stacionaži trećim dijagramom.



Discharge Measurement Summary


Site name	Plit luke
Site number	3
Operator(s)	Helena
File name	20210903-125228_Plit luke.ft
Comment	

Station Warning Settings	
Station discharge OK	Station discharge < 5,000%
Station discharge caution	5,000% >= Station discharge < 10,000%
Station discharge warning	Station discharge >= 10,000%



Slika 4.35. Grafički prikaz rezultata kontrolnog mjerenja 03.09.2021.

Rezultati kontrolnog mjerenja prikazani u tabelarnom obliku vidljivi su na slici 4.36. Treće mjerenje imalo je najviše mjernih stacionaža, ali i najviše mjernih točaka, budući da su mjerenja najčešće vršena na tri različite dubine. Iz tog razloga ova tabela ima i najviše redaka, odnosno podataka.



Discharge Measurement Summary

Site name Plit luke
Site number 3
Operator(s) Helena
File name 20210903-125228_Plit luke.ft
Comment

St#	Time	Location (m)	Method	Depth (m)	%Depth	Measured Depth (m)	Samples	Velocity (m/s)	Correction	Mean Velocity (m/s)	Area (m ²)	Flow (m ³ /s)	%Q	
0	11:40	0,000	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,089	0,040	0,004	0,647	✓
1	11:41	0,500	0,6	0,160	0,600	0,096	80	0,179	1,000	0,234	0,105	0,025	4,443	✓
2	11:51	1,000	0,6	0,260	0,600	0,156	80	0,289	1,000	0,285	0,150	0,043	7,744	✓
3	11:55	1,500	0,6	0,340	0,600	0,204	80	0,281	1,000	0,292	0,185	0,054	9,781	✓
4	11:58	2,000	0,6	0,400	0,600	0,240	80	0,302	1,000	0,244	0,215	0,053	9,512	✓
5	12:00	2,500	0,6	0,460	0,600	0,276	80	0,186	1,000	0,138	0,245	0,034	6,104	✓
6	12:02	3,000	0,6	0,520	0,600	0,312	80	0,089	1,000	0,100	0,273	0,027	4,937	✓
7	12:04	3,500	0,6	0,570	0,600	0,342	80	0,111	1,000	0,134	0,275	0,037	6,689	✓
8	12:07	4,000	0,2/0,6/0,8	0,530	0,200	0,106	80	0,274	1,000	0,204	0,275	0,056	10,152	✓
8	12:07	4,000	0,2/0,6/0,8	0,530	0,600	0,318	80	0,150	1,000	0,204	0,275	0,056	10,152	✓
8	12:07	4,000	0,2/0,6/0,8	0,530	0,800	0,424	80	0,056	1,000	0,204	0,275	0,056	10,152	✓
9	12:13	4,500	0,2/0,8	0,570	0,200	0,114	80	0,311	1,000	0,256	0,290	0,074	13,445	✓
9	12:13	4,500	0,2/0,8	0,570	0,800	0,456	80	0,190	1,000	0,256	0,290	0,074	13,445	✓
10	12:16	5,000	0,2/0,6/0,8	0,590	0,200	0,118	80	0,326	1,000	0,219	0,280	0,061	11,114	✓
10	12:16	5,000	0,2/0,6/0,8	0,590	0,600	0,354	80	0,280	1,000	0,219	0,280	0,061	11,114	✓
10	12:16	5,000	0,2/0,6/0,8	0,590	0,800	0,472	80	0,160	1,000	0,219	0,280	0,061	11,114	✓
11	12:21	5,500	0,2/0,8	0,530	0,200	0,106	80	0,232	1,000	0,105	0,288	0,030	5,449	✓
11	12:21	5,500	0,2/0,8	0,530	0,800	0,424	80	0,121	1,000	0,105	0,288	0,030	5,449	✓
12	12:24	6,000	0,2/0,6/0,8	0,620	0,200	0,124	80	0,059	1,000	0,026	0,288	0,007	1,337	✓
12	12:24	6,000	0,2/0,6/0,8	0,620	0,600	0,372	80	0,036	1,000	0,026	0,288	0,007	1,337	✓
12	12:24	6,000	0,2/0,6/0,8	0,620	0,800	0,496	80	0,000	1,000	0,026	0,288	0,007	1,337	✓
13	12:29	6,500	0,2/0,6/0,8	0,530	0,200	0,106	80	0,043	1,000	0,045	0,273	0,012	2,229	✓
13	12:29	6,500	0,2/0,6/0,8	0,530	0,600	0,318	80	0,016	1,000	0,045	0,273	0,012	2,229	✓
13	12:29	6,500	0,2/0,6/0,8	0,530	0,800	0,424	80	-0,001	1,000	0,045	0,273	0,012	2,229	✓
14	12:33	7,000	0,2/0,6/0,8	0,560	0,200	0,112	80	0,083	1,000	0,054	0,273	0,015	2,688	✓
14	12:33	7,000	0,2/0,6/0,8	0,560	0,600	0,336	80	0,008	1,000	0,054	0,273	0,015	2,688	✓
14	12:33	7,000	0,2/0,6/0,8	0,560	0,800	0,448	80	0,188	1,000	0,054	0,273	0,015	2,688	✓
15	12:39	7,500	0,2/0,6/0,8	0,530	0,200	0,106	80	0,074	1,000	0,022	0,275	0,006	1,106	✓
15	12:39	7,500	0,2/0,6/0,8	0,530	0,600	0,318	80	0,038	1,000	0,022	0,275	0,006	1,106	✓
15	12:39	7,500	0,2/0,6/0,8	0,530	0,800	0,424	80	0,000	1,000	0,022	0,275	0,006	1,106	✓
16	12:43	8,000	0,2/0,6/0,8	0,570	0,200	0,114	80	0,096	1,000	0,039	0,245	0,009	1,713	✓
16	12:43	8,000	0,2/0,6/0,8	0,570	0,600	0,342	80	0,084	1,000	0,039	0,245	0,009	1,713	✓
16	12:43	8,000	0,2/0,6/0,8	0,570	0,800	0,456	80	-0,235	1,000	0,039	0,245	0,009	1,713	✓
17	12:47	8,500	0,6	0,410	0,600	0,246	80	0,070	1,000	0,035	0,144	0,005	0,910	✓
18	12:49	9,200	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	✓

Slika 4.36. Tabelarni prikaz rezultata kontrolnog mjerenja 03.09.2021.

Na slici 4.37. prikazane su postavke provjere kvalitete i upozorenja koja su se javljala prilikom kontrolnog mjerenja. Najčešća upozorenja bila su različita upozorenja za smetnje na dnu korita i nagle promjene uvjeta mjerenja (skretanja toka vode) te nagle promjene dubine.



Site name	Plit luke
Site number	3
Operator(s)	Helena
File name	20210903-125228_Plit luke.ft
Comment	

Quality Control Settings	
Maximum depth change	50,000%
Maximum spacing change	100,000%
SNR threshold	10,000 dB
Standard error threshold	0,010 m/s
Spike threshold	10,000%
Maximum velocity angle	20,000 deg
Maximum tilt angle	5,000 deg

Quality control warnings							
St#	Time	Location (m)	Method	Depth (m)	%Depth	Measured Depth (m)	Warnings
8	12:07	4,000	0,2/0,6/0,8	0,530	0,200	0,106	Boundary Interference, Large SNR Variation, High Stn % Discharge
8	12:07	4,000	0,2/0,6/0,8	0,530	0,600	0,318	Boundary Interference, Large SNR Variation, High Stn % Discharge
8	12:07	4,000	0,2/0,6/0,8	0,530	0,800	0,424	Boundary Interference, Large SNR Variation, High Stn % Discharge
9	12:13	4,500	0,2/0,8	0,570	0,200	0,114	Large SNR Variation, Standard Error > QC, High Stn % Discharge
9	12:13	4,500	0,2/0,8	0,570	0,800	0,456	Large SNR Variation, Standard Error > QC, High Stn % Discharge
10	12:16	5,000	0,2/0,6/0,8	0,590	0,200	0,118	Large SNR Variation, High Stn % Discharge
10	12:16	5,000	0,2/0,6/0,8	0,590	0,600	0,354	Large SNR Variation, High Stn % Discharge
10	12:16	5,000	0,2/0,6/0,8	0,590	0,800	0,472	Large SNR Variation, High Stn % Discharge
12	12:24	6,000	0,2/0,6/0,8	0,620	0,200	0,124	Large SNR Variation, SNR Threshold Variation
12	12:24	6,000	0,2/0,6/0,8	0,620	0,600	0,372	Large SNR Variation, SNR Threshold Variation
12	12:24	6,000	0,2/0,6/0,8	0,620	0,800	0,496	Large SNR Variation, SNR Threshold Variation
13	12:29	6,500	0,2/0,6/0,8	0,530	0,200	0,106	SNR Threshold Variation
13	12:29	6,500	0,2/0,6/0,8	0,530	0,600	0,318	SNR Threshold Variation
13	12:29	6,500	0,2/0,6/0,8	0,530	0,800	0,424	SNR Threshold Variation
14	12:33	7,000	0,2/0,6/0,8	0,560	0,200	0,112	Boundary Interference, Low SNR, SNR Threshold Variation, Standard Error > QC, Velocity Angle > QC
14	12:33	7,000	0,2/0,6/0,8	0,560	0,600	0,336	Boundary Interference, Low SNR, SNR Threshold Variation, Standard Error > QC, Velocity Angle > QC
14	12:33	7,000	0,2/0,6/0,8	0,560	0,800	0,448	Boundary Interference, Low SNR, SNR Threshold Variation, Standard Error > QC, Velocity Angle > QC
15	12:39	7,500	0,2/0,6/0,8	0,530	0,200	0,106	SNR Threshold Variation
15	12:39	7,500	0,2/0,6/0,8	0,530	0,600	0,318	SNR Threshold Variation
15	12:39	7,500	0,2/0,6/0,8	0,530	0,800	0,424	SNR Threshold Variation
16	12:43	8,000	0,2/0,6/0,8	0,570	0,200	0,114	Low SNR, SNR Threshold Variation, Standard Error > QC, Velocity Angle > QC
16	12:43	8,000	0,2/0,6/0,8	0,570	0,600	0,342	Low SNR, SNR Threshold Variation, Standard Error > QC, Velocity Angle > QC
16	12:43	8,000	0,2/0,6/0,8	0,570	0,800	0,456	Low SNR, SNR Threshold Variation, Standard Error > QC, Velocity Angle > QC
18	12:49	9,200	None	0,000	0,000	0,000	Water Depth > QC

Slika 4.37. Postavke provjere kvalitete i upozorenja prilikom kontrolnog mjerenja 03.09.2021.

5. Analiza dobivenih rezultata

Podaci dobiveni terenskim istraživanjem potrebni su za proračun snage turbine u obliku vodenice, čiji smještaj se zamišlja na mjestu nekadašnje zapornice, odnosno u ravnini vodeničkog kola. Mjerenja su obavljena u tri navrata kako bi se dobili što pouzdaniji rezultati. Dva puta mjerenja su obavljena u lipnju ove godine, točnije 02. lipnja i 04. lipnja, te jednom na početku rujna, točnije 03. rujna 2021. godine. Rezultati prvih dvaju mjerenja obradit će se na malo drugačiji način nego rezultati trećeg mjerenja, no o tome detaljnije u nastavku prilikom same obrade rezultata. Proračun snage turbine u obliku vodeničkog kola vršit će se prema formuli (3) iz ovog rada. U radu je navedeno nekoliko složenijih formula kojima bi se dobili precizniji rezultati, ali kod njih je veliki broj uvjeta za koje trenutno ne postoje informacije. Pri tome se podrazumijevaju dimenzije, tip i vrsta turbine, kao i podaci za veće dubine/vodostaje u odnosu na izmjerene. U ovoj fazi istraživanja tek se analizira koliki je potencijal za proizvodnju električne energije iz vodenica, a nakon što se to ispita slijede dimenzioniranja vodeničkog kola i ostalo, a za što bi poslužile ostale formule.

Prema formuli (3):

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p v_1^3 \quad (3)$$

podaci potrebni za proračun snage turbine u obliku vodeničkog kola su gustoća vode ρ , površina poprečnog presjeka A , koeficijent snage C_p te srednja brzina toka v_1 .

Gustoća vode ρ je konstanta, iznosi $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ te je ona jednaki ulazni parametar u svim proračunima.

Koeficijent snage C_p može imati različite vrijednosti, ovisno o vrsti turbine, proizvođaču, uvjetima u kojima se nalazi i slično, a u ovom radu koristi se vrijednost $C_p = 0,30$ prema [11].

Površinu poprečnog presjeka A te srednju brzinu toka v_1 potrebno je izračunati iz dobivenih rezultata mjerenja.

Na temelju izračunate snage vodeničkog kola kao turbine proračunati će se i količina električne energije koja bi se godišnje mogla proizvesti. Količina električne energije iskazuje se u kilovatsatima (kWh), a proračuna se na način da se snaga pomnoži sa vremenom djelovanja (u satima). U konkretnom slučaju, snagu treba pomnožiti sa brojem sati u danu kako bi se dobila dnevna proizvedena količina te sa brojem dana u godini kako bi se dobila količina proizvedene električne energije na godišnjoj razini.

5.1. Prvo mjerenje, 02. lipanj 2021.

Prvo mjerenje nije bilo moguće obaviti instrumentom na mjestu nekadašnje zapornice, pa je izmjerena dubina vode koja je prolazila kroz zadnji otvor na području nekadašnje zapornice i uz to širina samog otvora, te je mjernim instrumentom izvršeno mjerenje stotinjak metara nizvodno od vodenice kako bi se dobio protok. Izmjereno je da širina otvora iznosi 1,10 metara, a dubina vode 79 centimetara. Ukupni protok izmjereno stotinjak metara nizvodno od vodenice iznosi 1,794 m³/s.

Iz širine otvora i dubine vode može se izračunati površina poprečnog presjeka potrebna za proračun snage turbine:

$$A = 1,10 \text{ m} \cdot 0,79 \text{ m} = 0,87 \text{ m}^2 \quad (6)$$

Prema jednadžbi kontinuiteta $Q_v = const.$, protok koji prođe kroz neki poprečni presjek toka u određenom trenutku, u tom istom trenutku prođe i kroz svaki drugi presjek toga istoga toka. Prema tome, protok koji je protekao stotinjak metara nizvodno od vodenice, protekao je i kroz otvor na području nekadašnje zapornice u trenutku mjerenja. Protok na nekom presjeku jednak je umnošku površine tog poprečnog presjeka i srednje brzine toka na tom presjeku. Budući da su protok i površina popr. presjeka poznati, moguće je izračunati srednju brzinu toka koja je također potrebna za proračun snage turbine. Srednja brzina toka izračunava se:

$$v_1 = \frac{Q}{A} = \frac{1,794 \text{ m}^3/\text{s}}{0,87 \text{ m}^2} = 2,062 \text{ m/s} \quad (7)$$

Prema svemu navedenom, snaga turbine u obliku vodenice na zadnjem otvoru na području nekadašnje zapornice iz podataka dobivenih prvog dana mjerenja iznosi:

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,87 \text{ m}^2 \cdot 0,3 \cdot (2,062 \text{ m/s})^3 \quad (8)$$

$$P = 1\,144,13 \text{ W} = 1,14 \text{ kW} \quad (9)$$

Na temelju izračunate snage, količina proizvedene električne energije E tokom jedne godine na zadnjem otvoru na području nekadašnje zapornice iz podataka dobivenih prvog dana mjerenja iznosila bi:

$$E = P \cdot t = 1,14 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} \cdot 365 \text{ dana} = 9.986,40 \text{ kWh/godišnje} \quad (10)$$

5.2. Drugo mjerenje, 04. lipanj 2021.

Drugo mjerenje, kao ni prvo, nije bilo moguće obaviti instrumentom na mjestu nekadašnje zapornice, pa je izmjerena dubina vode koja je prolazila kroz zadnji otvor na području nekadašnje zapornice i uz to širina samog otvora, te je mjernim instrumentom izvršeno mjerenje stotinjak metara nizvodno od vodenice kako bi se dobio protok. U pitanju je isti onaj otvor koji i prvog dana, a njegova širina iznosi 1,10 metara. Drugog dana ponovo je izmjerena dubina vode te je ona tada iznosila 76 centimetara. Ukupni protok izmjeren stotinjak metara nizvodno od vodenice iznosi 1,581 m³/s.

Iz širine otvora i dubine vode može se izračunati površina poprečnog presjeka potrebna za proračun snage turbine:

$$A = 1,10 \text{ m} \cdot 0,76 \text{ m} = 0,84 \text{ m}^2 \quad (11)$$

U ovom slučaju se također mora u obzir uzeti jednadžba kontinuiteta $Q_v = \text{const.}$, prema kojoj protok koji prođe kroz neki poprečni presjek toka u određenom trenutku, u tom istom trenutku prođe i kroz svaki drugi presjek toga istoga toka. Prema tome se, uz pomoć protoka izmjerenog mjernim instrumentom stotinjak metara nizvodno od vodenice i površine popr. presjeka toka na otvoru kod nekadašnje zapornice, može izračunati srednja brzina toka koja je potrebna za proračun snage turbine. Srednja brzina toka iznosi:

$$v_1 = \frac{Q}{A} = \frac{1,581 \text{ m}^3/\text{s}}{0,84 \text{ m}^2} = 1,882 \text{ m/s} \quad (12)$$

Prema svemu navedenom, snaga turbine u obliku vodenice na zadnjem otvoru na području nekadašnje zapornice iz podataka dobivenih drugog dana mjerenja iznosi:

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,84 \text{ m}^2 \cdot 0,3 \cdot (1,882 \text{ m/s})^3 \quad (13)$$

$$P = 839,90 \text{ W} = 0,84 \text{ kW} \quad (14)$$

Na temelju izračunate snage, količina proizvedene električne energije E tokom jedne godine na zadnjem otvoru na području nekadašnje zapornice iz podataka dobivenih drugog dana mjerenja iznosila bi:

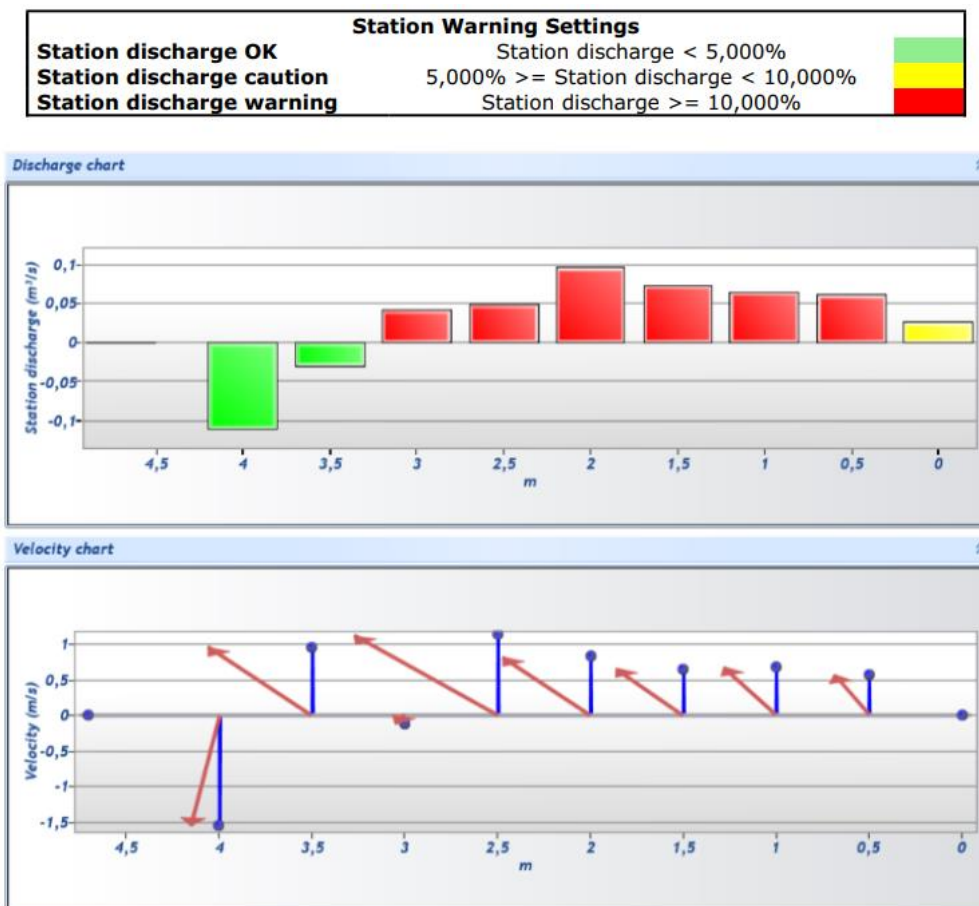
$$E = P \cdot t = 0,84 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} \cdot 365 \text{ dana} = 7.358,40 \text{ kWh/godišnje} \quad (15)$$

5.3. Treće mjerenje, 03. rujan 2021.

Treći puta uspjelo se izvršiti mjerenje s instrumentom na mjestu nekadašnje zapornice jer je navedeno područje očišćeno od naslaga granja i ostalog smeća koje je bilo začepilo veći dio otvora. Na slici 4.18. prikazan je pogled na lokaciju trećeg mjerenja. Na mjestu gdje je nekada bila zapornica, danas se nalaze dva željezna stupa između betoniranih zidova. Time se ovo područje dijeli na tri dijela, pri čemu je prilikom ovog mjerenja voda prolazila samo kroz dva otvora te je samo na tom području mjerenje izvršeno, a treći otvor, koji je prilikom prvih dva mjerenja bio slobodan i kroz koji je tada voda prolazila, sada je bio zatvoren jer je pregrada, koja je jedini opstali dio nekadašnje zapornice, bila spuštена i sprječavala prolazak vode kroz treći otvor. Spomenuti stupovi važni su za ovo mjerenje jer oni predstavljaju smetnju za normalan tok rijeke, zajedno s pregradom, odnosno od njih se tok odbija, vrtloži se i mijenja smjer kretanja, što je vidljivo i po negativnim vrijednostima brzina i protoka u rezultatima mjerenja. Na slici 5.1. prikazana je fotografija stvarne situacije, a na slici 5.2. prikazani su dijagrami iz rezultata mjerenja na kojima se najbolje može uočiti ova anomalija.



Slika 5.1. Poremećaji toka zbog prepreka



Slika 5.2. Dijagrami protoka i brzina iz kojih je vidljiva promjena smjera kretanja toka

Zbog svega spomenutoga, za potrebe proračuna se u obzir ne mogu uzeti svi rezultati dobiveni mjerenjem, nego samo oni pozitivnog iznosa, jer negativni remete ulaz vode. Iz gornjeg dijagrama na slici 5.2., koji prikazuje protoke po stacionažama, vidljivo je da su vrijednosti protoka pozitivne od 0 do 3 metra pa se samo to područje smatra pogodnim za proračun. Prilikom provođenja mjerenja, izmjerena je točna širina tog prvog otvora, ona iznosi 3,10 metara te se s tom vrijednošću ulazi u proračun.

Za proračun snage turbine na prvom otvoru, budući da je prilikom trećeg mjerenja samo on pogodan za postavljanje turbine, potrebno je prvo izračunati ukupni protok koji prođe kroz taj otvor, a zatim srednju brzinu i dubinu na tom otvoru kako bi se izračunala površina poprečnog presjeka. Podaci za ove izračune uzet će se iz tablice na slici 4.21. gdje su brojačno navedeni iznosi izmjerenih parametara.

Ukupni protok na prvom otvoru dobiva se zbrajanjem protoka dobivenih mjerenjem na prvih 7 stacionaža:

$$Q = 0,028 + 0,062 + 0,066 + 0,074 + 0,097 + 0,050 + 0,042 = 0,419 \text{ m}^3/\text{s} \quad (16)$$

Srednja brzina na prvom otvoru dobiva se kao aritmetička sredina brzina izmjerenih na prvih 7 stacionaža:

$$v_1 = \frac{0,000+0,570+0,671+0,650+0,821+1,123+(-0,123)}{7} = 0,53 \text{ m/s} \quad (17)$$

Srednja dubina izračunala bi se na isti način kao i srednja brzina, odnosno kao aritmetička sredina dubina izmjerenih na prvih 7 stacionaža, no budući da je dno ispod toka na ovom području ravno i betonirano, dubina je jednaka po cijeloj širini poprečnog presjeka i iznosi 0,20 m.

Iz širine otvora i dubine vode može se izračunati površina poprečnog presjeka potrebna za proračun snage turbine:

$$A = 3,10 \text{ m} \cdot 0,20 \text{ m} = 0,62 \text{ m}^2 \quad (18)$$

Iz izračunatih podataka može se proračunati snaga turbine u obliku vodenice te ona na prvom otvoru na području nekadašnje zapornice iz podataka dobivenih trećeg dana mjerenja iznosi:

$$P = \frac{1}{2} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,62 \text{ m}^2 \cdot 0,3 \cdot (0,53 \text{ m/s})^3 \quad (19)$$

$$P = 13,84 \text{ W} = 0,014 \text{ kW} \quad (20)$$

Na temelju izračunate snage, količina proizvedene električne energije E tokom jedne godine na prvom otvoru na području nekadašnje zapornice iz podataka dobivenih trećeg dana mjerenja iznosila bi:

$$E = P \cdot t = 0,014 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} \cdot 365 \text{ dana} = 122,64 \text{ kWh/godišnje} \quad (21)$$

5.4. Usporedba dobivenih rezultata

Analizom i obradom rezultata mjerenja proračunate su snage turbine u obliku vodenice na mjestu nekadašnje zapornice za sva tri obavljena mjerenja te su na temelju navedenih proračunatih snaga proračunate i količine električne energije koje bi se proizvele tokom jedne godine. Dobiveni rezultati su snaga od 1.144,13 W za prvo mjerenje, 839,90 W za drugo mjerenje te svega 13,84 W za treće mjerenje, a predviđene godišnje količine električne energije koje bi se proizvele na temelju proračunatih snaga turbina iznose 9.986,40 kWh za prvo mjerenje, 7.358,40 kWh za drugo mjerenje te 122,64 kWh za treće mjerenje. Iz ovih rezultata vidi se da je najpovoljnija situacija bila u vrijeme prvog mjerenja, odnosno 02. lipnja ove godine. Razlog ovakvih rezultata leži u izostanku padalina u razdoblju u kojem su vršena mjerenja. Izostankom padalina pada vodostaj, smanjuje se protok i brzina tečenja toka, a u ljetno doba godine ove promjene su još izraženije zbog većeg isparavanja vode u okoliš (evaporacija) te otjecanja vode kroz tlo (infiltracija) uslijed visokih temperatura zraka i tla. Dokaz toga može se vidjeti i u samim rezultatima mjerenja. Prva dva mjerenja obavljena su u lipnju u razmaku od dva dana i u samo dva dana dubina vode se smanjila za 3 cm, protok se smanjio za nešto više od 0,2 m³/s, dok se srednja brzina smanjila za 0,18 m/s. Protok i srednja brzina u rujnu su i više od tri puta manji od onih u lipnju, gotovo i zanemarive vrijednosti prilikom proračuna snage turbine. Na smanjenje snage turbine najviše utječe smanjenje brzine tečenja toka, budući da njena vrijednost ide na treću potenciju u jednadžbi za proračun snage. Važno je napomenuti da su proračunate snage i količine električne energije najmanje vrijednosti koje se tokom godine mogu očekivati, s obzirom na doba godine kada su mjerenja vršena te opisane uvjete povezane s tim.

Sve navedeno potvrđuje tezu da je Plitvica rijeka pluvijalnog (kišnog) režima, odnosno da njezini protoci i vodostaji ponajviše ovise o intenzitetu i količini oborina na njezinom slivu. Iz hidrograma prikazanih u ovom radu moglo se uočiti da Plitvica može imati i izrazito velike protoke, koji se najčešće javljaju u proljeće i u jesen ili zimi kada ima više oborina. Budući da su mjerenja za potrebe ovog rada vršena u ljetno doba te da je ovogodišnje ljeto bilo iznimno suho, odnosno bez padalina, protoci, vodostaji i brzine toka bili su relativno mali. Za preciznije proračune potrebno je kontinuirano kroz dulje vremensko razdoblje mjeriti protoke, brzine te druge parametre, kako bi se dobio pouzdaniji uvid u stvarno stanje.

Snaga turbine ovisi i o vrsti turbine, proizvođaču i sličnim parametrima. U ovom radu uzeti je i mala vrijednost učinkovitosti turbine, svega 30%, dok neke turbine mogu imati i veću učinkovitost, čime se povećava i snaga turbine. Za preciznije proračune potrebno je uzeti mnogo parametara u obzir, koji u ovom stupnju razrade nisu dostupni. Uzimajući u obzir samo dostupne podatke, može se reći da su okolnosti u lipnju bile pogodnije za korištenje turbine nego u rujnu.

6. Zaključak

U današnje vrijeme sve je veća potražnja za energijom. Budući da se zalihe neobnovljivih izvora energije brzo troše, a njihovo iskorištavanje ujedno i štetno utječe na okoliš, sve se više pažnje predaje obnovljivim izvorima energije i njihovom iskorištavanju. Najznačajniji obnovljivi oblik energije predstavlja hidroenergija, a posljednjih godina raste interes za korištenje energetskeg potencijala malih vodotoka. Energija malih vodotoka iskorištava se od davnina kroz vodenice, no one nakon industrijske revolucije gube na značaju i počinju propadati. U novije vrijeme se ponovno počinje uočavati njihov potencijal u smislu proizvodnje električne energije iz energije vodotoka.

U posljednjim desetljećima na tržište su uvedeni novi hidroenergetski pretvarači za mjesta s malim geodetskim padom, poput Arhimedovih vijaka, gravitacijskih vodnih kola, potočnih vodnih kola te hidrokinetičkih turbina. Ovi su mehanizmi ekološki prihvatljiviji i isplativiji od tipičnih impulsnih i reakcijskih turbina jer je brzina njihove rotacije sporija i ne zahtijevaju cijevi pod tlakom, tako da su rizici vezani uz kretanje riba i problemi sa zaustavljenim i nakupljenim sedimentima, granjem i sličnim predmetima koji mogu doplutati svedeni na minimum. Drugim riječima, njihov utjecaj na okoliš je zanemariv. Vodenice su posebno isplative na mjestima gdje se lokalna proizvodnja i materijali mogu upotrijebiti za njihovu izgradnju. Jednostavne su konstrukcije (potrebno je malo građevinskih radova), s niskim troškovima ugradnje, malim ulaganjima u održavanje te velikom kulturnom i estetskom vrijednošću.

Probleme za turbine u obliku vodeničkog kola mogu predstavljati mali protoci ili vodostaji, kao i male brzine tečenja vode, pri čemu dolazi do sporog okretanja kola i smanjenja učinkovitosti turbine. U takvim slučajevima potrebno je ispred vodenice suziti prostor u svrhu dobivanja veće brzine toka te posljedično i veće snage turbine. Navedeni problemi najčešće se javljaju u ljetno doba godine pa se kao rješenje nudi kombiniranje hidroenergije sa solarnom fotonaponskom energijom, budući da se intenzitet Sunčevog zračenja povećava u periodima malih protoka i obratno. Hidroenergija se može kombinirati i sa nekim drugim izvorima energije, ako za to postoje uvjeti, no najveći naglasak se stavlja na kombinaciju sa obnovljivim izvorima energije.

Dimenzioniranje vodeničkog kola kao turbine za proizvodnju električne energije vrlo je složeni proces te zahtijeva mnogo truda i istraživanja. Za početak je moguće provesti nekoliko hidroloških mjerenja te pomoću preporuka iz literature u grubo procijeniti izlaznu snagu vodeničkog kola kao turbine na nekoj lokaciji te pretpostaviti ima li ta lokacija potencijala za proizvodnju električne energije. No za pouzdaniji uvid u karakteristike i potencijal lokacije potrebno je kontinuirano provoditi hidrološka mjerenja, izvršiti dodatna ispitivanja i mjerenja potrebna za dimenzioniranje

vodeničkog kola, pratiti promjene klime, a s time povezano i promjene količine i raspodjele padalina tokom godine na nekom slivu i slično. Sve ovo novina je u svijetu projektiranja pa još ne postoje nikakva univerzalna rješenja koja bi se mogla uklopiti u svaki vodotok ili se prilagoditi uz neka modificiranja, no poželjno je težiti ka unaprjeđenju ovakvih ideja jer se, osim novih izvora prihoda, kao posredna korist javlja i interes za trajnom zaštitom tradicionalnog narodnog graditeljstva od daljnjeg uništenja. Potpuna implementacija takve tehnologije može dovesti do osnivanja mnogih malih riječnih hidroelektrana, što će zauzvrat stvoriti održivi razvoj, industriju i radna mjesta.

7. Literatura

- [1] Termorad, <https://termorad.hr/obnovljivi-izvori-energije-2/> , pristupljeno 19.07.2021.
- [2] Von Sperlin, E.: Hydropower in Brazil: overview of positive and negative environmental aspects, Energy Procedia Svezak 18, 2012., str. 110-118
- [3] Bašić, H.; Mahmutović, Z.; Pavlin, Ž.: Mogućnosti korištenja vodnog potencijala u Strategiji energetskeg razvitka Republike Hrvatske, Studija, Zagreb, prosinac 1999.
- [4] Enciklopedija, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=69695> , pristupljeno 20.07.2021.
- [5] Kolar-Dimitrijević, M.; Wagner, E.: Vodenice u Hrvatskoj (18. – 20. stoljeće) kao primjer odnosa između ljudi i rijeka/potoka, Economic and Ecohistory: Research Journal for Economic and Environmental History, Vol. 3, br. 1, 2007.
- [6] Miholek, V.: Dravske vodenice i mlinovi potočari đurđevačke Podravine od polovice 18. do polovice 20. stoljeća, Podravina, Vol. 12, br. 24, Koprivnica, 2013., str. 120-140
- [7] Kolar-Dimitrijević, M.; Wagner, E.: Mlinari i vodeničari na području varaždinskog, ludbreškog, koprivničkog i đurđevačkog kotara 1891. godine, Ekonomska i Ekohistorija, Vol. 15, br. 1, 2019., str. 125-138
- [8] Jutarnji list, <https://www.jutarnji.hr/dobrahrana/price/prica-iz-jedninog-preostalog-mlina-u-zagorskoj-bistrici-gdje-se-stvara-samo-brasno-starih-sorti-15073934>, pristupljeno 21.07.2021.
- [9] Quaranta, E.: Stream water wheels as renewable energy supply in flowing water: Theoretical considerations, performance assessment and design recommendations, Energy for Sustainable Development, Vol. 45, kolovoz 2018., str. 96-109
- [10] Quaranta, E.: Investigation and optimization of the performance of gravity water wheels, Doktorska dizertacija, Doktorski studij Inženjerstvo zaštite okoliša, Politecnico di Torino, lipanj 2017.
- [11] Dogančić, D.; Đurin, B.; Kos, Ž.; Kranjčić, N.: Hydro-Energy Suitability of Rivers Regarding Their Hydrological and Hydrogeological Characteristics, Water 2021, 13, 1777.
- [12] Williamson, S. J.; Stark, B.H.; Booker, J. D.: Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis, Renewable Energy, Vol. 61, siječanj 2014., str. 43-50
- [13] Halusek, V.; Šljivac, D.; Jozsa, L.: Exploitation of the hydrokinetic potential of rivers by combining the traditional water wheel and the Darrieus turbine, Tehnički vjesnik, Vol. 19, br. 3, 2012, str. 659-664.
- [14] UseScience, <https://scientificservices.eu/item/direct-reading-acoustic-doppler-current-profiler/1519>, pristupljeno 13.08.2021.

- [15] ResearchGate, https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-a-boat-mounted-acoustic-Doppler-current-profiler-ADCP-measuring_fig1_284587353, pristupljeno 13.08.2021.
- [16] Sarker, A.: Flow measurement around scoured bridge piers using Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 9, br. 4, prosinac 1998., str. 217-227
- [17] Ivetić, D.; Đorđević, J.; Prodanović, D.: Aspekti merenja brzine vode akustičnom dopler anemometrijom, VODOPRIVREDA 0350-0519, Vol. 48, No. 282-284, 2016., str. 181-190
- [18] Velasco, D. W.; Huhta, C. A.: Experimental verification of acoustic Doppler velocimeter (ADV) performance in fine-grained, high sediment concentration fluids, SonTek/YSI Technical Note, travanj 2009.
- [19] SonTek FlowTracker2 User's Manual, siječanj 2019.
- [20] Krajnik, M.; Turk, M.: Ribe rijeke Plitvice, Podravski zbornik, 45, 2019.
- [21] Visit Ludbreg, <https://visitludbreg.hr/>, pristupljeno 03.09.2021.
- [22] DINARSKO GORJE, http://www.dinarskogorje.com/uploads/4/1/3/3/41338573/4124867_orig.jpg, pristupljeno 03.09.2021.
- [23] Forum Pijani Tvor, <https://www.pijanitvor.com/threads/rijeka-plitvica.8813/>, pristupljeno 04.09.2021.
- [24] Prostorni plan Varaždinske županije, Varaždin, svibanj 2000.
- [25] Državni hidrometeorološki zavod, <https://hidro.dhz.hr/>, pristupljeno 04.09.2021.

Popis slika

Slika 2.1. Fotografija vodenice iz Ferdinandovca; primjer dravske vodenice	5
Slika 2.2. Friščićevo mlin u Prigorcu; primjer mlina potočara	6
Slika 3.1. Tri paralelna Arhimedova vijka	9
Slika 3.2. Gravitacijska vodna kola: a) Podljevno vodno kolo, b) Nadljevno vodno kolo	9
Slika 3.3. Vodenica za proizvodnja mehaničke energije	10
Slika 3.4. Vodenica za proizvodnju električne energije	11
Slika 3.5. Vodenica za crpljenje vode u kanalu za navodnjavanje (tzv. pumpa)	11
Slika 3.6. Vodenička kola u: a) subkritičnom plitkom toku, b) superkritičnom plitkom toku, c) dubokom toku i d) postrojenje za hidrostatski tlak s dijagonalnim lopaticama za smanjenje otpora lopatica.....	13
Slika 3.7. Radni dijagram turbina. Vodenička kola i HPM istaknuti su debljim linijama jer se o njima raspravljalo u ovom radu	14
Slika 3.8. Hidrauličko ponašanje vodeničkih kola i teorijski prijenos energije između toka vode i lopatica kola u plitkom subkritičnom toku	17
Slika 3.9. Shematski crtež postrojenja za hidrostatski tlak (HPM). Prikazane su slobodne površine uzvodno i nizvodno	18
Slika 4.1. Mjerenje protoka pomoću ADCP metode	20
Slika 4.2. ADCP uređaj	21
Slika 4.3. Ilustracija mjerenja protoka pomoću ADCP uređaja pričvršćenog za plovilo	21
Slika 4.4. Različite dispozicije ADV sonde; na lijevoj strani je varijanta sa dva prijemnika, a na desnoj sa tri	22
Slika 4.5. 2D sonda korištena prilikom hidroloških mjerenja	23
Slika 4.6. Dijelovi mjernog uređaja FlowTracker2	23
Slika 4.7. Dijelovi instrumenta	24
Slika 4.8. Nosač za montažu – spajanje ručnog uređaja na vrh gornje šipke za podešavanje.....	25
Slika 4.9. Uređaj FlowTracker2 spreman za rad	25
Slika 4.10. Tok rijeke Plitvice	27
Slika 4.11. Slivovi rijeka u Varaždinskoj županiji	28
Slika 4.12. Hidrološke postaje na rijeci Plitvici	29
Slika 4.13. Hidrogram srednjeg dnevnog protoka za razdoblje od 01.01.2003.g. do 31.12.2019.g. na hidrološkoj postaji Vidovićevo mlin.....	30
Slika 4.14. Hidrogram rijeke Plitvice za 2019. godinu	31
Slika 4.15. Lokacija hidroloških mjerenja.....	32

Slika 4.16. Vodenica u Luki Ludbreškoj	32
Slika 4.17. Pogled na lokaciju mjerenja stotinjak metara nizvodno od vodenice	33
Slika 4.18. Lokacija mjerenja kod zapornice	33
Slika 4.19. Postavljanje mjerne trake na mjernoj lokaciji u Luki Ludbreškoj	34
Slika 4.20. Timski rad prilikom mjerenja.....	36
Slika 4.21. Mjerenje dubine vode kod pregrade	37
Slika 4.22. Izgled prve stranice izvještaja s rezultatima mjerenja – opće informacije o lokaciji i rezultatima prvog mjerenja 02.06.2021.	39
Slika 4.23. Druga stranica izvještaja – grafički prikaz rezultata prvog mjerenja 02.06.2021.	40
Slika 4.24. Treća stranica izvještaja – tabelarni prikaz rezultata prvog mjerenja 02.06.2021.	41
Slika 4.25. Četvrta stranica izvještaja – postavke provjere kvalitete i upozorenja prilikom prvog mjerenja 02.06.2021.	42
Slika 4.26. Opće informacije o lokaciji i rezultatima drugog mjerenja 04.06.2021.....	43
Slika 4.27. Grafički prikaz rezultata drugog mjerenja 04.06.2021.....	44
Slika 4.28. Tabelarni prikaz rezultata drugog mjerenja 04.06.2021.....	45
Slika 4.29. Postavke provjere kvalitete i upozorenja prilikom drugog mjerenja 04.06.2021.	46
Slika 4.30. Opće informacije o lokaciji i rezultatima trećeg mjerenja 03.09.2021.	47
Slika 4.31. Grafički prikaz rezultata trećeg mjerenja 03.09.2021.	48
Slika 4.32. Tabelarni prikaz rezultata trećeg mjerenja 03.09.2021.	49
Slika 4.33. Postavke provjere kvalitete i upozorenja prilikom trećeg mjerenja 03.09.2021.	50
Slika 4.34. Opće informacije o lokaciji i rezultatima kontrolnog mjerenja 03.09.2021.	51
Slika 4.35. Grafički prikaz rezultata kontrolnog mjerenja 03.09.2021.	52
Slika 4.36. Tabelarni prikaz rezultata kontrolnog mjerenja 03.09.2021.	53
Slika 4.37. Postavke provjere kvalitete i upozorenja prilikom kontrolnog mjerenja 03.09.2021.	54
Slika 5.1. Poremećaji toka zbog prepreka	58
Slika 5.2. Dijagrami protoka i brzina iz kojih je vidljiva promjena smjera kretanja toka.....	59