

Mogućnost korištenja mlinova na rijekama za proizvodnju električne energije - primjer "Matinog mlina" na rijeci Donjoj Dobri

Blažun, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:695317>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**

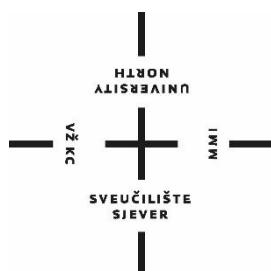


Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN



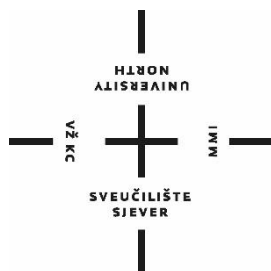
DIPLOMSKI RAD br. 49/GRD/2022

**MOGUĆNOST KORIŠTENJA MLINOVA NA
RIJEKAMA ZA PROIZVODNJU
ELEKTRIČNE ENERGIJE – PRIMJER
„MATINOG MLINA“ NA RIJECI DONJOJ
DOBRI**

Matija Blažun, 1205/336D

Varaždin, ožujak 2022.

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Studij Graditeljstva



DIPLOMSKI RAD br. 49/GRD/2022

**MOGUĆNOST KORIŠTENJA MLINOVA NA
RIJEKAMA ZA PROIZVODNJU
ELEKTRIČNE ENERGIJE – PRIMJER
„MATINOG MLINA“ NA RIJECI DONJOJ
DOBRI**

Student:

Matija Blažun, 1205/336D

Mentor:

Izv.prof.dr.sc. Bojan Đurin

Varaždin, ožujak 2022.

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za graditeljstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Graditeljstvo

PRISTUPNIK Matija Blažun

JMBAG 0160133886

DATUM 21.01.2022.

KOLEGIJ Vodni sustavi

NASLOV RADA
Mogućnost korištenja mlinova na rijekama za proizvodnju električne energije – primjer
"Matinog mlina" na rijeci Donjoj Dobri

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU
Possibility of using mills on the rivers for electric energy production - the example of
"Matin mlin" on the river Donja Dobra

MENTOR dr.sc. Bojan Đurin

ZVANJE Izvanredni profesor

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc.dr.sc. Danko Markovinović
2. doc.dr.sc. Domagoj Nakić
3. izv.prof.dr.sc. Bojan Đurin
4. doc.dr.sc. Željko Kos
- 5.

VŽKC

MMI

Zadatak diplomskog rada

BROJ 49/GRD/2022

OPIS

U diplomskom radu analizira se mogućnost proizvodnje električne energije korištenjem mlinova na rijekama. Na stvarnom primjeru "Matinog mlina" na rijeci Donjoj Dobri, proračunati će se sve potrebne veličine, koje će pokazati stvarni potencijal za korištenje postojećeg vodnog kola u svrhu proizvodnje električne energije.

Predloženi okvirni sadržaj rada po poglavljima je:

Uvod; Princip proizvodnje električne energije na malim hidroelektranama i vodenicama (vodnim kolima); Općenito o rijeci Donjoj Dobri; Određivanje snage hidroelektrane u obliku vodnog kola; Tehnički opis Matinog mlina na Donjoj Dobri u mjestu Jaškovo; Oprema i uređaji za mjerenje; Lokacije mjerenja i opis postupaka mjerenja; Rezultati mjerenja; Proračun snage i količine proizvedene energije hidroelektrane u obliku vodnog kola; Analiza dobivenih rezultata; Zaključak; Literatura.

ZADATAK URUČEN 21.01.2022.



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, Matija Blažun pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom „Mogućnost korištenja mlinova na rijekama za proizvodnju električne energije – primjer „Matinog mlina“ na rijeci Donjoj Dobri“ te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:

Matija Blažun

(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, Matija Blažun neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom „Mogućnost korištenja mlinova na rijekama za proizvodnju električne energije – primjer „Matinog mlina“ na rijeci Donjoj Dobri“ čiji sam autor.

Student:

Matija Blažun

(vlastoručni potpis)

Sažetak:

U ovom diplomskom radu prikazana je mogućnost proizvodnje električne energije pomoću tradicionalnog mlina (vodnog kola) na lokaciji Matinog mlina na rijeci Donjoj Dobri. S porastom svijesti da neobnovljivi izvori energije znatno utječu na okoliš, sve više dolazi do porasta korištenja obnovljivih izvora energije. Isto tako sve je popularnija proizvodnja električne energije pomoću hidroenergije. Kako bi se dokazala mogućnost i potencijal proizvodnje električne energije na mlinici, provedena su terenska istraživanja i mjerenja na lokaciji Matinog mlina na rijeci Donjoj Dobri kod Jaškova, u blizini Karlovca. Mjerenja su uključila određivanje brzine vode i određivanje protoka vode u dovodnom/odvodnom kanalu Matinog mlina. Mjerenja su izvršena pomoću ultrazvučnog mjerača FlowTracker2 i radarskog mjerača SQ-R FlowMeter te mjerača broja okretaja Tachometer. Nakon mjerenja izvršena je analiza dobivenih rezultata te proveden proračun snage turbine i proračun godišnje količine proizvedene električne energije ovisno o količini vode u dovodnom kanalu. Cjelokupni opis uređaja, mjerenja i proračuna prikazani su u radu.

Ključne riječi: Donja Dobra, hidroenergija, mlin, vodno kolo, kanal, protok, brzina vode, proizvodnja električne energije

Summary:

This thesis presents the possibility of producing electricity using a traditional mill (water wheel) on the river Donja Dobra. With the growing awareness that non-renewable energy sources have a significant impact on the environment, there is an increasing of the use of renewable energy sources. Also, the production of electricity using hydropower is becoming increasingly popular. In order to prove the possibility and potential of electricity production at the water mill, field research and measurements were conducted at the location of the Matin mill on the river Donja Dobra in Jaškovo, near Karlovac. The measurements included determination of the water velocity and determining the water flow in the canal of the Matin mill. Measurements were performed using a FlowTracker ultrasonic meter, radar meter SQ-R Flow meter and revolution meter. After the measurement, the analysis of the obtained results was performed, as well as the calculation of the turbine power, together with the annual amount of electricity produced, with regards to the amount of water in the supply channel. The complete descriptions of the devices, measurements and calculations are presented in the paper.

Key words: Donja Dobra, hydroenergy, mill, water wheel, canal, flow, water velocity, production of the electric energy

Popis korištenih kratica

A	površina lopatice
b	širina lopatice
C_p	Betzov limit
E	energija
f	korekcijski faktor
g	ubrzanje polja sile teže
HE	hidroelektrana
K	faktor gubitaka uslijed turbulencije
l	duljina lopatice
P	snaga turbine
P_{in}	ulazna snaga
P_{kin}	kinetička energija
P_T	snaga na vratilu turbine
Q	protok
t	vrijeme rada
v_1	brzina vode
v_2	brzina lopatica
v_m	prosječna tangencijalna brzina lopatice
η	učinkovitost energetske transformacije
ρ	gustoća vode

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Princip proizvodnje električne energije na malim hidroelektranama i vodenicama	4
3. Općenito o rijeci Donjoj Dobri.....	9
3.1. Mjerna postaja Lešće Toplice	10
3.2. Mjerna postaja Stative Donje	13
4. Određivanje snage hidroelektrane u obliku vodnog kola.....	17
5. Tehnički opis Matinog mlina na Donjoj Dobri u mjestu Jaškovo.....	20
5.1. Zaštitne rešetke.....	21
5.2. Zapornica.....	22
5.3. Dovodni kanal	23
5.4. Mlinsko vodno kolo	23
6. Oprema i uređaji za mjerenje	26
6.1. Ultrazvučni mjerač protoka i brzine vode FlowTracker2	26
6.2. Radarski mjerač protoka SQ-R Flow Meter.....	28
6.3. Brojač okretaja Tachometer	31
7. Lokacije mjerenja i opis postupaka mjerenja	32
7.1. Postupak mjerenja pomoću uređaja FlowTracker2	33
7.2. Postupak mjerenja pomoću SQ-R Flow Metra	36
7.3. Postupak mjerenja pomoću brojača okretaja Tachometer.....	39
8. Rezultati mjerenja	40
8.1. Mjerenje br. 1 u dovodnom kanalu	40
8.2. Mjerenje br. 2 u dovodnom kanalu	43
8.3. Mjerenje br. 3 u dovodnom kanalu	46
8.4. Mjerenje br. 4 nizvodno od Matinog mlina.....	49
8.5. Mjerenje br. 5 u dovodnom kanalu pomoću SQ-R Flow Metra.....	54
9. Proračun snage i količine proizvedene energije hidroelektrane u obliku vodnog kola.....	57

9.1. Proračun snage turbine pomoću podataka dobivenih uređajem Flow Tracker2	57
9.2. Proračun snage turbine pomoću podataka dobivenih uređajem SQ-R Flow Metra	58
10. Analiza dobivenih rezultata.....	59
11. Zaključak.....	64
Popis slika	66
Popis tablica	68
Literatura:	69

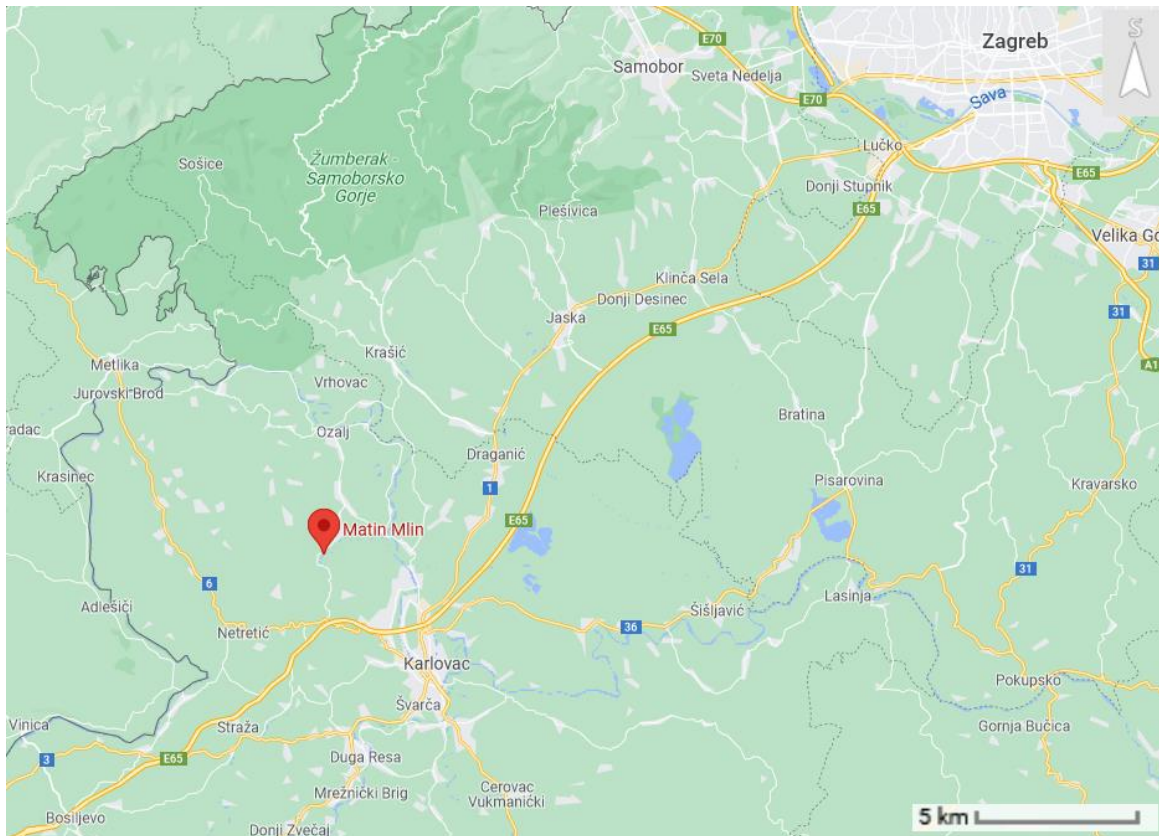
1. Uvod

Energija vode, odnosno hidroenergija predstavlja snagu dobivenu iz energije vode koja se kreće u nekom prirodnom ili umjetnom vodotoku. Republika Hrvatska izradila je energetska Strategiju kao dio ukupne gospodarske strategije. Strategijom je obuhvaćeno razdoblje do 2030. godine i obuhvaća prijašnje i buduće tehnologije. Bez energetske strategije nema ni održivog razvoja, isto tako energetska strategijom uz povećanje energetske efikasnosti krajnji korisnici će dobiti kvalitetniju i efikasniju uslugu [1].

Za razvitak moderne ekonomije i proizvodnju svih dobara potrebna je energija. Korištenjem današnjih resursa, odnosno neobnovljivih izvora energije dolazi do onečišćenja okoliša. Racionalizacija energije ili zamjena neobnovljivih izvora energije s obnovljivim izvorima kao što je to energija vode neće dovesti do smanjenja bruto nacionalnog proizvoda, kao što mnogi misle. Projekti izgradnje hidroenergetskih objekata su veliki, dugotrajni i dugoga vijeka trajanja te oni podržavaju gospodarski i društveni razvoj. Hidroenergetski objekti postaju most tranzicije prema obnovljivim izvorima energije.

Kod izgradnje novih hidroelektrana može se primijetiti porast izgradnje malih (0,5 – 10 MW) i mini (100-500 kW) hidroelektrana. Male i mini hidroelektrane nemaju štetan utjecaj na okoliš za razliku od velikih hidroelektrana čiju štetnost možemo opisati kroz promjene ekosustava, utjecaj na tlo, poplave, utjecaj na floru i faunu.

Danas se sve više pažnje posvećuje proizvodnji energije uz pomoć starih mlinica. U prošlosti mlinice su služile za prerađivanje žitarica i proizvodnju brašna, dok danas uz svoju prvotnu funkciju služe i za proizvodnju električne energije. Takav način proizvodnje električne energije je u potpunosti održiv i nije štetan za okoliš. Ovim radom predstavljena je tehnologija i mogućnost proizvodnje električne energije na konkretnom primjeru Matinog mlina na rijeci Dobri u mjestu Jaškovo u Karlovačkoj županiji (Slike 1-2).



Slika 1. Prikaz lokacije Matinog mlina na rijeci Dobri [2]



Slika 2. Matin mlin [3]

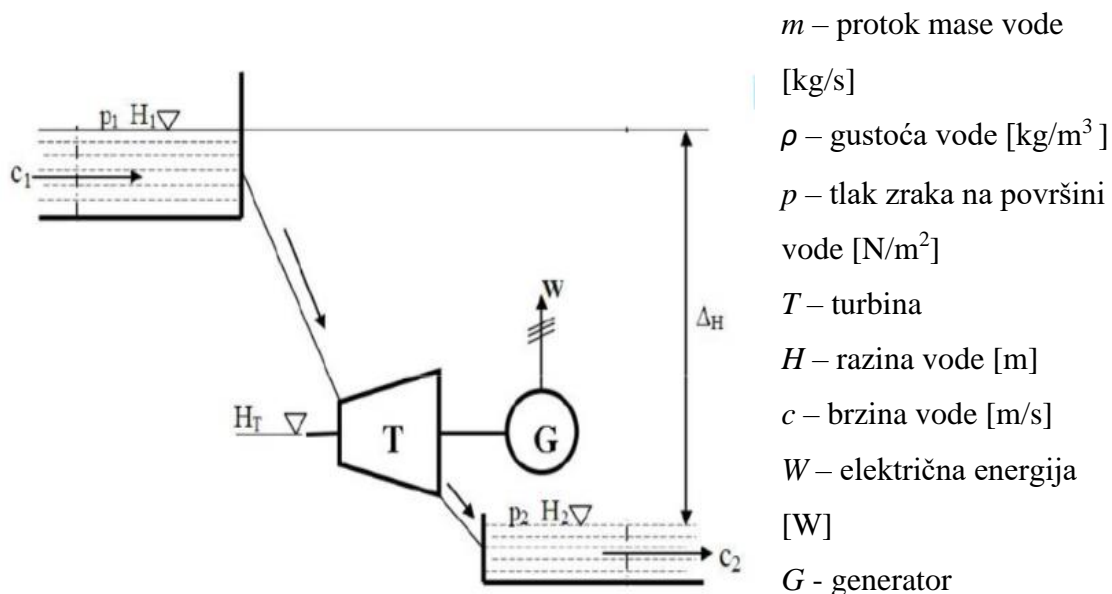
Za potrebe izrade ovog rada, izvršena su terenska mjerenja na promatranjoj lokaciji mlina, kao i na rijeci Donjoj Dobri. Pri tome su korišteni mjerači brzine i protoka vode u dovodnom kanalu mlina i koritu rijeke Donje Dobre, kao i mjerač broja okretaja vodnog kola.

2. Princip proizvodnje električne energije na malim hidroelektranama i vodenicama

Vodenice, odnosno vodna kola predstavljaju jedan od najstarijih oblika proizvodnje čiste energije. Proizvodnja električne energije pomoću starih mlinica predstavlja najnoviji oblik stare tehnologije. Takva tehnologija može koristiti energiju iz potoka, rijeka ili kanala.

Princip proizvodnje električne energije kod vodenica sličan je i proizvodnji električne energije kod klasičnih hidroelektrana. Kao i kod hidroelektrana, potencijalna energija vode koja se kroz dovodne kanale ili cjevovode dovodi do turbine ili u slučaju kod vodenica do mlinskog kola, pretvara se u kinetičku energiju. Kinetička energija vode u pokretu se pomoću rotacije mlinskog kola pretvara u mehaničku energiju, a mehanička energija rotirajućeg mlinskog vodnog kola u generatoru se pretvara u električnu energiju, koja se kasnije koristi za vlastite potrebe, a višak se distribuira u elektroenergetsku mrežu. Prednost ovakvog načina proizvodnje električne energije je da nema potrebe za izgradnjom brana ili akumulacija, već se koristi prirodna struja (kretanje) vode.

Slika 3 prikazuje princip rada hidroelektrane, odnosno protok vode kroz energetski sustav. Sličan princip primjenjuje se i kod proizvodnje električne energije pomoću vodnih kola.



Slika 3. Princip proizvodnje električne energije [4]

Ako se zanemare gubici strujanja, primjenom zakona očuvanja energije za poznati maseni protok vode dobiva se općeniti izraz za energiju, koju masa tekućine ima na ulazu u turbinu [4].

$$E = m \cdot g \cdot \Delta H [J] \quad (1)$$

Maseni protok vode može se izraziti kao produkt volumnog protoka Q [m³/s] i gustoće ρ [kg/m³] te se u konačnici dobije izraz za vodnu snagu mase tekućine na ulazu u turbinu, odnosno za snagu hidroelektrane [4]:

$$P = Q \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta H [W] \quad (2)$$

Raspoloživa snaga na vratilu turbine manja je od snage vode na ulazu u turbinu za iznos gubitaka koji nastaju uslijed strujanja vode kroz samu turbinu. Omjer snage P_T dobivene na vratilu turbine i snage vode P na ulazu u turbinu predstavlja stupanj učinkovitosti energetske transformacije [4][4]:

$$\eta = \frac{P_T}{P} \quad (3)$$

Stupanj učinkovitosti vodenih turbina, koje koriste potencijalnu energiju vode, kreće se u rasponima od 0,75 do 0,95[4].

Prema tome raspoloživa snaga na vratilu turbine iznosi:

$$P_T = Q \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta H \cdot \eta [W] \quad (4)$$

Općenito, kod određivanja snage kinetičkih turbina, odnosno i vodeničkih kola koristiti će se sljedeći izraz [4]:

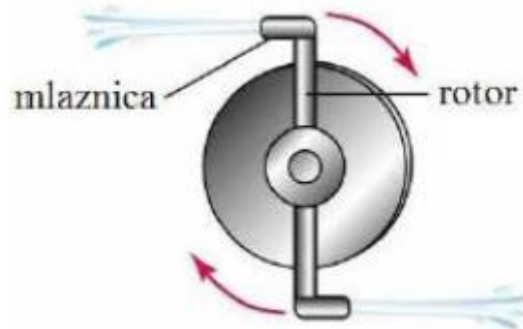
$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p v_1^3 [W] \quad (5)$$

Kod kinetičkih turbina, stupanj učinkovitosti je manji u odnosu na turbine koje koriste potencijalnu energiju vode [4].

Svrha turbine je pretvorba kinetičke energije vode u mehaničku energiju rotirajućih dijelova turbine. Današnje tržište nudi veliki izbor različitih turbina kako bi se pokrio širok raspon uvjeta koji proizlaze iz konfiguracije terena odnosno različitih kombinacija protoka i pada. Na većini lokacija malih hidroelektrana kod kojih protoci variraju odabiru se one turbine koje efikasno rade u širokim granicama protoka, kao što su najčešće korištene Kaplan, Pelton i Turgo turbine. Izbor tipa, oblika i dimenzija turbine ovisi o neto padu, protoku, brzini vrtnje turbine, cijeni same turbine i cijeni ukupne investicije.

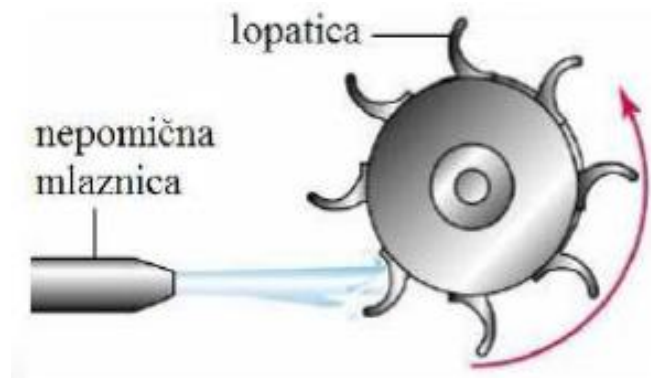
Turbine se mogu podijeliti na reakcijske turbine i akcijske turbine.

Kod reakcijskih turbina snaga proizlazi iz pada tlaka na turbini, reakcijske turbine su potpuno uronjene u vodu, obodna brzina turbine pretvara se u snagu osovine (Slika 4.). U skupinu reakcijskih turbina ubrajaju se: Propelerna, Francisova i Kaplanova turbina [4].



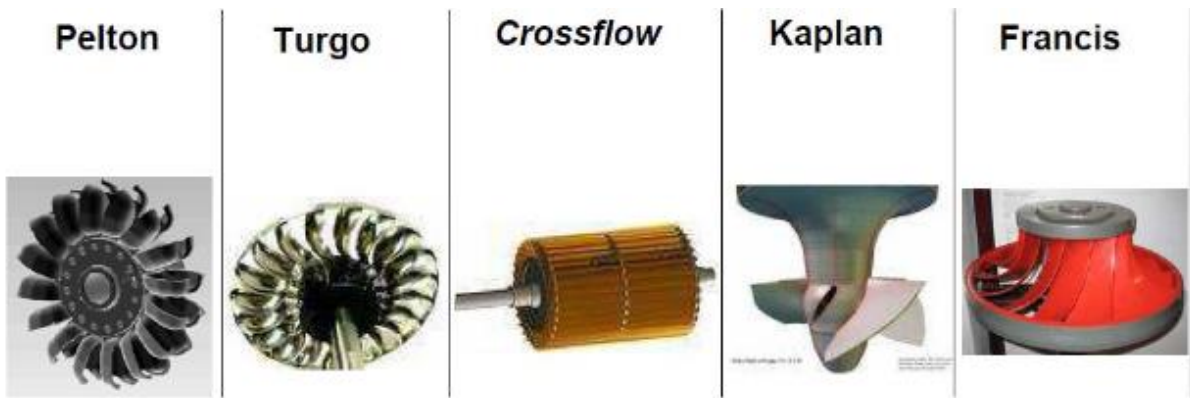
Slika 4. Reakcijska turbina [4]

Akcijske (impulsne) turbine pretvaraju kinetičku energiju vode u električnu energiju na način da voda pokreće lopatice turbine (Slika 5.). Kod akcijskih turbina nema pada tlaka na turbini. U skupinu akcijskih turbina ubrajaju se Peltonove, Turgo i Crossflow turbine [4].



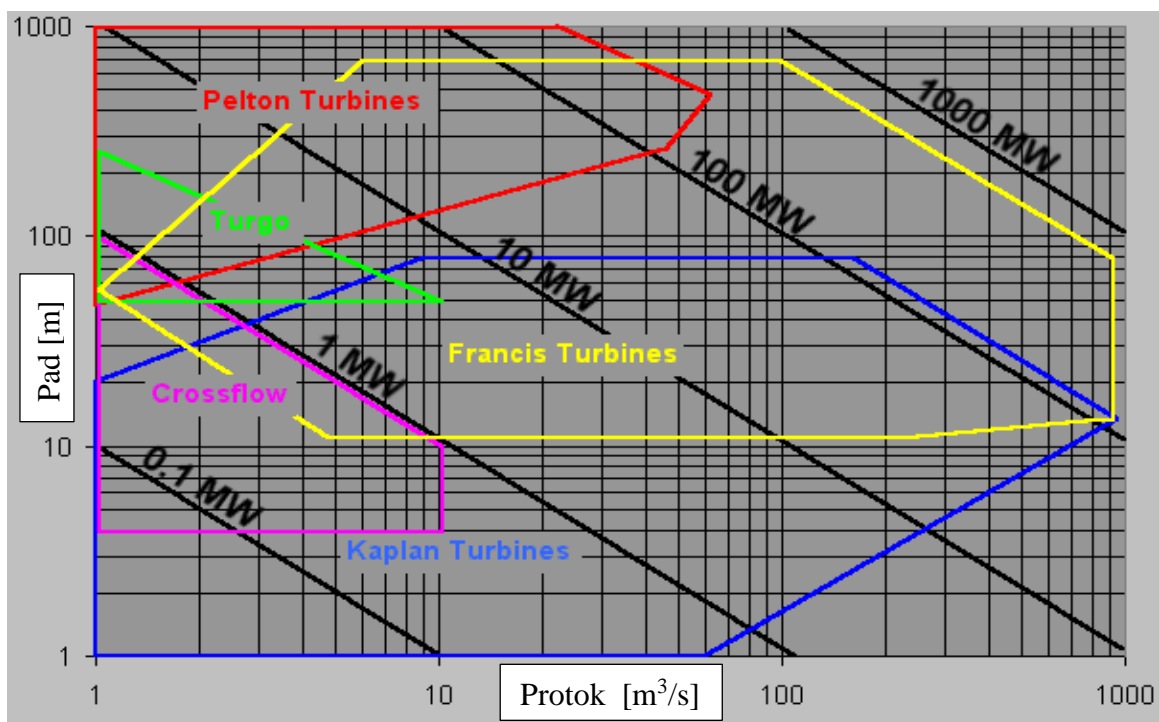
Slika 5. Akcijska turbina [4]

Primjeri reakcijskih i akcijskih turbina vidljivi su na slici 6.



Slika 6. Primjeri akcijskih i reakcijskih turbina [4]

Na slici 7 prikazana su radna područja za različite vrste turbina, u ovisnosti o protoku i neto padu.



Slika 7. Radna područja različitih turbina [4]

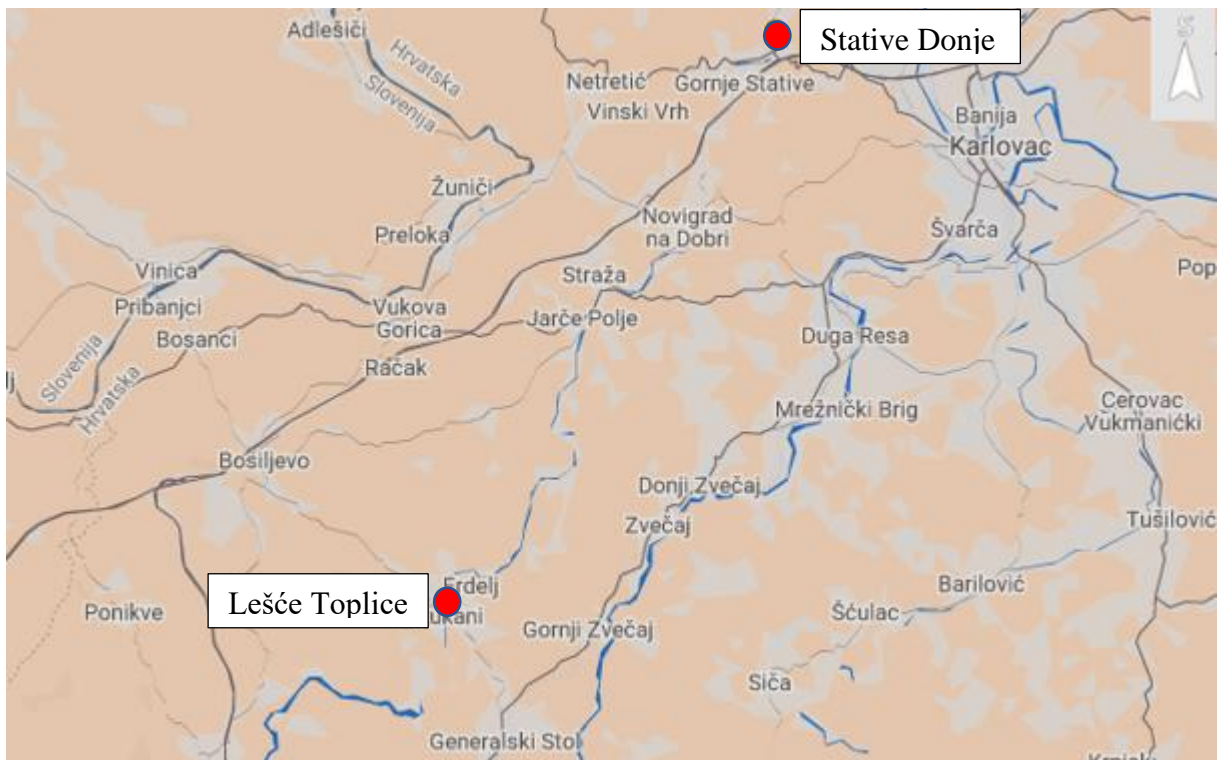
Odabir turbine ovisi o visini pada i o protoku. Kod malih padova najčešće se koriste reakcijske turbine s aksijalnim protokom; Kaplan i Propelerna turbina. Za srednje padove idealan odabir je reakcijska Francis turbina radijalnog protoka s fiksnim lopaticama rotora, dok se za velike padove koristi Pelton akcijska turbina s jednom ili više mlaznica [4].

Sa slike 7 vidljivo je da je Kaplan turbina najpovoljnija s obzirom na mali protok i male padove, što je karakteristika malih turbina, odnosno rijeka s manjim protocima, kao što je rijeka Donja Dobra.

3. Općenito o rijeci Donjoj Dobri

Rijeka Dobra je hrvatska ponornica koja izvire iz dva izvora. Jedan je kod Bukova vrha, a drugi je kod Skrada. Duljina rijeke Dobre iznosi 170.9 km, dok joj je površina 900 km². Ukupno se sastoji od tri dijela toka. Prvi je Gornja Dobra ili Ogulinska Dobra duljine 51.2 km, a obuhvaća područje od izvora pa do Đulinog ponora u Ogulinu. Nakon poniranja rijeka Dobra prolazi kroz špiljski sustav podzemlja Đula – Medvednica, ponovno izvire kod sela Gojak, tzv. Gojačka Dobra, a koristi se za hidroelektranu Gojak. Područje nakon HE Gojak se naziva Donja Dobra. Nakon 52.1 km toka rijeka Dobra uzvodno od Karlovca utječe u Kupu. Uz hidroelektranu Gojak, na rijeci Dobri se nalazi i hidroelektrana Lešće [6].

Na vodotoku Donja Dobra postoje dvije mjerne hidrološke postaje, Lešće Toplice i Stative Donje (Slika 8.).



Slika 8. Lokacije mjernih postaja na vodotoku Donja Dobra [7]

3.1. Mjerna postaja Lešće Toplice

Mjerna postaja Lešće Toplice je automatska mjerna postaja puštena u rad 1946. godine. U tablici 1 prikazani su ekstremi izmjereni tijekom rada postaje, dok je na slici 9 prikazan poprečni presjek korita rijeke Donje Dobre. Zadnje mjerenje poprečnog profila je sa datumom 16.07.2014. godine. Protoci izmjereni tijekom 2020. godine vidljivi su na slici 10.

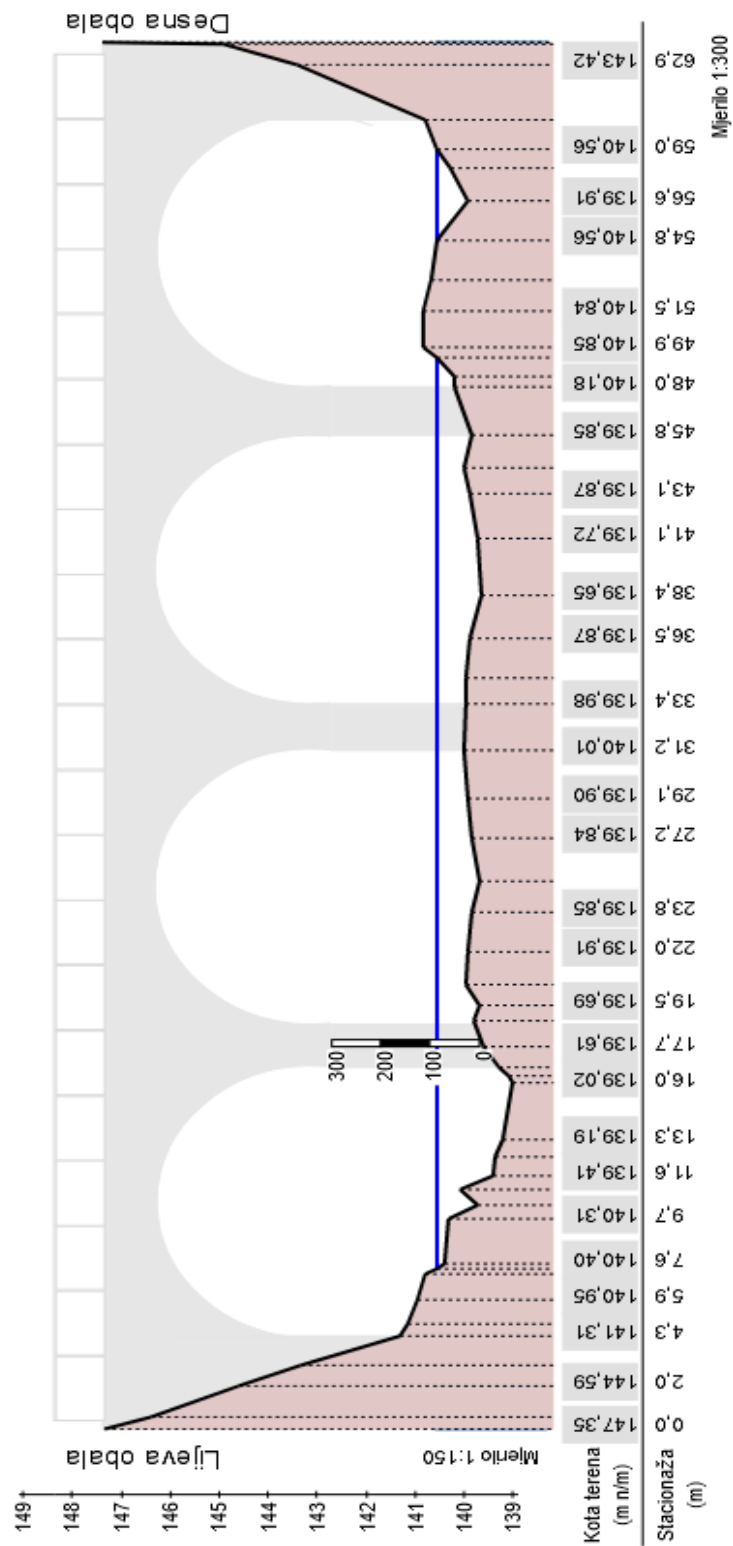
Tablica 1. Prikaz rezultata mjerenja postaje Lešće Toplice [7]

	Razdoblje:	Ekstremi:
Vodostaj	1962. – 2020.	Minimum: 17 cm, datum: 29.06.2009. Maksimum: 276 cm, datum: 12.11.2013.
Protok	1946. – 2020.	Minimum: 0,001 m ³ /s, datum: 16.08.1946. Maksimum: 205,9 m ³ /s, datum: 17.05.1991.
Temperatura	1988. – 1988.	Minimum: 2 °C, datum: 24.11.1988. Maksimum: 21 °C, datum: 25.07.1988.

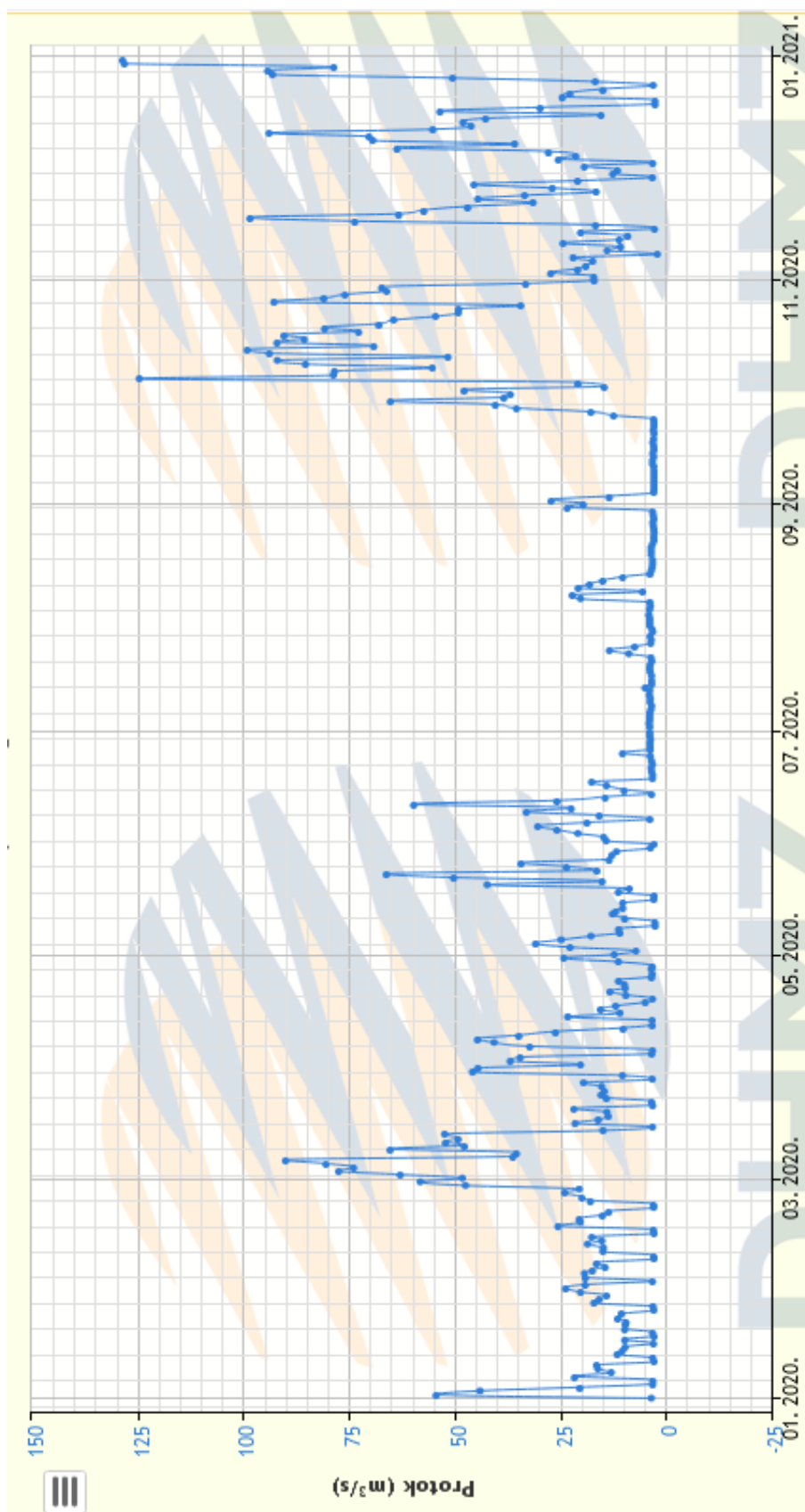
POPREČNI PRESJEK KORITA

Kota nule: 139,694 m n/m
 Vodostaj: 86 cm
 Datum mjerenja: 16. 7. 2014.

Šifra: 4113
 Postaja: LEŠĆE TOPLICE
 Vodotok: DONJA DOBRA



Slika 9. Poprečni presjek rijeke Donje Dobre na mjernoj postaji Lešće Toplice [7]



Slika 10. Protoci rijeke Donje Dobre izmjereni na mjernoj postaji Lešće Toplice [7]

3.2. Mjerna postaja Stative Donje

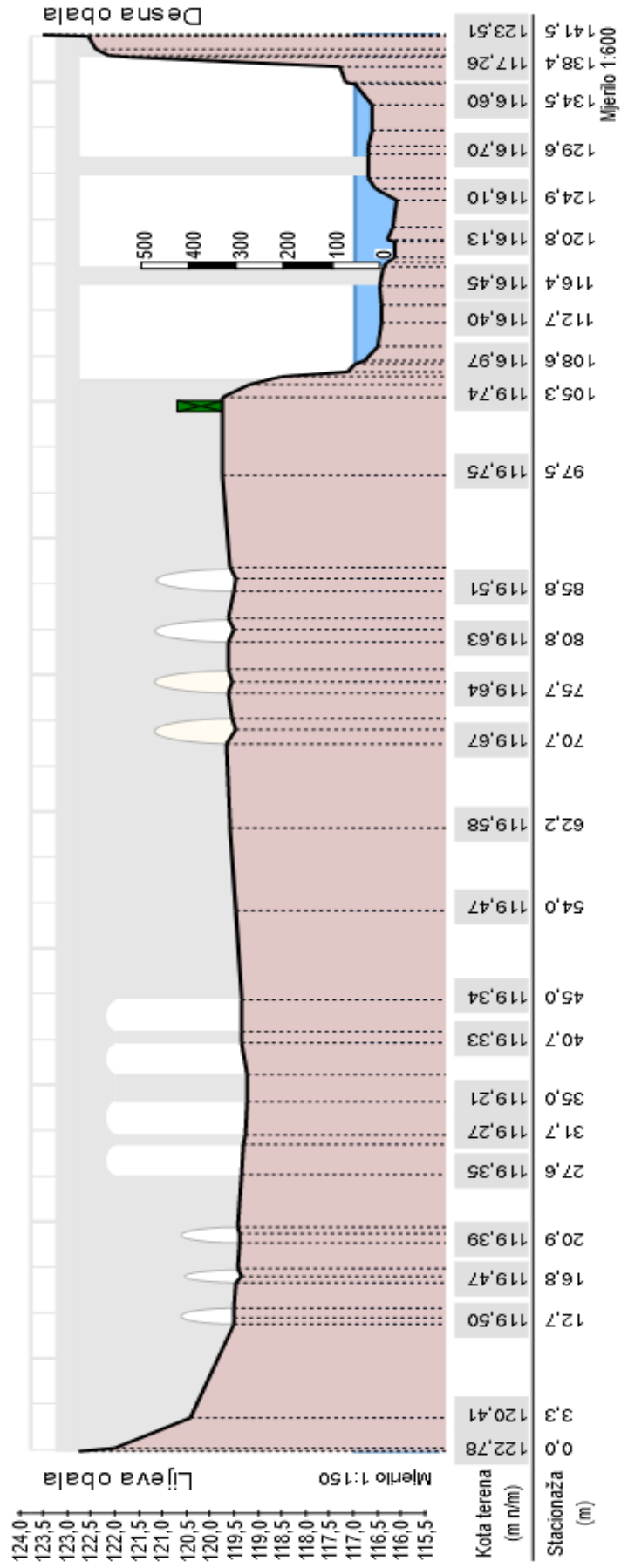
Automatska mjerna postaja Stative Donje puštena u rad 01.05.1939. godine. Isto kao i mjerena postaja Lešće Toplice tijekom godina rada zabilježila je ekstreme kod vodostaja, protoka i temperature što je vidljivo u tablici 2. Poprečni profil rijeke Donje Dobre na mjernoj postaji Stative Donje izmjeren je sa zadnjim datumom od 30.10.2014. godine (Slika 11.). Protoci tijekom 2020. godine prikazani su na slici 12.

Tablica 2. Prikaz rezultata mjerenja postaje Stative Donje [7]

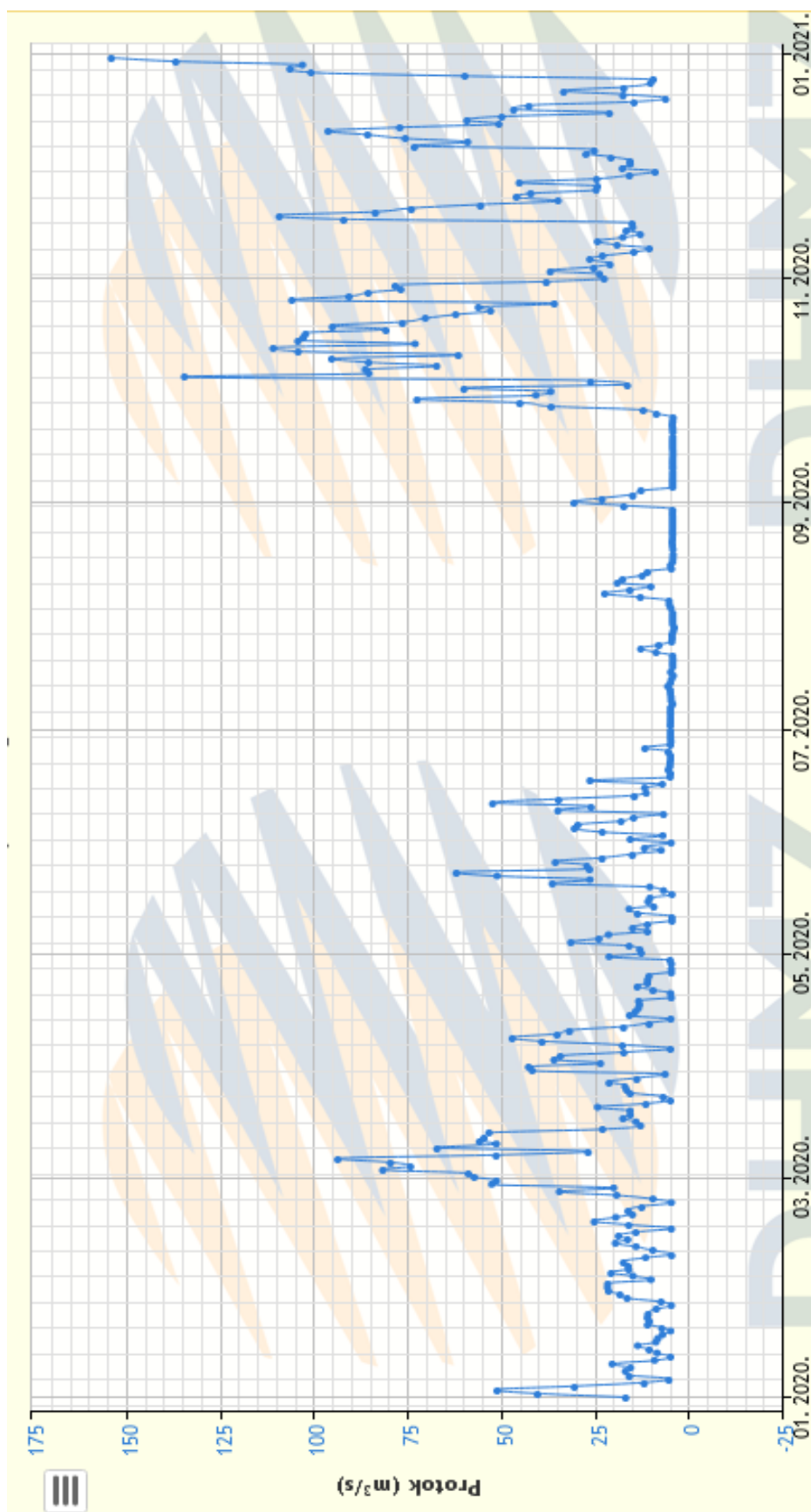
	Razdoblje:	Ekstremi:
Vodostaj	1946. – 2020.	Minimum: 0 cm, datum: 25.10.1947. Maksimum: 460 cm, datum: 29.07.1999.
Protok	1946. – 2020.	Minimum: 0,362 m ³ /s, datum: 25.10.1947. Maksimum: 405,5 m ³ /s, datum: 29.07.1999.
Temperatura	1988. – 1988.	Minimum: 0,0 °C, datum: 04.12.1973. Maksimum: 27,4 °C, datum: 27.06.1983.

Šifra: 4061
 Postaja: STATIVE DONJE
 Vodotok: DONJA DOBRA

Kota nule: 116,456 m n/m
 Vodostaj: 52 cm
 Datum mjerenja: 30. 10. 2014.



Slika 11. Poprečni profil rijeke Donje Dobre na mjernoj postaji Stative Donje [7]



Slika 12. Protoci rijeke Dobre izmjereni na mjernoj postaji Stative Donje [7]

Sa slika 10 i 12 vidljivo je da su najmanji protoci u ljetnom periodu tijekom godine, dok su najveći tijekom jeseni i zime. Uzroci takvih varijabilnosti su oborine i topljenje snijega, kao i krški reljef, za koji su karakteristične pukotine i sustavi kaverni, koji se nalaze u podzemlju. Pri tome se događa da se takvi prostori ispune vodom, prilikom čega dolazi do izlaska vode na površinu, kao i do prihranjivanja rijeke Donje Dobre iz podzemlja. Potrebno je naglasiti i utjecaj hidroelektrana Lešće i Gojak, pri čemu može doći do iznenadne pojave vodnih valova, kao što je prikazano na slici 13.



Slika 13. Tabla s upozorenjem o mogućnosti nailaska vodnog vala iz hidroelektrane Lešće [3]

4. Određivanje snage hidroelektrane u obliku vodnog kola

Najstarija znanstvena istraživanja koja su provedena na protočnim mlinskim vodnim kolima datiraju od 18. stoljeća. S vremenom su se metode dimenzioniranja vodnih kola poboljšale. Znanstveni interes za vodenim mlinskim kolima je tijekom 20. stoljeća bio u padu, iako su se vodna kola i dalje nastavila koristiti tijekom početka dvadeset i prvog stoljeća. Kod istraživanja vodnih kola, većina rada provedena je u svezi istraživanja hidrauličkih svojstava, odnosno istraživanja izlazne snage i optimalne brzine rotacije.

Odabir metoda dimenzioniranja vodnih kola utemeljen je s obzirom na tri promatrana aspekta: 3D geometrijsko modeliranje, analizu korištenjem aplikacija koji uključuju proračunatu dinamiku fluida i na konačnu analizu posmičnih sila uzrokovanu interakcijom s fluidom. Neka istraživanja predlažu sveobuhvatno dimenzioniranje protočnog radnog kola, prilikom čega se uzimaju u obzir i strukturni aspekti, zakretni moment opterećenja, zakretni moment pokretanja, izlazna snaga i učinkovitost, kao i dizajn osovine i ležajeva.

S obzirom na pitanje troškova, vrijeme povrata sredstava procjenjuje se na period od dvije godine za slučaj suvremenih mlinskih kola, odnosno tijekom vremena od četiri do sedam godina za tradicionalno proizvedena mlinska kola [8].

U ovom radu promatra se mlinsko kola za vrijeme plitke vode, odnosno vodostaja kod kojeg je širina lopatice približno jednaka dubini vode, uslijed čega pritisak vode na mlinsko kolo stvara začepljenje na kontaktu lopatice i vode.

Uz osnovne jednadžbe (4) i (5), analizirati će se i ostale jednadžbe za proračun snage vodnog kola, kako bi procijenili izlaznu snagu kod mlinskih kola u plitkoj vodi. U pravilu, sve navedene jednadžbe mogu se koristiti kod svih dubina vode. Kod jednadžbi za proračun izlazne snage turbina u obliku vodnih kola, općenito se podrazumijevaju slijedeće hipoteze, iako nisu uvijek specificirane:

- kretanje vode je jednodimenzionalno, promatrano je i uzeto u obzir stacionarno stanje,
- samo jedna lopatica djeluje s kretanjem vode,
- lopatica je okomita na vektor brzine vode.

Najjednostavniji pokušaj procjene izlazne snage vode P opisan je u [8]. Teorija momenta je primijenjena na brzinu okretanja lopatice v_2 kod neograničenog protoka, pri čemu se zanemaruje hidrostatička sila, koju tvori razlika u visini vode na lopatici:

$$P = \rho A(v_1 - v_2)^2 v_2 \quad (6)$$

gdje je A uronjeno područje lopatice, v_1 ulazna brzina vode i v_2 brzina okretanja lopatica vodnog kola, dok je ρ gustoća vode. Teoretski model prikazuje najveću snagu kada je omjer v_2/v_1 jednak 0.33. Sređivanjem odnosno pojednostavljenjem jednadžbe (6), dobiva se općenita jednadžba za proračun snage turbine koja koristi kinetičku energiju:

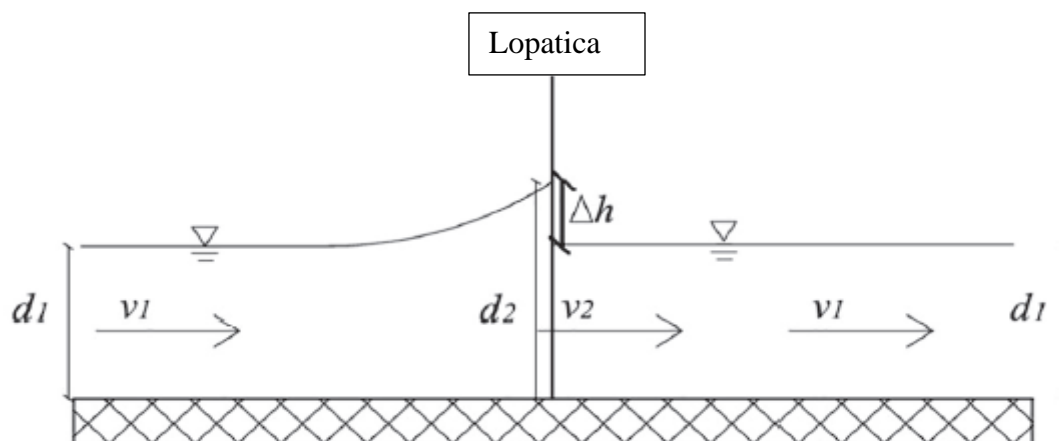
$$P_{kin} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad (7)$$

Uvrštavanjem koeficijenta C_p u jednadžbu (7), koji u stvari izražava učinkovitost turbine, dobije se izraz koji predstavlja izlaznu snagu turbine u obliku vodenice:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p v_1^3 \quad (8)$$

Vrijednost C_p je funkcija ulazne brzine v_1 , odnosno brzine okretanja lopatice v_2 , pri čemu omjer v_2/v_1 , odnosno vrijednost C_p ima veličinu $16/27=0.59$ (Betzov limit), dok je $C_p = 0.296$ maksimalna vrijednost prema teoriji momenata. Kako razlika u visini između ulazne i izlazne razine vode nije uzeta u obzir, jednadžba (8) vrijedi za mlinska kola manjih dimenzija, a ne za mlinska kola ugrađena na kanalima s dubokom vodom. Drugim riječima, kada je v_2 približno ili jednak v_1 , onda vrijedi $C_p=0$, tj. gubici se zanemaruju [8].

Slika 14 prikazuje segment lopatice vodnog kola kod kretanja vode.



Slika 14. Grafički prikaz ponašanja mlinskog kola u plitkom toku [8]

Voda teče prema mlinskom kolu, stoga se gornja razina vode povećava kao posljedica uspora zbog dolaska do lopatice. Sukladno tome povećava se i razlika u visini vode, iako bi u idealnim okolnostima (bez gubitaka) ta razlika bila jednaka nuli. Ukoliko se prethodna promatranja uzmu u obzir, tada je učinkovitost vodnog (mlinskog) kola jednaka:

$$\eta = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d_1}{d_2}\right) \quad (9)$$

gdje je:

- d_1 dubina vode u neporemećenoj konfiguraciji (donja, ulazna, ali i izlazna razina),
- d_2 je dubina vode kod lopatice ($d_1 \leq d_2$).

Učinkovitost procijenjena putem jednadžbe (9) je veća nego ona dobivena eksperimentalnim rezultatima u odnosu na učinkovitost iz jednadžbe (8). Pri tome vrijedi da je $0.6 \leq d_1/d_2 \leq 0.9$. Gubici uslijed turbulencije tečenja vode mogu se procijeniti kao [8]:

$$P = \eta_{th} P_{in} - \gamma Q_l \Delta H - K v_m^3 \quad (10)$$

gdje je:

P_{in} – ulazna snaga, $P_{in} = \rho g Q (d_1 - d_2)$

η_{th} – učinkovitost procijenjena jednadžbom (9)

Q_l – protok, može se procijeniti kao $Q_l = Q (1 - dh/\Delta H)$, pri čemu je dh razlika kinetičkog tlaka, dok je $\Delta H = d_2 - d_1$.

K – faktor gubitaka uslijed turbulencija, $K = 1/2 f \rho b l$, pri čemu je b širina lopatice, l duljina oštrice, dok je f korekcijski faktor (usvaja se 2,5).

v_m – prosječna tangencijalna brzina lopatice.

U ovom diplomskom radu za potrebe izračuna snage turbine koja koristi kinetičku energiju vode, odnosno vodnog kola koristiti će se jednadžba (8). Za učinkovitost kinetičke turbine, odnosno vrijednost koeficijenta snage usvaja se $C_p = 0,30$, tj. 30 % [8].

Količina proizvedene električne energije E [kWh] dobije se preko:

$$E = P \cdot t \quad (11)$$

gdje je t vrijeme rada hidroelektrane.

5. Tehnički opis Matinog mlina na Donjoj Dobri u mjestu Jaškovo

Matin mlin nalazi se u mjestu Jaškovo u Karlovačkoj županiji na rijeci Donjoj Dobri (Slika 15.).



Slika 15. Satelitski snimak Matinog mlina na rijeci Donjoj Dobri [3]

Matin mlin je u privatnom vlasništvu i jedan je od sačuvanijih mlinova te veličine u Hrvatskoj. Na samoj lokaciji kod Matinog mlina rijeka Donja Dobra pregrađena je pomoću slapa koji omogućuje skretanje vode prema mlinu. Mlinsko vodeno kolo i žrvanj sa prijenosnim mehanizmom povezani su drvenom gredom kvadratnog poprečnog presjeka dimenzija 0,5 m x 0,5 m, koja služi kao vratilo.

5.1. Zaštitne rešetke

Za vrijeme rada mlina, otvaraju se zapornice na početku dovodnog kanala i voda se pušta u kanal u kojemu se nalazi mlinsko kolo. Kako bi se osigurao siguran pristup i kupanje za vrijeme ljetnih mjeseci te kako ne bi došlo do štetnog utjecaj na ribe ili druge vodene životinje koje bi mogle doći u doticaj sa vodnim kolom tijekom rada mlina, ispred dovodnog kanala postavljene su zaštitne rešetke koje sprečavaju prolaz ribama, ali i drugim stranim predmetima koji bi mogli oštetiti mlinsko kolo (Slika 16.).



Slika 16. Zaštitne ulazne rešetke [3]

5.2. Zapornica

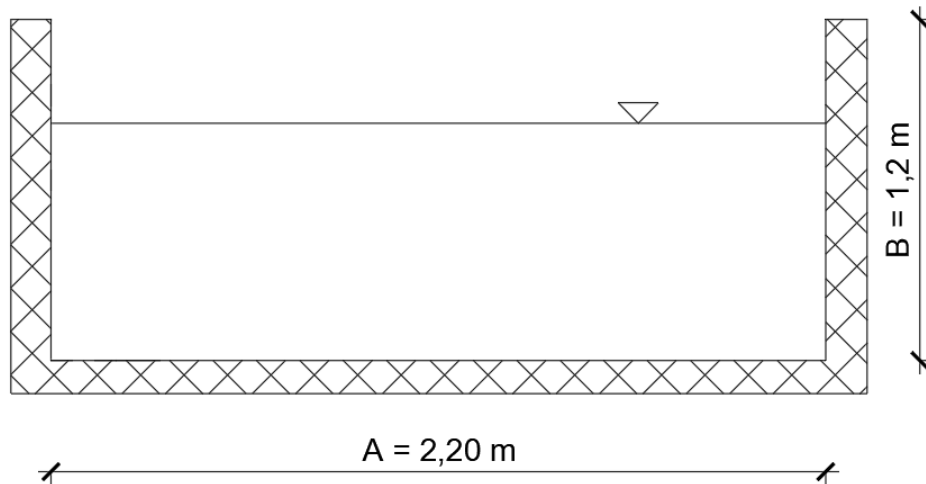
Zapornica se nalazi iza zaštitnih rešetki na početku dovodnog kanala i služi za puštanje vode u dovodni kanal (Slika 17.). Količina vode koja ulazi u dovodni kanal ovisi o visini podignute zapornice, što će se vidjeti u sljedećim poglavljima. U konkretnom slučaju, kod Matinog mlina zapornica se podiže ručno, dok se kod modernijih postrojenja zapornica podiže hidraulički.



Slika 17. Zapornica [3]

5.3. Dovodni kanal

Dovodnim kanalom, ukupne duljine 12.6 m, voda se transportira od ulaza (postojećih zapornica) do mlinskog vodnog kola. Također, isti kanal služi i za izlaz vode poslije vodnog kola. Dovodni kanal je pravokutnog poprečnog presjeka (Slika 18.).



Slika 18. Poprečni presjek dovodnog kanala [3]

5.4. Mlinsko vodno kolo

Mlinsko kolo na predmetnoj lokaciji služi za pokretanje mlinskih kamena za proizvodnju brašna od žitarica. Mlinsko kolo izrađeno je od hrastovog drveta s 28 lopatica i fiksirano je na drvenu gredu poprečnog presjeka 0,5 metara x 0,5 metara, koja služi kao vratilo i prenosi silu na mehanizam unutar mlina, koji pokreće kameni žrvanj (Slike 19.- 21.). Promjer mlinskog kola iznosi 4,5 metara, dimenzije lopatica su 1,60 m x 0,5 m, pri čemu je njihova površina jednaka 0,8 m². Uronjenost lopatica, odnosno ulazna površina ovisi o visini podignute zapornice, kao i o ulaznom protoku.



Slika 19. Pogled na mlinsko kolo [3]

Vratilo mlinskog kola fiksirano je s metalnim ležajevima na metalno postolje, koje je temeljeno na kamenoj osnovi, povezanomj betonom.



Slika 20. Pogled na lopatice mlinskog kola [3]



Slika 21. Mehanizam prijenosa sile s mlinskog kola na kameni žrvanj [3]

6. Oprema i uređaji za mjerenje

Kako bi se izvršila mjerenja brzine vode i protoka te svih ostalih veličina potrebnih za proračun snage turbine, kao i za potpuni opis rada vodnog kola, korišteni su posebni mjerni uređaji za navedene namjene. To su ultrazvučni mjerač protoka i brzine vode FlowTracker2, radarski mjerač protoka SQ-R Flow Meter i mjerač broja okretaja Tachometer.

6.1. Ultrazvučni mjerač protoka i brzine vode FlowTracker2

FlowTracker2 je 2D ultrazvučni mjerni uređaj koji koristi tehnologiju na principu Dopplerovog (ADV) efekta. Služi za mjerenje brzine, odnosno vode u rijekama, potocima ili kanalima koji nisu duboki, tj. u koje mjeritelj može ulaziti bez opasnosti. Uređaj se sastoji od više komponenti, koje zajedno montirane čine jednu cjelinu. Dijelovi mjernog uređaja prikazani su na slici 22.



Slika 22. FlowTracker2 [3]

Dijelovi ultrazvučnog mjerača FlowTracker2 su:

1. Ručni uređaj,
2. Baterije,
3. Kabel sonde,
4. Sonda,
5. Postolje[10].

Postupak mjerenja sastoji se od sljedećih koraka:

1. Potrebno je prikupiti i provjeriti podatke o mjernom mjestu prije samog mjerenja zbog sigurnosnih razloga. Tu se podrazumijevaju informacije o promjeni dubine, strujanja vode, naglih promjena vodostaja i sl. . . .
2. Potrebno je odabrati mjesto mjerenja s obzirom da se uvjeti mjesta i protoka s vremenom mijenjaju. Po mogućnosti, treba izbjegavati zavoje u vodotoku, brzake i slična mjesta gdje dolazi do promjena karakteristika tečenja,
3. Kada se odabiru nova mjerna mjesta, preporučuje se da korisnik izvrši provjere na licu mjesta preko već postojećih/izmjerenih mjernih profila na određenim mjestima, kako bi se dobila procjena raspona brzina i dubine vode te geometrije kanala/korita. Sondu je potrebno držati podalje od biljaka, kamenja, mulja i ostalih prepreka u vodotoku, koje bi mogle značajno utjecati na mjerenja brzine, odnosno protoka,
4. Potrebno je razvući mjernu traku preko presjeka na kojem će mjerenje biti izvršeno,
5. Dubina vode mjeri se na svakoj vertikali/poprečnoj stacionaži,
6. Vremenski interval mjerenja traje 40 sekundi za svako pojedino mjerenje brzine.



Slika 23. Instrument FlowTracker2 u radu [3]

6.2. Radarski mjerač protoka SQ-R Flow Meter

Radarski mjerač protoka SQ-R Flow Meter kontinuirano i beskontaktno mjeri brzinu i protok vode na rijekama, kanalima, djelomično ispunjenim cijevima te kanalima u raznim industrijama i u vodoopskrbi. Radarski mjerač protoka SQ-R nije u kontaktu s vodom i stoga se može koristiti i na lokacijama u koje mjeritelj ne može sigurno ući. Također, uređaj se može koristiti i na lokacijama u kojima su velike količine krutih tvari u vodi (ulazni i izlazni kanali kod uređaji za pročišćavanje otpadnih voda) te kod agresivnih tekućina. Uređaj je prilagodljiv raznovrsnim mogućnostima jednostavne montaže, što se može vidjeti na slikama 24 i 25.



Slika 24. Mjerenje pomoću uređaja SQ-R Flow Meter na uređaju za pročišćavanje otpadnih voda [11]

Karakteristike uređaja SQ-R Flow Meter su:

1. Beskontaktno mjerenje,
2. Kontinuirani proračun/prikaz protoka,
3. Jednostavna montaža,
4. Vodootporno kućište,
5. Kućište otporno u agresivnim okruženjima,
6. Raspon mjerenja od nekoliko litara do nekoliko kubičnih metara u sekundi,
7. Pouzdanost izmjerenih podataka unatoč velikom sadržaju krutih tvari,
8. Jednostavna analiza/obrada dobivenih podataka [11].



Slika 25. Prikaz montaže i mjerenja sa SQ-R Flow Meter [3]

6.3. Brojač okretaja Tachometer

Kako bi odredili broj okretaja mlinskog kola u minuti, korišten je mjerac broja okretaja tvrtke Testo (Slika 26.). Broj okretaja može se mjeriti optički na način da se na rotirajući dio zalijepi reflektirajući marker te se infracrvena zraka usmjeri prema markeru. Isto tako, broj okretaja može se mjeriti mehanički pomoću adaptera koji se naslanja na rotirajući dio.



Slika 26. Testo 470 Tachometer [12]

Karakteristike uređaja Testo 470 Tachometer su jednostavno rukovanje jednom rukom te pohranjivanje minimalne, maksimalne i srednje vrijednosti broja okretaja. Za potrebe ovog rada broj okretaja mlinskog kola mjeren je pomoću optičke metode.

7. Lokacije mjerenja i opis postupaka mjerenja

Na rijeci Dobri izvršeno je pet mjerenja brzine i protoka rijeke na dvije lokacije (Slika 27.).



Slika 27. Satelitski prikaz lokacija mjerenja [2]

Mjerenja su izvršena dana 07.09.2021., 08.09.2021. i 16.11.2021. Četiri mjerenja obavljena su u dovodnom kanalu Matinog mlina, dok je peto mjerenje obavljeno na profilu rijeke Dobre nizvodno od Matinog mlina. Drugim riječima, svrha tog mjerenja bila je usporedba između protoka koji ulazi u dovodni kanal Matinog mlina i ukupnog protoka u rijeci Donjoj Dobri.

Navedena četiri mjerenja izvršena su pomoću uređaja Flow Tracker2 dana 07.09.2021. (tri mjerenja) i 08.09.2021. (kontrolno mjerenje kad mlin ne radi, tj. kad se vodno kolo nije okretalo), dok je jedno mjerenje izvršeno pomoću uređaja SQ-R Flow Metra i mjerača broja okretaja dana 16.11.2021.

Pomoću ultrazvučnog mjerača protoka Flow Tracker2 mjereni su brzina i protok vode na dovodnom kanalu kod Matinog mlina za tri različita položaja (visine) zapornice (lokacija 1) te na lokaciji 2 (Slika 27.). Lokacija 2, koja se nalazi nizvodno od Matinog mlina, korištena je za uvid u bilancu protoka na dan mjerenja. Korištenjem uređaja SQ-R Flow Meter također su mjereni brzina i protok vode na dovodnom kanalu kod Matinog mlina za sedam različitih položaja (visine) zapornice (lokacija 1).

7.1. Postupak mjerenja pomoću uređaja FlowTracker2

Uz mjerni uređaj, korištena je i mjerna traka koja se pričvršćuje na krajeve (rubove) kanala ili rijeke. Mjerna traka služi kako bi se mjerenja odradila na pravilnom razmaku ovisno o poprečnom profilu kanala. Razmak između mjernih točaka prema ISO standardu, odnosno prema pravilima struke iznosi $1/20$ ukupne širine vodotoka [13], [14]. Razmak između vertikalna u kanalu iznosi 0.5 metara, a kod mjerenja na profilu rijeke 1.0 metar. O razmaku između točaka mjerenja ovise i rezultati mjerenja. Što je razmak manji mjerenja su preciznija, tako da se treba držati navedenih preporuka. S druge strane, manji razmaci podrazumijevaju i više utrošenog vremena za mjerenje.

Prije postavljanja mjerne trake potrebno je odabrati pogodno mjesto za mjerenje, a pogodna mjesta su mjesta gdje ne postoje prepreke koje bi mogle utjecati na rezultate mjerenja kao što su bujna vegetacija ili plutajuće grane. Nakon postavljanja mjerne trake slijedi mjerenje, koje započinje tako da se uključi uređaj i radi automatska provjera koja služi za provjeru kontrole prikupljenih podataka. Na taj se način utvrđuje jesu li zadovoljeni svi uvjeti kako bi se kvalitetno i precizno obavilo mjerenje.

Nakon što su postignuti uvjeti za kvalitetno mjerenje, odabire se početna točka mjerenja. Uređaj se postavlja na početnu točku te se definira naziv lokacije i ime operatera koji vrši mjerenje. Zatim se definira redni broj točke, dubina na kojoj se mjeri brzina, a isto tako definira se radi li se o lijevom ili desnom rubu kanala ili se radi o otvorenom toku, tj. tečenju unutar poprečnog presjeka korita. U ovom slučaju za početnu točku kod mjerenja u kanalu i u rijeci odabran je desni rub i njezin redni broj je nula, isto kao i dubina. Ostale točke između rubova imaju određenu dubinu mjerenja i definiraju se kao točke u otvorenom toku. Na slici 28 prikazan je postupak mjerenja u kanalu, dok je na slici 29. prikazan postupak mjerenja u otvorenom vodotoku. Kod mjerenja, uređaj treba biti fiksiran na način da je stabilan i vertikalno postavljen te usmjeren okomito na poprečni presjek. Sonda uređaja mora biti usmjerena suprotno u odnosu na smjer tečenja. Proces mjerenja traje 40 sekundi za svaku točku. Uređaj za svaki dio presjeka izračunava srednju brzinu, površinu i protok. Nakon završetka mjerenja na profilu, softver unutar uređaja izvršava analizu/proračun. Dobiveni rezultati mogu se obrađivati na računalu pomoću prikladnog tabličnog programskog alata. U tu svrhu, najviše se koristi Microsoft Office Excel.



Slika 28. Mjerenje brzine vode u kanalu Matinog mlina pomoću FlowTracker-a [3]



Slika 29. Mjerenje brzine vode na rijeci Donjoj Dobri [3]

U dovodnom kanalu Matinog mlina dana 07.09.2021. izvršena su tri mjerenja prema opisanom postupku iz prethodnog poglavlja. Razlika između mjerenja je u visini podignute zapornice (Slika 30.), odnosno u količini vode koja se pušta u dovodni kanal. Potrebno je naglasiti da zapornica ne brtvi, tj. ne zadržava vodu u potpunosti zbog starosti konstrukcije.



Slika 30. Visina zapore [3]

Mjerenje u samom koritu rijeke Dobre nizvodno od Matinog mlina izvršeno je dana 08.09.2021. Postupak mjerenja je isti kao i kod Matinog mlina. Za početak se postavlja mjerna traka preko cijelog profila rijeke Dobre, nakon postavljanja trake, započinje se s mjerenjem. Mjerenja su izvršena na rasteru od jednog metra, na mjestima gdje je rijeka Dobra dublja od 0,5 metra mjerenje je izvršeno na dvije dubine na istoj mjernoj točki (Slika 31.), budući da je aplikacija uređaja sama ponudila te dvije točke/dubine.



Slika 31. Mjerenje na profilu rijeke Dobre [3]

7.2. Postupak mjerenja pomoću SQ-R Flow Metra

Peto mjerenje izvršeno je u odvodnom kanalu Matinog mlina 16.11.2021. pomoću uređaja SQ-R Flow metra. Prvi korak mjerenja je postavljanje uređaja na poziciju mjerenja, točnije na sredinu odvodnog kanala (Slika 32.), zatim se uređaj pomoću kabela povezuje s računalom koji zapisuje i obrađuje podatke. Nakon što su uređaj i računalno spojeni, potrebno je definirati ulazne podatke kako bi mjerenje i obrada podataka bili relevantni. Od ulaznih podataka upisuje se širina odvodnog kanala, visina od dna kanala do uređaja, trenutna dubina vode u kanalu te nagib odvodnog kanala. Uređaj pomoću radara bilježi brzinu i dubinu vode, a pomoću definiranih geometrijskih karakteristika odvodnog kanala proračunava brzinu i protok vode.



Slika 32. Postavljanje SQ-R Flow Meter [3]



Slika 33. Analiza i obrada podataka SQ-R Flow Meter [3]



Slika 34. Određivanje visine zapornice i puštanje vode prema vodnom kolu [3]

7.3. Postupak mjerenja pomoću brojača okretaja Tachometer

Za potrebe ovog rada, broj okretaja mlinskog kola mjerio se optičkom metodom na način da se na vratilo mlinskog kola pričvrstila reflektirajuća traka. Nakon pričvršćivanja trake na vratilo, na uređaju se odabire željeni način rada. Nakon što se mlinsko kolo počne okretati, ispitivač mora usmjeriti infracrvenu zraku iz uređaja u reflektirajuću traku i nepomično držati uređaj u trajanju u jedne minute kako bi rezultati bili valjani (Slika 35.).



Slika 35. Mjerenja broja okretaja pomoću uređaja Tachometer [3]

8. Rezultati mjerenja

8.1. Mjerenje br. 1 u dovodnom kanalu

Prvo mjerenje pomoću uređaja FlowTracker2 izvršeno je u dovodnom kanalu Matinog mlina s visinom podignute zapornice 10 cm. Dubina vode na mjestu mjerenja iznosila je 10 centimetara. Nakon što je mjerenje završeno podaci iz uređaja prebacuju se na računalo i obrađuju. Rezultat obrade podataka na računalo je izvještaj u .pdf ili .csv obliku. Izvještaj se sastoji od nekoliko stranica.

Prva stranica sadrži općenite informacije o mjerenju i lokaciji (Slika 36.)

# Stations	Avg interval (s)	Total discharge (m ³ /s)
5	40	0,239

Total width (m)	Total area (m ²)	Wetted Perimeter (m)
2,200	0,220	2,200

Mean SNR (dB)	Mean depth (m)	Mean velocity (m/s)
46,686	0,100	1,084

Mean temp (°C)	Max depth (m)	Max velocity (m/s)
20,049	0,100	1,541

Discharge Uncertainty		
Category	ISO	IVE
Accuracy	1,0 %	
Depth	0,9 %	
Velocity	0,9 %	
Width	0,3 %	
Method	4,4 %	
# Stations	12,2 %	
Overall	13,1 %	

Discharge equation	Mean Section
Discharge uncertainty	IVE
Discharge reference	Rated

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

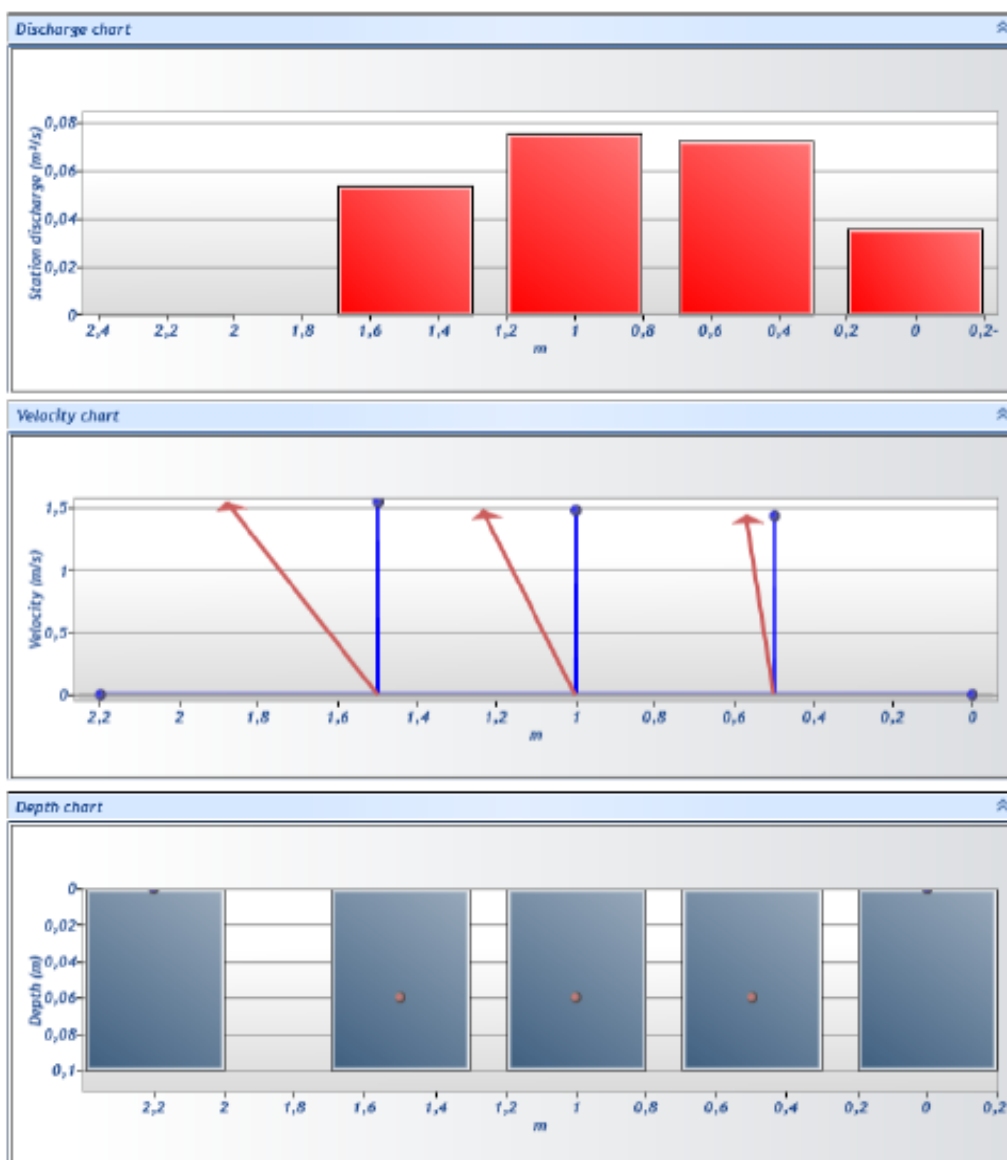
Summary overview	
No changes were made to this file	
Quality control warnings	

Slika 36. Prva stranica izvještaja za mjerenje br.1 [3]

Druga stranica izvještaja sastoji se od grafičkog prikaza rezultata dobivenih mjerenjem. Prvi dijagram prikazuje raspodjelu protoka u ovisnosti o širini odvodnog kanala, drugi dijagram prikazuje raspodjelu brzina, dok treći dijagram prikazuje raspodjelu dubina u odvodnom kanalu (Slika 37.).

Site name	Matin mlin_odvodni kanal
Site number	1
Operator(s)	Matija Blažun
File name	Matin mlin_1.ft
Comment	Visina zapornice: 10 cm

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 37. Druga stranica izvještaja za mjerenje br.1 [3]

Posljednja stranica izvještaja prikazuje kompletne rezultate mjerenja u tabličnom obliku. Tablica sadrži: redni broj mjerenja, vrijeme mjerenja, stacionažu mjerenja, dubinu mjerenja, brzinu vode, površinu između profila i protok (Slika 38.).



Discharge Measurement Summary

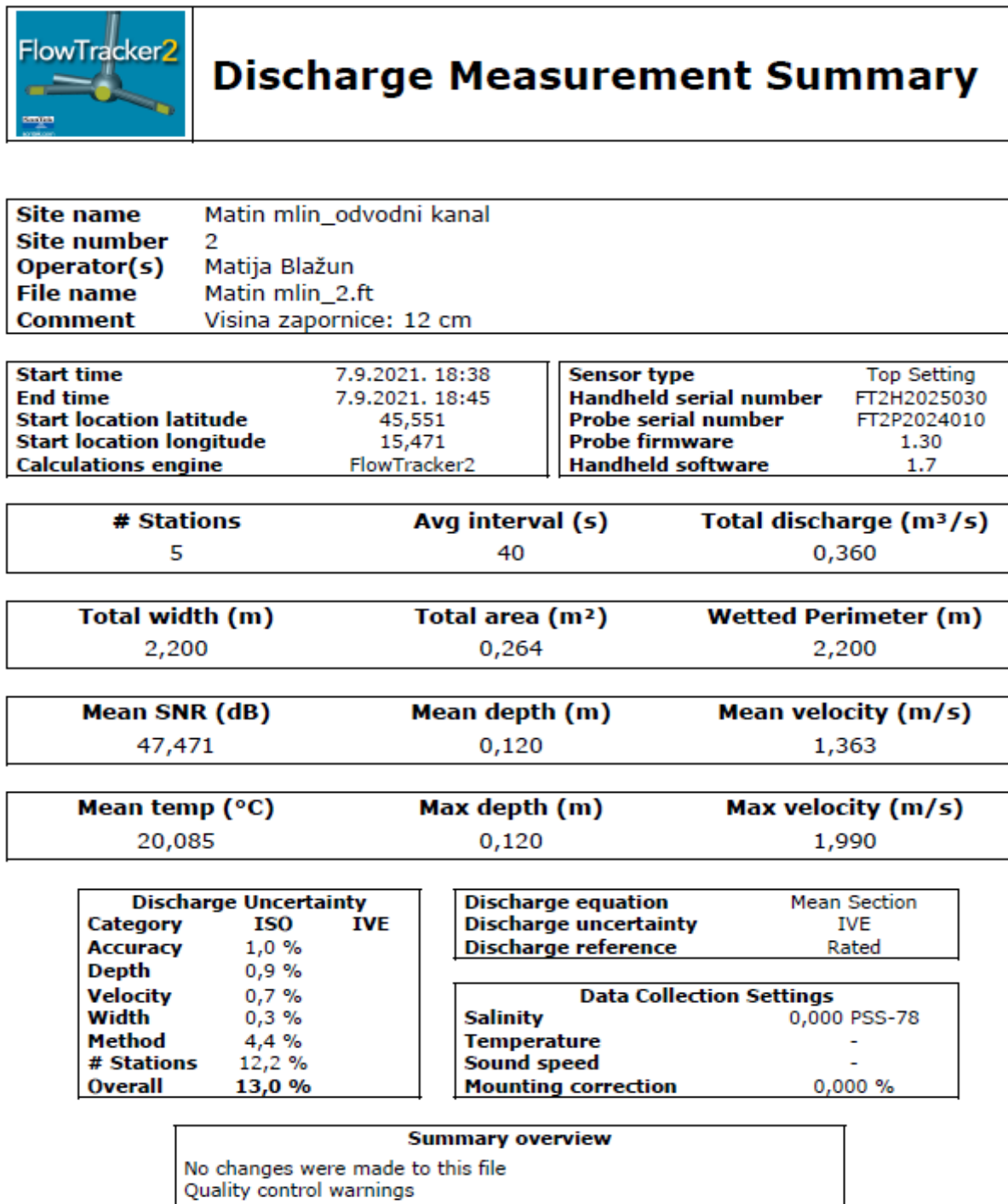
Site name	Matin mlin_odvodni kanal
Site number	1
Operator(s)	Matija Blažun
File name	Matin mlin_1.ft
Comment	Visina zapornice: 10 cm

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	18:03	0,000	None	0,100	0,000	0,000	0	0,000		0,719	0,050	0,036	15,076	✓
1	18:04	0,500	0,6	0,100	0,600	0,060	80	1,438	1,000	1,461	0,050	0,073	30,617	✓
2	18:07	1,000	0,6	0,100	0,600	0,060	80	1,483	1,000	1,512	0,050	0,076	31,693	✓
3	18:09	1,500	0,6	0,100	0,600	0,060	80	1,541	1,000	0,770	0,070	0,054	22,613	✓
4	18:11	2,200	None	0,100	0,000	0,000	0	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	✓

Slika 38. Treća stranica izvještaja za mjerenje br.1 [3]

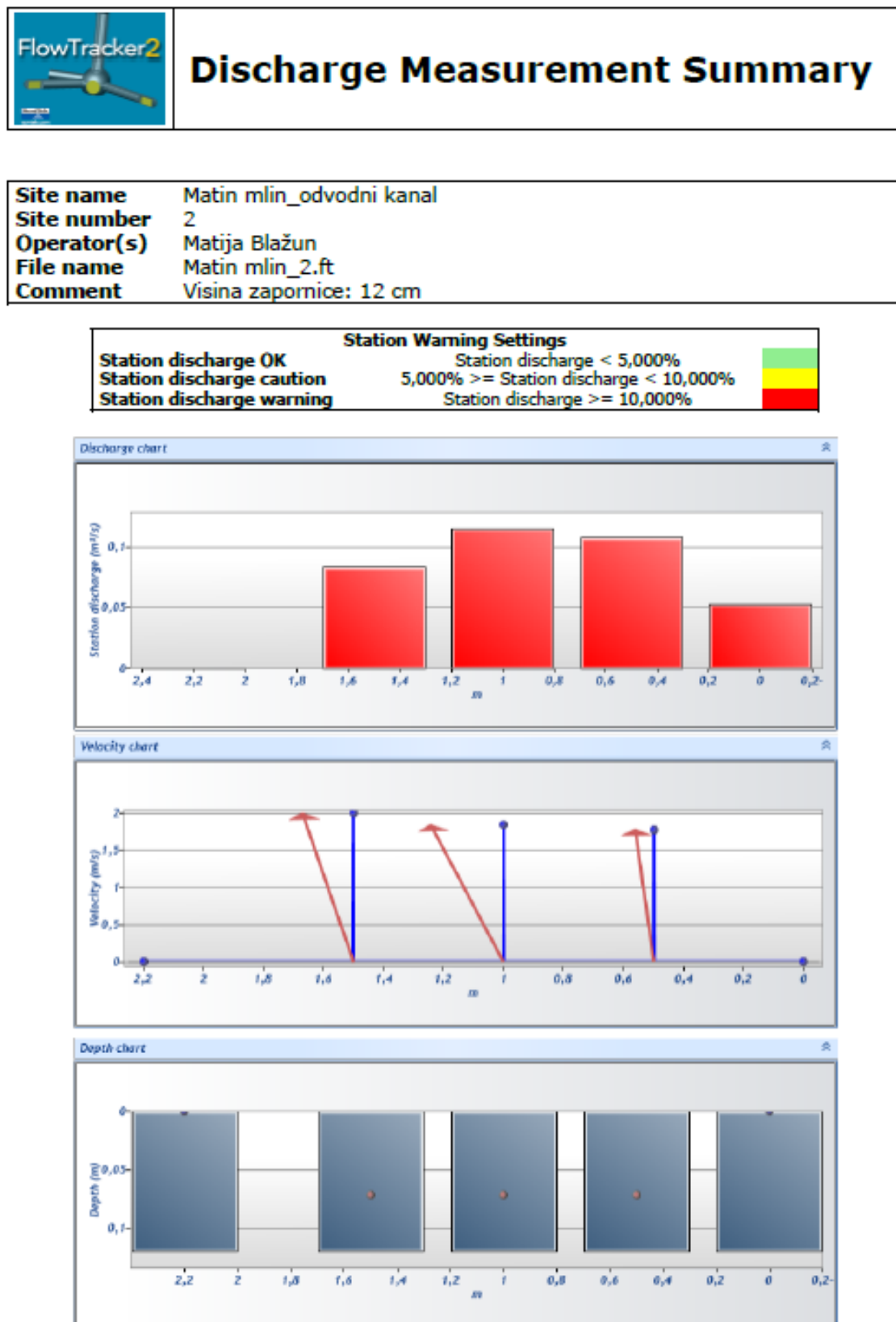
8.2. Mjerenje br. 2 u dovodnom kanalu

Drugo mjerenje pomoću uređaja FlowTracker2 izvršeno je kao i prvo mjerenje u dovodnom kanalu Matinog mlina, ali s visinom podignute zapornice od 12 cm. Visina podignute zapornice u odnosu na prvo mjerenje povećana je za 2 cm (Slika 39.).



Slika 39. Prva stranica izvještaja za mjerenje br.2 [3]

Na slici 40 grafički su prikazani protok, brzine i dubina vode.



Slika 40. Druga stranica izvještaja za mjerenje br.2 [3]

Kao i na prvom izvještaju treća stranica sadrži tablični prikaz svih podataka dobivenih mjerenjem (Slika 41.).



Discharge Measurement Summary

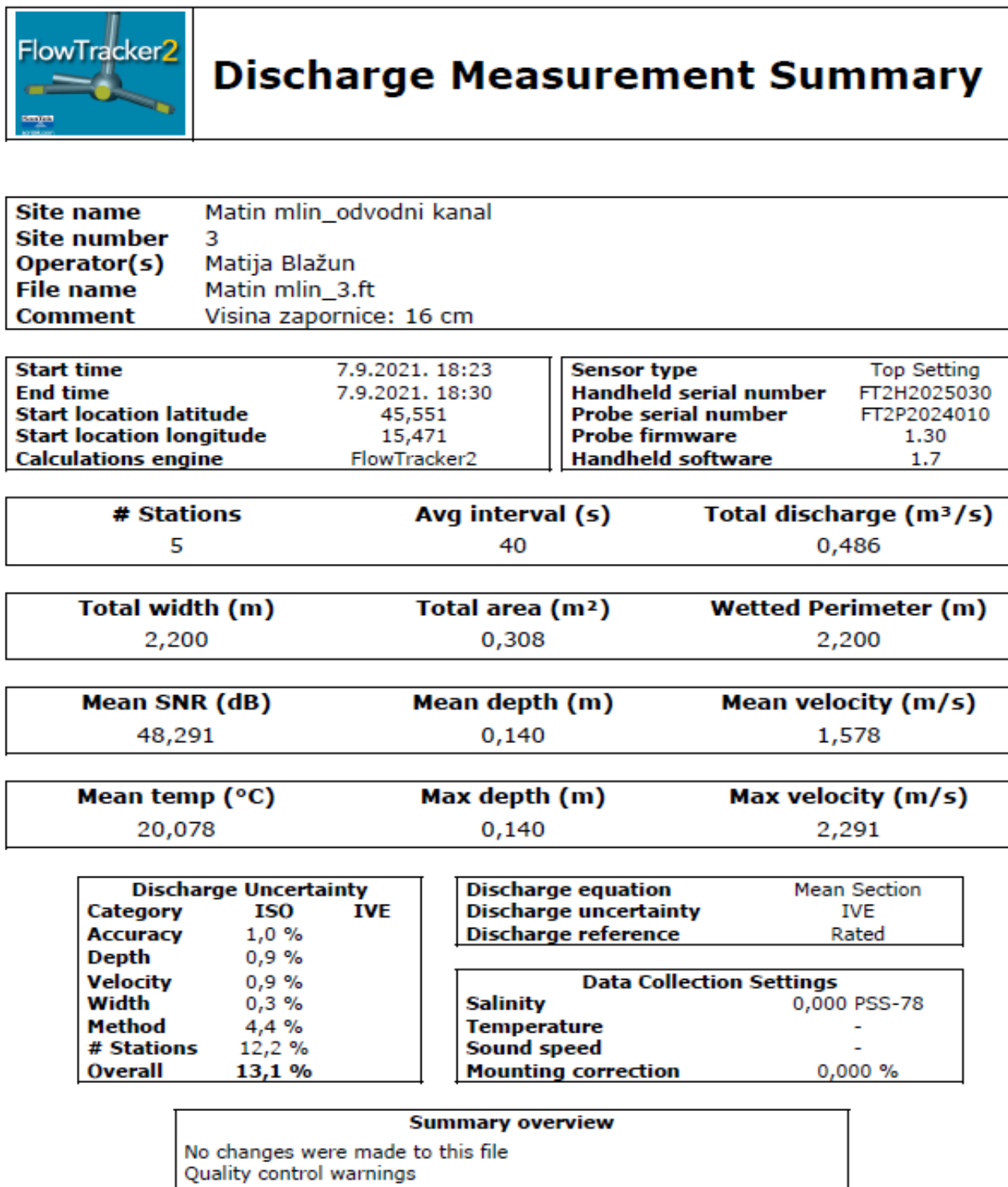
Site name	Matin mlin_odvodni kanal
Site number	2
Operator(s)	Matija Blažun
File name	Matin mlin_2.ft
Comment	Visina zapornice: 12 cm

Measurement results														
<i>St#</i>	<i>Time</i>	<i>Location (m)</i>	<i>Method</i>	<i>Depth (m)</i>	<i>%Depth</i>	<i>Measured Depth (m)</i>	<i>Samples</i>	<i>Velocity (m/s)</i>	<i>Correction</i>	<i>Mean Velocity (m/s)</i>	<i>Area (m²)</i>	<i>Flow (m³/s)</i>	<i>%Q</i>	
0	18:38	0,000	None	0,120	0,000	0,000	0	0,000		0,886	0,060	0,053	14,774	✓
1	18:39	0,500	0,6	0,120	0,600	0,072	80	1,772	1,000	1,805	0,060	0,108	30,094	✓
2	18:41	1,000	0,6	0,120	0,600	0,072	80	1,837	1,000	1,914	0,060	0,115	31,908	✓
3	18:43	1,500	0,6	0,120	0,600	0,072	80	1,990	1,000	0,995	0,084	0,084	23,223	✓
4	18:45	2,200	None	0,120	0,000	0,000	0	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	✓

Slika 41. Treća stranica izvještaja za mjerenje br.2 [3]

8.3. Mjerenje br. 3 u dovodnom kanalu

Treće mjerenje je kao i prva dva mjerenja izvršeno u dovodnom kanalu Matinog mlina s uređajem FlowTracker2 s visinom zapornice od 16 cm (Slika 42.).

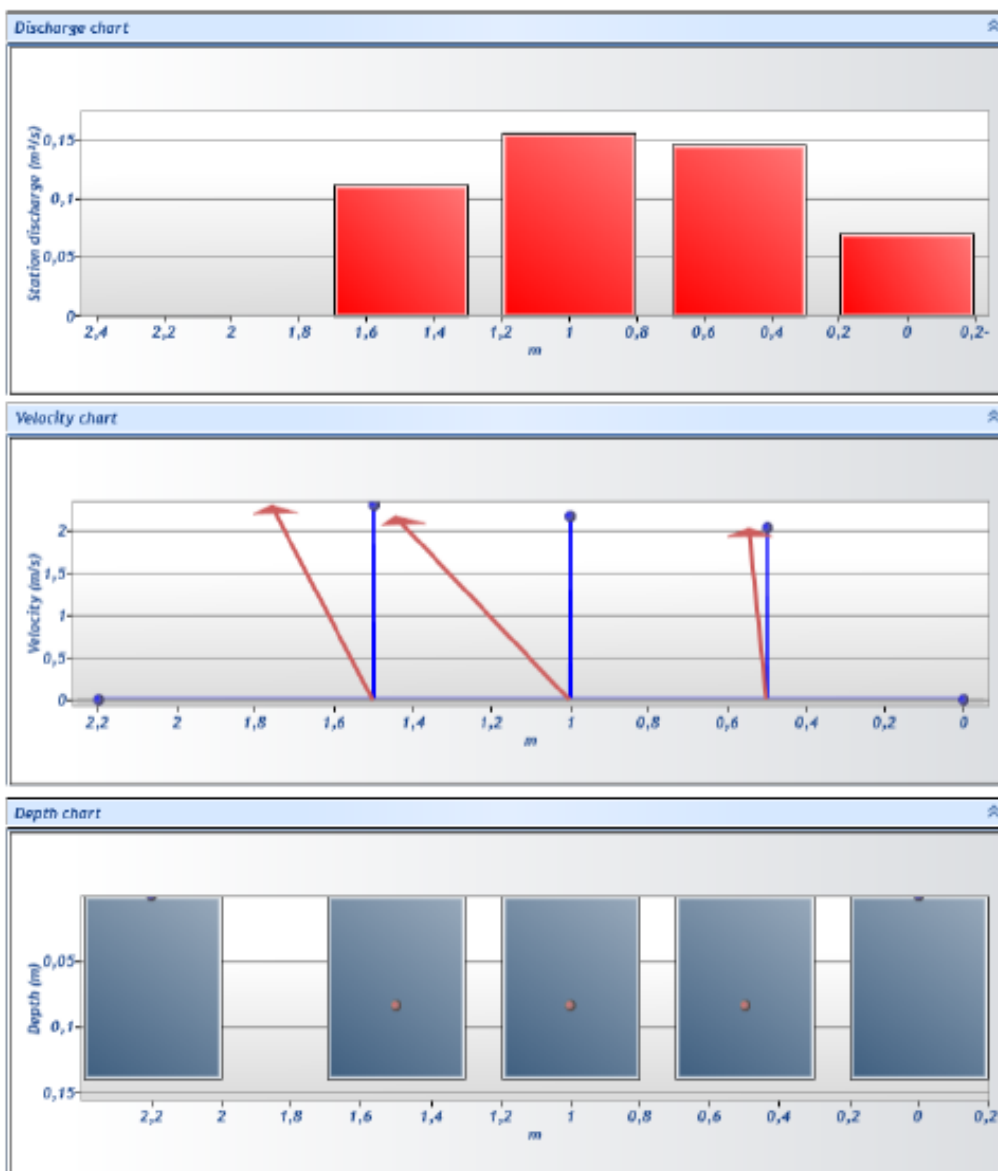


Slika 42. Prva stranica izvještaja za mjerenje br.3 [3]

Druga stranica izvještaja, kao i u prethodnim izvještajima, prikazuje grafički prikaz izmjerenih podataka (Slika 43.).


Site name	Matin mlin_odvodni kanal
Site number	3
Operator(s)	Matija Blažun
File name	Matin mlin_3.ft
Comment	Visina zapornice: 16 cm

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 43. Druga stranica izvještaja za mjerenje br.3 [3]

Slika 44 prikazuje tablični prikaz izmjerenih podataka.



Discharge Measurement Summary

Site name	Matin mlin_odvodni kanal
Site number	3
Operator(s)	Matija Blažun
File name	Matin mlin_3.ft
Comment	Visina zapornice: 16 cm


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	18:23	0,000	None	0,140	0,000	0,000	0	0,000		1,015	0,070	0,071	14,613	✓
1	18:24	0,500	0,6	0,140	0,600	0,084	80	2,029	1,000	2,097	0,070	0,147	30,201	✓
2	18:27	1,000	0,6	0,140	0,600	0,084	80	2,165	1,000	2,228	0,070	0,156	32,087	✓
3	18:29	1,500	0,6	0,140	0,600	0,084	80	2,291	1,000	1,146	0,098	0,112	23,099	✓
4	18:30	2,200	None	0,140	0,000	0,000	0	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	✓

Slika 44. Treća stranica trećeg izvještaja za mjerenje br.3 [3]

Sa slika 37, 40 i 43 može se vidjeti da stvarni vektori brzine (naznačeni crvenim strelicama), odnosno iznosi brzina odstupaju od srednjih vektora brzine (naznačeni plavim strelicama). Razlog je utjecaj kontakta vode iz izlaznog dijela kanala mlina sa vodom iz toka rijeke Donje Dobre, odnosno stvaranje izvjesnog uspora (povratnog toka).

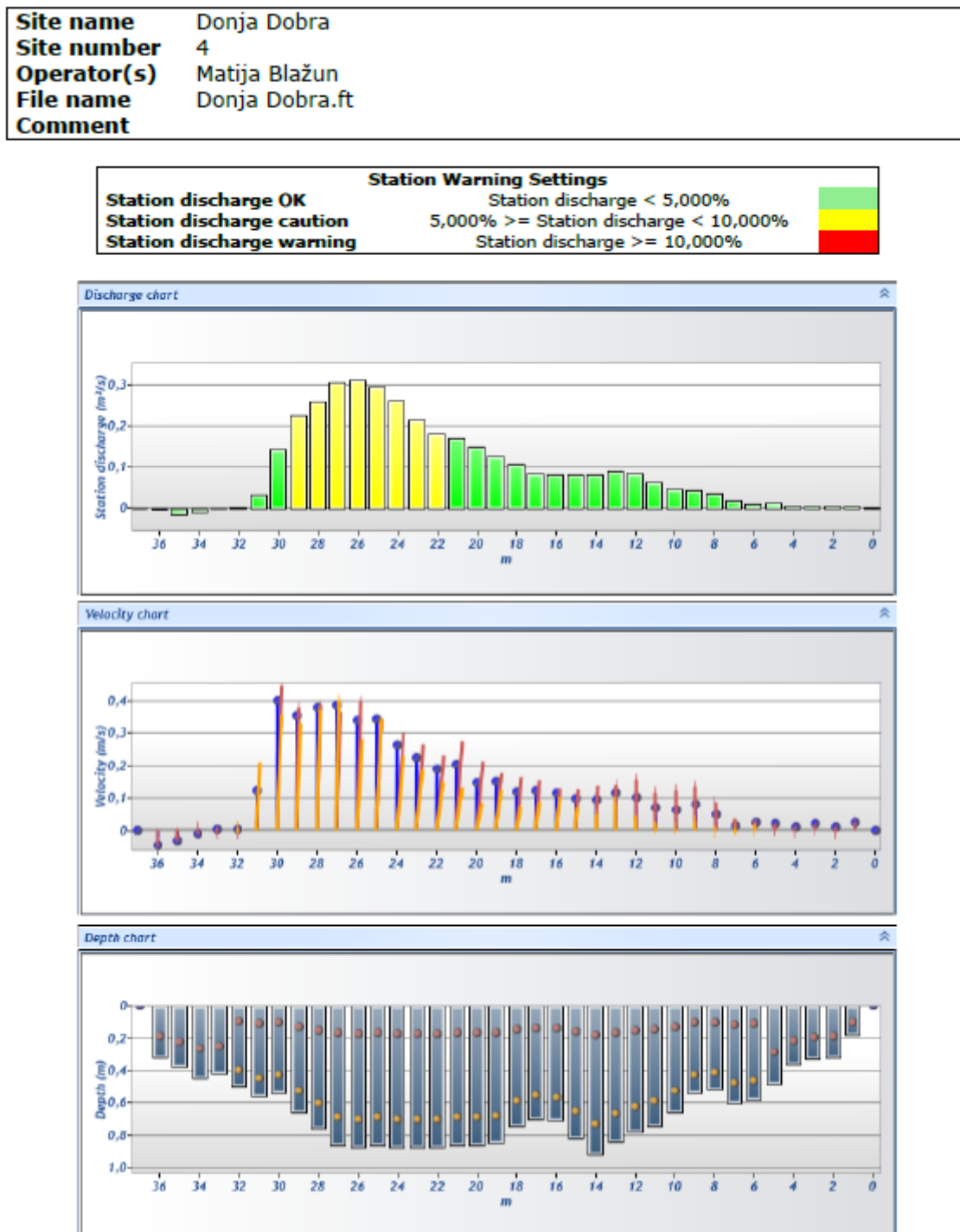
8.4. Mjerenje br. 4 nizvodno od Matinog mlina

Četvrto mjerenje izvršeno je pomoću uređaja FlowTracker2, 800 metara nizvodno od Matinog mlina na profilu rijeke Dobre (Slika 45.). Mjerenja su izvršena za vrijeme uobičajenog (niskog) vodostaja rijeke Dobre.

 Discharge Measurement Summary		
Site name	Donja Dobra	
Site number	4	
Operator(s)	Matija Blažun	
File name	Donja Dobra.ft	
Comment		
Start time	8.9.2021. 13:09	
End time	8.9.2021. 15:49	
Start location latitude	45,551	
Start location longitude	15,477	
Calculations engine	FlowTracker2	
Sensor type	Top Setting	
Handheld serial number	FT2H2025030	
Probe serial number	FT2P2024010	
Probe firmware	1.30	
Handheld software	1.7	
# Stations	Avg interval (s)	Total discharge (m³/s)
38	40	3,527
Total width (m)	Total area (m²)	Wetted Perimeter (m)
37,000	23,220	37,154
Mean SNR (dB)	Mean depth (m)	Mean velocity (m/s)
17,149	0,628	0,152
Mean temp (°C)	Max depth (m)	Max velocity (m/s)
19,949	0,920	0,444
Discharge Uncertainty		Discharge equation Mean Section
Category	ISO IVE	Discharge uncertainty IVE
Accuracy	1,0 %	Discharge reference Rated
Depth	0,1 %	
Velocity	0,3 %	
Width	0,1 %	
Method	0,8 %	
# Stations	1,4 %	
Overall	1,9 %	
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 45. Prva stranica izvještaja za mjerenje br.4 [3]

Kao i na prethodnim mjerenjima, druga stranica izvještaja grafički prikazuje izmjerene podatke (Slika 46.).



Slika 46. Druga stranica izvještaja za mjerenje br.4 [3]

Četvrto mjerenje sastoji se od 37 mjernih točaka, budući da je korito široko 37 m. Iz tog razloga, broj mjernih profila veći je od tabličnih prikaza podataka na prva tri mjerenja (Slika 47.).

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	13:09	0,000	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,012	0,090	0,001	0,030
1	13:09	1,000	0,6	0,180	0,600	0,108	80	0,024	1,000	0,017	0,250	0,004	0,122
2	13:15	2,000	0,6	0,320	0,600	0,192	80	0,011	1,000	0,014	0,325	0,005	0,132
3	13:18	3,000	0,6	0,330	0,600	0,198	80	0,018	1,000	0,013	0,345	0,004	0,125
4	13:21	4,000	0,6	0,360	0,600	0,216	80	0,008	1,000	0,014	0,420	0,006	0,166
5	13:24	5,000	0,6	0,480	0,600	0,288	80	0,020	1,000	0,022	0,530	0,012	0,394
6	13:26	6,000	0,2/0,8	0,580	0,200	0,116	80	0,031	1,000	0,019	0,590	0,011	0,319
6	13:26	6,000	0,2/0,8	0,580	0,800	0,464	80	0,017	1,000	0,019	0,590	0,011	0,319
7	13:31	7,000	0,2/0,8	0,600	0,200	0,120	80	0,035	1,000	0,031	0,560	0,017	0,486
7	13:31	7,000	0,2/0,8	0,600	0,800	0,480	80	-0,007	1,000	0,031	0,560	0,017	0,486
8	13:36	8,000	0,2/0,8	0,520	0,200	0,104	80	0,087	1,000	0,064	0,530	0,034	0,962
8	13:36	8,000	0,2/0,8	0,520	0,800	0,416	80	0,008	1,000	0,064	0,530	0,034	0,962
9	13:40	9,000	0,2/0,8	0,540	0,200	0,108	80	0,134	1,000	0,071	0,600	0,042	1,201
9	13:40	9,000	0,2/0,8	0,540	0,800	0,432	80	0,027	1,000	0,071	0,600	0,042	1,201
10	13:44	10,000	0,2/0,8	0,660	0,200	0,132	80	0,124	1,000	0,065	0,700	0,045	1,288
10	13:44	10,000	0,2/0,8	0,660	0,800	0,528	80	-0,003	1,000	0,065	0,700	0,045	1,288
11	13:47	11,000	0,2/0,8	0,740	0,200	0,148	80	0,116	1,000	0,084	0,760	0,064	1,819
11	13:47	11,000	0,2/0,8	0,740	0,800	0,592	80	0,023	1,000	0,084	0,760	0,064	1,819
12	13:50	12,000	0,2/0,8	0,780	0,200	0,156	80	0,156	1,000	0,107	0,810	0,086	2,452
12	13:50	12,000	0,2/0,8	0,780	0,800	0,624	80	0,043	1,000	0,107	0,810	0,086	2,452
13	14:03	13,000	0,2/0,8	0,840	0,200	0,168	80	0,140	1,000	0,103	0,880	0,091	2,576
13	14:03	13,000	0,2/0,8	0,840	0,800	0,672	80	0,088	1,000	0,103	0,880	0,091	2,576
14	14:07	14,000	0,2/0,8	0,920	0,200	0,184	80	0,137	1,000	0,095	0,870	0,083	2,356
14	14:07	14,000	0,2/0,8	0,920	0,800	0,736	80	0,048	1,000	0,095	0,870	0,083	2,356
15	14:10	15,000	0,2/0,8	0,820	0,200	0,164	80	0,126	1,000	0,107	0,765	0,082	2,326
15	14:10	15,000	0,2/0,8	0,820	0,800	0,656	80	0,071	1,000	0,107	0,765	0,082	2,326
16	14:13	16,000	0,2/0,8	0,710	0,200	0,142	80	0,129	1,000	0,118	0,705	0,083	2,367
16	14:13	16,000	0,2/0,8	0,710	0,800	0,568	80	0,103	1,000	0,118	0,705	0,083	2,367
17	14:16	17,000	0,2/0,8	0,700	0,200	0,140	80	0,154	1,000	0,119	0,720	0,086	2,436
17	14:16	17,000	0,2/0,8	0,700	0,800	0,560	80	0,087	1,000	0,119	0,720	0,086	2,436
18	14:20	18,000	0,2/0,8	0,740	0,200	0,148	80	0,163	1,000	0,134	0,795	0,106	3,010
18	14:20	18,000	0,2/0,8	0,740	0,800	0,592	80	0,072	1,000	0,134	0,795	0,106	3,010
19	14:27	19,000	0,2/0,8	0,850	0,200	0,170	80	0,175	1,000	0,148	0,855	0,127	3,593
19	14:27	19,000	0,2/0,8	0,850	0,800	0,680	80	0,124	1,000	0,148	0,855	0,127	3,593
20	14:34	20,000	0,2/0,8	0,860	0,200	0,172	80	0,212	1,000	0,175	0,860	0,150	4,258
20	14:34	20,000	0,2/0,8	0,860	0,800	0,688	80	0,082	1,000	0,175	0,860	0,150	4,258
21	14:37	21,000	0,2/0,8	0,860	0,200	0,172	80	0,274	1,000	0,196	0,870	0,170	4,835
21	14:37	21,000	0,2/0,8	0,860	0,800	0,688	80	0,130	1,000	0,196	0,870	0,170	4,835
22	14:55	22,000	0,2/0,8	0,880	0,200	0,176	80	0,231	1,000	0,207	0,880	0,182	5,170
22	14:55	22,000	0,2/0,8	0,880	0,800	0,704	80	0,149	1,000	0,207	0,880	0,182	5,170
23	14:59	23,000	0,2/0,8	0,880	0,200	0,176	80	0,264	1,000	0,244	0,880	0,215	6,095
23	14:59	23,000	0,2/0,8	0,880	0,800	0,704	80	0,185	1,000	0,244	0,880	0,215	6,095
24	15:02	24,000	0,2/0,8	0,880	0,200	0,176	80	0,298	1,000	0,304	0,870	0,265	7,503
24	15:02	24,000	0,2/0,8	0,880	0,800	0,704	80	0,230	1,000	0,304	0,870	0,265	7,503
25	15:06	25,000	0,2/0,8	0,860	0,200	0,172	80	0,344	1,000	0,341	0,870	0,297	8,421
25	15:06	25,000	0,2/0,8	0,860	0,800	0,688	80	0,344	1,000	0,341	0,870	0,297	8,421
26	15:09	26,000	0,2/0,8	0,880	0,200	0,176	80	0,397	1,000	0,361	0,870	0,314	8,907
26	15:09	26,000	0,2/0,8	0,880	0,800	0,704	80	0,280	1,000	0,361	0,870	0,314	8,907
27	15:13	27,000	0,2/0,8	0,860	0,200	0,172	80	0,366	1,000	0,381	0,810	0,308	8,740
27	15:13	27,000	0,2/0,8	0,860	0,800	0,688	80	0,401	1,000	0,381	0,810	0,308	8,740
28	15:16	28,000	0,2/0,8	0,760	0,200	0,152	80	0,385	1,000	0,366	0,710	0,260	7,364
28	15:16	28,000	0,2/0,8	0,760	0,800	0,608	80	0,370	1,000	0,366	0,710	0,260	7,364
29	15:21	29,000	0,2/0,8	0,660	0,200	0,132	80	0,378	1,000	0,377	0,600	0,226	6,416
29	15:21	29,000	0,2/0,8	0,660	0,800	0,528	80	0,330	1,000	0,377	0,600	0,226	6,416
30	15:25	30,000	0,2/0,8	0,540	0,200	0,108	80	0,444	1,000	0,260	0,550	0,143	4,058
30	15:25	30,000	0,2/0,8	0,540	0,800	0,432	80	0,356	1,000	0,260	0,550	0,143	4,058
31	15:28	31,000	0,2/0,8	0,560	0,200	0,112	80	0,632	1,000	0,061	0,530	0,032	0,910
31	15:28	31,000	0,2/0,8	0,560	0,800	0,448	80	0,209	1,000	0,061	0,530	0,032	0,910
32	15:33	32,000	0,2/0,8	0,500	0,200	0,100	80	0,608	1,000	0,002	0,460	0,001	0,030
32	15:33	32,000	0,2/0,8	0,500	0,800	0,400	80	-0,006	1,000	0,002	0,460	0,001	0,030
33	15:36	33,000	0,6	0,420	0,600	0,252	80	0,004	1,000	-0,003	0,435	-0,001	-0,040
34	15:38	34,000	0,6	0,450	0,600	0,270	80	-0,010	1,000	-0,022	0,415	-0,009	-0,257
35	15:43	35,000	0,6	0,380	0,600	0,228	80	-0,033	1,000	-0,041	0,350	-0,014	-0,403
36	15:47	36,000	0,6	0,320	0,600	0,192	80	-0,048	1,000	-0,024	0,160	-0,004	-0,108
37	15:49	37,000	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000

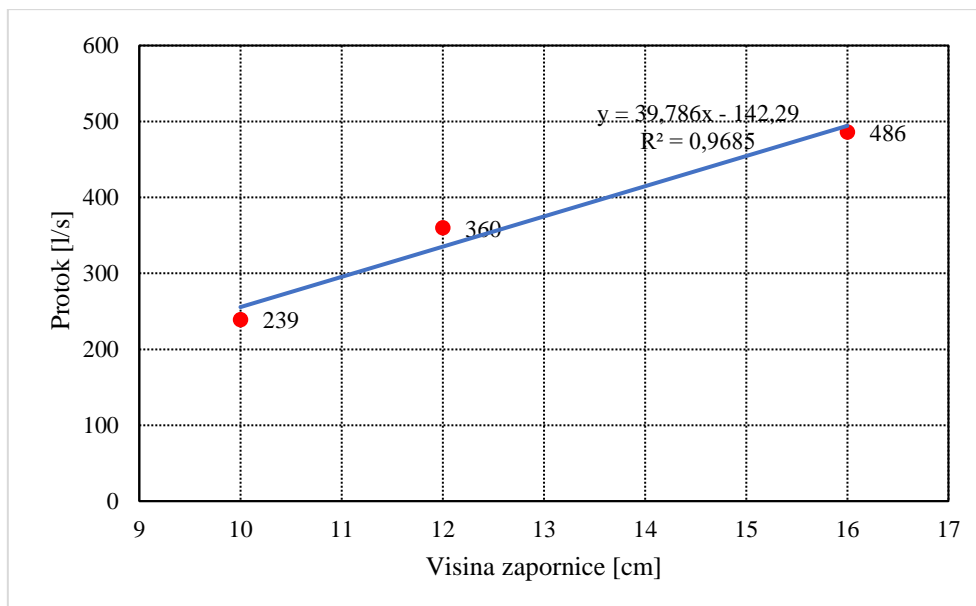
Slika 47. Treća stranica izvještaja za mjerenje br.4 [3]

U tablici 3 prikazani su svi rezultati mjerenja korištenjem ultrazvučnog mjerača protoka FlowTracker2. Postizanje veće dubine, odnosno podizanje zapornice na višu razinu od 16 cm nije bilo moguće zbog jakog strujanja vode, budući da bi došlo do narušavanja sigurnosti mjeritelja.

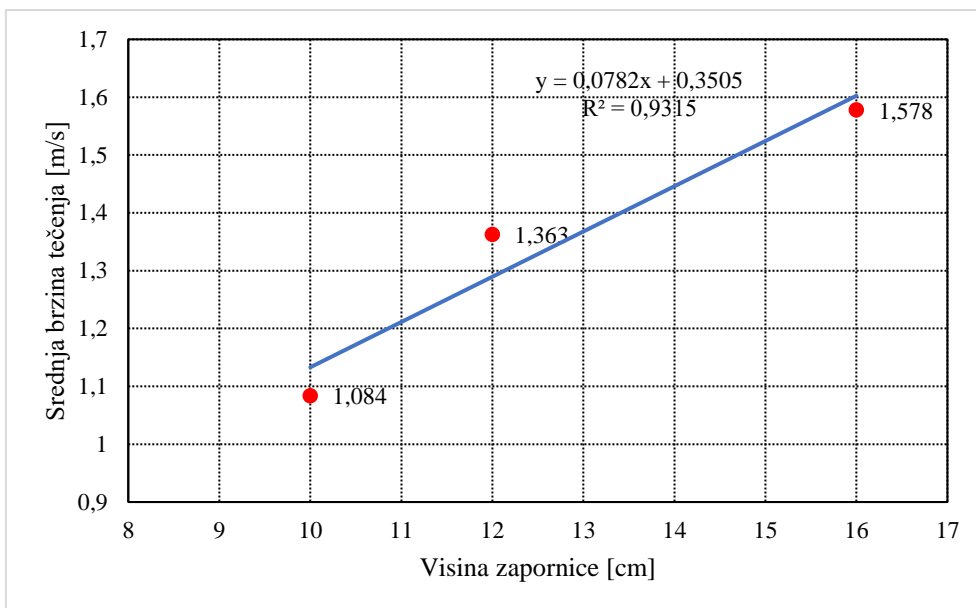
Tablica 3. Rezultati mjerenja pomoću uređaja FlowTracker2 kod Matinog mlina

R.b. mjerenja	Dubina vode na zapornici [cm]	Brzina vode [m/s]	Protok [l/s]	Dubina vode na izlazu iz dovodnog kanala [cm]
1.	10	1,541	239	10
2.	12	1,990	360	12
3.	16	2,291	486	16

Na slikama 48 i 49 prikazana je ovisnost protoka i brzine tečenja vode o visini zapornice. Može se primijetiti kako se s povećanjem visine zapornice povećavaju srednji protok i srednja brzina tečenja.

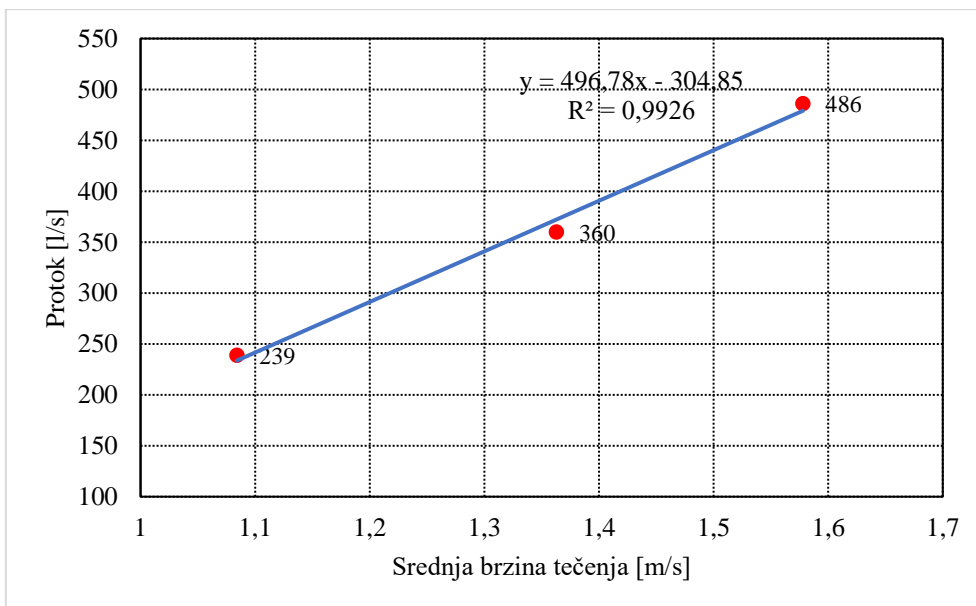


Slika 48. Grafički prikaz ovisnosti protoka o visini zapornice [3]



Slika 49. Grafički prikaz ovisnosti brzine tečenja o visini zapornice [3]

Slika 50. prikazuje ovisnost protoka i brzine na mjerenoj lokaciji.



Slika 50. Grafički prikaz ovisnosti protoka o brzini tečenja [3]

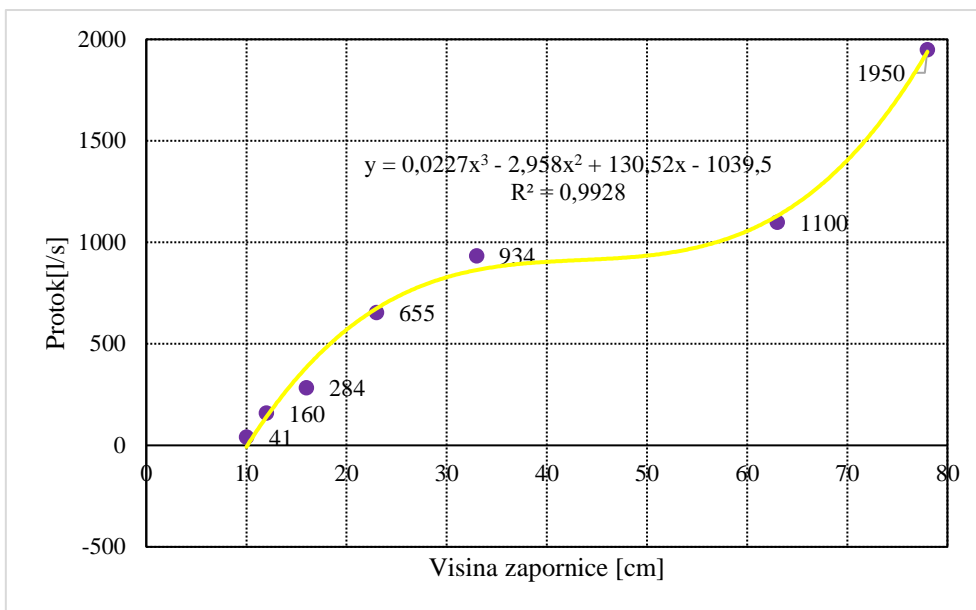
8.5. Mjerenje br. 5 u dovodnom kanalu pomoću SQ-R Flow Metra

Peto mjerenje izvršeno je pomoću radarskog mjernog uređaja SQ-R Flow Metra u dovodnom kanalu Matinog mlina (Slike 32.-33.). Izvršeno je ukupno sedam mjerenja kod različitih visina zapornice. Visina zapornice od 78 centimetara predstavlja maksimalno otvorenu zapornicu, odnosno maksimalni dotok vode na mlinsko kolo. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 4. Za mjerenje radarskim uređajem nije bilo potrebno ulaziti u vodu.

Tablica 4. Rezultati mjerenja pomoću SQ-R Flow Metra

R.b. mjerenja	Dubina vode na zapornici [cm]	Brzina vode [m/s]	Protok [l/s]	Broj okretaja mlinskog kola [o/min]
1.	10	1,03	41	2,23
2.	12	2,20	160	3,15
3.	16	2,68	284	5,45
4.	23	3,20	655	11,50
5.	33	3,60	934	12,35
6.	63	3,85	1100	11,98
7.	78	4,10	1950	10,83

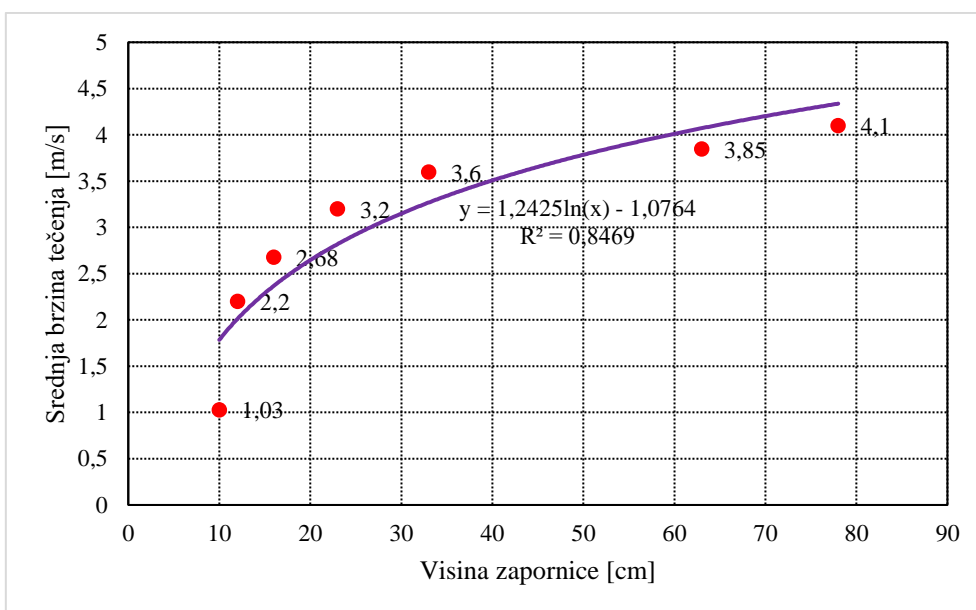
Iz dijagrama prikazanih na slikama 51-53 vidljivo je, kao i kod rezultata dobivenih pomoću ultrazvučnog mjerača protoka FlowTracker-a, da se brzina tečenja vode i protok povećavaju s povećanjem visine zapornice.



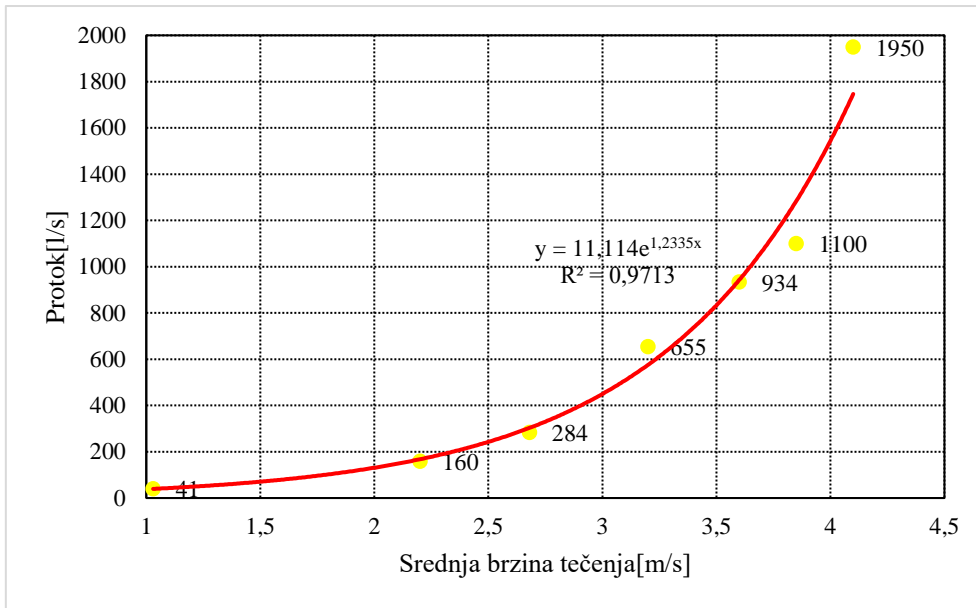
Slika 51. Grafički prikaz ovisnosti protoka o visini zapornice

Matematički određena točka infleksije (Inflexion Point) dobivena korištenjem programske aplikacije Wolfram Alpha), tj. točka kod kojeg matematički dobivena funkcija regresije (jednadžba 12) prelazi iz konkavne u konveksnu funkciju, dobivena je za visinu zapornice od 43 cm, pri čemu je pripadni protok jednak 909 l/s.

$$0.0227 x^3 - 2.958 x^2 + 130.52 x - 1039.5 \approx 909.217 \text{ at } x \approx 43.4361 \quad (12)$$



Slika 52. Grafički prikaz ovisnosti brzine tečenja o visini zapornice [3]



Slika 53. Grafički prikaz ovisnosti protoka i brzine tečenja [3]

9. Proračun snage i količine proizvedene energije hidroelektrane u obliku vodnog kola

Za proračun snage hidroelektrane u obliku vodenice koriste se formule (8) i (11), navedene i objašnjene u četvrtom poglavlju. Mjerenja u dovodnom kanalu su izvršena na način da se visina zapornice za svako novo mjerenje povećavala te su se mjerile pripadne srednje brzine, kao i srednji protoci, uz izračun geometrijskih karakteristika poprečnih profila.

9.1. Proračun snage turbine pomoću podataka dobivenih uređajem Flow Tracker2

Ulazni podaci i rezultati proračuna snage turbine, dobiveni korištenjem podataka iz tablice 3., prikazani su u tablici 5. Površina poprečnog profila dobivena je kao umnožak dubine vode na zapornici i širine dovodnog kanala koja iznosi 2,20 metara, a koji je također proračunat kao izlazni rezultat obrade korištenjem ultrazvučnog mjerača protoka FlowTracker2. Srednja brzina dobivena je mjerenjem pomoću uređaja Flow Tracker2. Snaga turbine proračunata je pomoću izraza (8). Količina električne energije proračunata je pomoću izraza (11) i temelji se na osmosatnom radnom vremenu tijekom 250 radnih dana u godini. Navedeno vrijeme rada usvojeno je prema pravilima struke, budući da je u obzir potrebno uzeti i vrijeme redovnih održavanja i kontrola te mogućnost pojave sušnog razdoblja. Također, budući da je postojeći mlin u sklopu OPG-a, on se koristi za proizvodnju brašna, tako da su i iz navedenih razloga moguća prebacivanja rada na mlin, a ne na turbinu.

Tablica 5. Ulazni podaci i rezultati proračuna dobiveni korištenjem uređaja FlowTracker2

Rb. mjerenja:	Dubina vode na zapornici [cm]	Površina pop. profila [m ²]	Srednja brzina vode [m/s]	Snaga turbine [kW]	Količina el. energije [kWh/god.]
1.	10	0,220	1,084	0,042	84,00
2.	12	0,264	1,363	0,100	200,00
3.	16	0,352	1,578	0,207	414,00

9.2. Proračun snage turbine pomoću podataka dobivenih uređajem SQ-R Flow Metra

U ovom slučaju kao i u prethodnom poglavlju snaga turbine proračunat će se pomoću istih formula (8) i (11) koje su korištene kod proračuna dobivenih korištenjem uređaja. Jedina razlika je u načinu dobivanja podataka o brzini vode i protoku, koji su dobiveni pomoću uređaja SQ-R Flow metra, tablica 4.

Tablica 6 prikazuje različite rezultate brzine vode i protoka ovisno o visini podignute zapornice. Širina kanala ostaje ista i iznosi $B=2,20$ metara, i koristiti će se za proračun snage kod svih sedam mjerenja. Snaga turbine proračunata je pomoću formule (8). Količina električne energije proračunata je pomoću formule (10) i temelji se na osmosatnom radnom vremenu tijekom 250 radnih dana u godini, kao i kod FlowTrackera2.

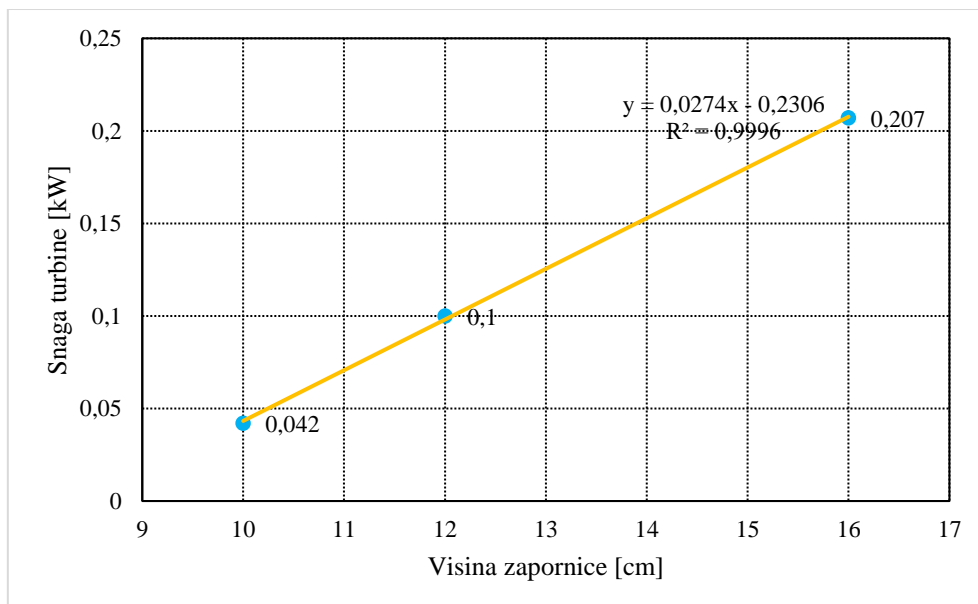
Tablica 6. Ulazni podaci i rezultati proračuna dobiveni radarskim mjernim uređajem SQ-R Flow Meter

Rb. mjerenja:	Dubina vode na zapornici [cm]	Površina pop. profila [m ²]	Srednja brzina vode [m/s]	Snaga turbine [kW]	Količina el. energije [kWh/god.]
1.	10	0,220	1,03	0,036	72,00
2.	12	0,264	2,20	0,421	842,00
3.	16	0,352	2,68	1,01	2.020,00
4.	23	0,506	3,20	2,48	4.960,00
5.	33	0,726	3,60	5,08	10.160,00
6.	63	1,386	3,85	11,86	23.720,00
7.	78	1,716	4,10	17,74	35.480,00

10. Analiza dobivenih rezultata.

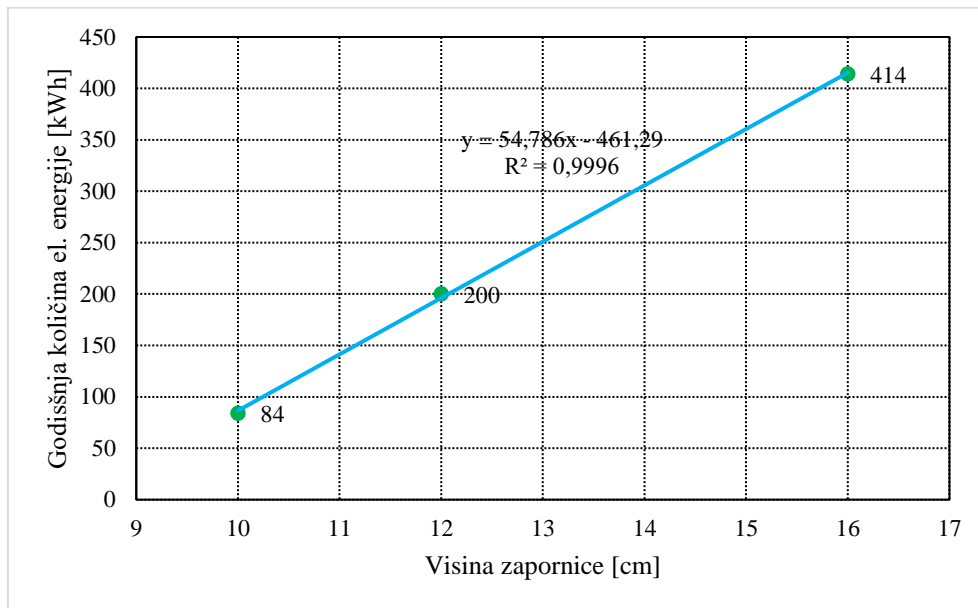
U ovom podpoglavlju prikazani su i analizirani podaci dobiveni mjerenjem pomoću uređaja FlowTracker2 i SQR Flow Meter, kao i rezultati dobiveni proračunom pomoću podataka dobivenih mjerenjem. Usporedbom dobivenim srednjih brzina, proračunatih snaga turbine, kao i proizvedene količine električne energije, odnosno usporedbom veličina iz tablica 5 i 6, vidljiva su izvjesna odstupanja. Usporedba prva tri rezultata mjerenja, tj. veličina dobivenih rezultata s obzirom na dubinu vode na zapornici (ulazu u vodenicu), pokazuje da dolazi do značajnih odstupanja. Potrebno je uzeti u obzir da je SQ-R Flow Meter namijenjen za veće protoke, a samim time mu i preciznost pada s manjim protocima. FlowTracker 2 namijenjen je za manje protoke, odnosno za vodotoke u koje je moguće ući direktno, bez ikakve opasnosti za mjeritelja (mjeritelje), budući da se preporuča da barem dvoje ljudi sudjeluje u mjerenju.

Dijagram na slici 54 prikazuje ovisnost snage turbine o visini zapornice kod mjerenja FlowTrackerom2. Vidljivo je da s porastom visine zapornice raste i snaga turbine, što je očekivano. Potrebno je uzeti u obzir da je u ovom slučaju maksimalna visina zapornice, odnosno ulaza u vodenicu uvjetovana sigurnosnim uvjetima s obzirom na veliku brzinu kretanja vode.



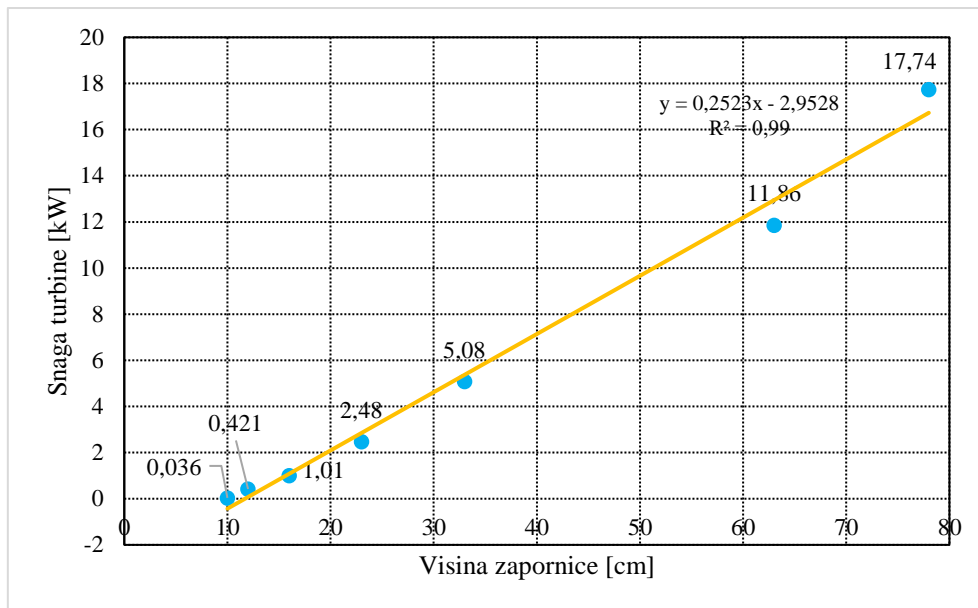
Slika 54. Grafički prikaz ovisnosti snage turbine o visini zapornice

Kao što s visinom zapornice raste snaga turbine, raste i godišnja količina proizvedene električne energije što je vidljivo na dijagramu na slici 55, za rezultate dobivene pomoću Flow Tracker-a.

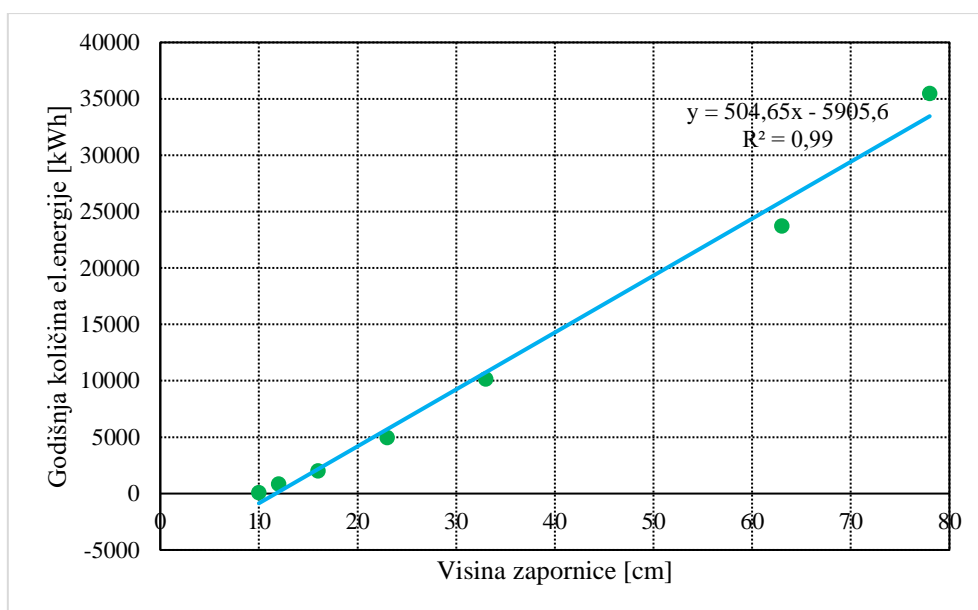


Slika 55. Grafički prikaz ovisnosti godišnje proizvodnje el. energije o visini zapornice

Kvalitetniji uvid u potencijal proizvodnje električne energije prikazati će se kod proračuna snage i godišnje proizvodnje električne energije na osnovu rezultata dobivenih pomoću uređaja SQ-R Flow Meter. Pomoću uređaja SQ-R Flow Metra izvršeno je sedam mjerenja u dovodnom kanalu te isto toliko proračuna snage turbine i proizvodnje godišnje količine električne energije, tablica 6. Vidljivo je da povećanjem zapornice dolazi i do povećanja snage i godišnje količine proizvedene energije, slike 56. i 57.

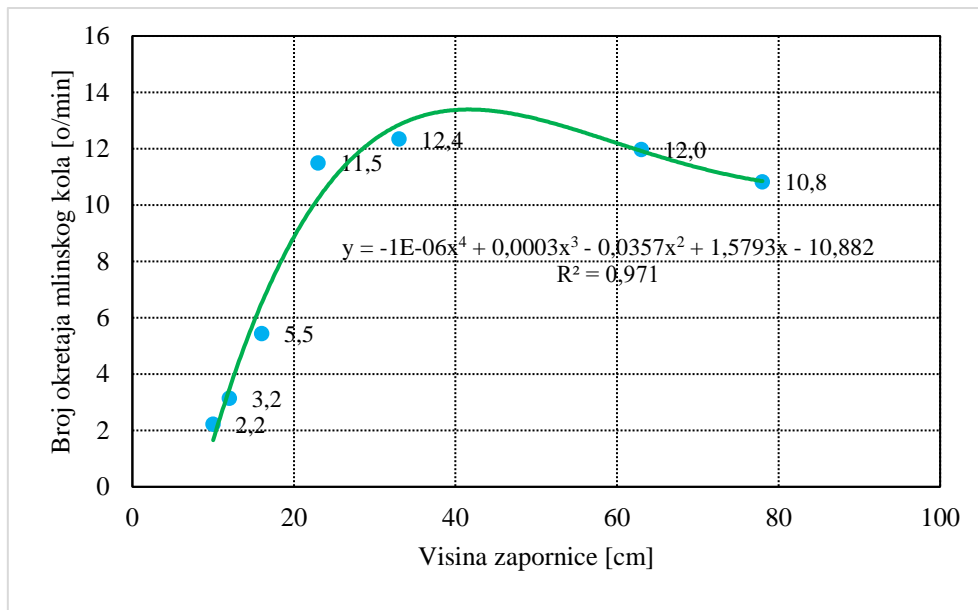


Slika 56. Grafički prikaz ovisnosti snage turbine o visini zapornice



Slika 57. Grafički prikaz ovisnosti količine proizvedene el. energije o visini zapornice

Na slici 58 vidljivo je da broj okretaja mlinskog kola raste do određene visine zapornice, tj. protoka, a zatim pada. Konkretno u ovom slučaju brojevi okretaja mlinskog kola rastu sve dok visina zapornice ne premaši 33 cm, nakon povećanja visine zapornice iznad 33 centimetra broj okretaja mlinskog kola stagnira i lagano pada. Razlog tome je prevelika količina vode koja dolazi na mlinsko kolo, te se u dovodnom kanalu stvaraju nepovoljni uvjeti za idealnu rotaciju mlinskog kola, odnosno dolazi do stvaranja gubitaka koji dalje usporavaju okretanje mlinskog kola.



Slika 58. Ovisnost broj okretaja mlinskog kola o visini zapornice

Usporedbom slike 58. sa slikom 51., vizualno je vidljivo da se najveća vrijednost dobivene funkcijske zavisnosti broja okretaja mlinskog kola i visine zapornice poklapa s točkom infleksije na slici 51. Matematičkom analizom izraza dobivenog regresijskom analizom (jednadžba 13), uz korištenje aplikacije Wolfram Alpha, najveća vrijednost broja okretaja 12,0 dobivena je za vrijednost visine zapornice od 35 cm. U usporedbi sa visinom zapornice od 43 cm na slici 51, razlika je 8 cm, što je za ovu razinu razrade i više nego prihvatljivo odstupanje.

$$\max\{-1 \times 10^{-6} x^4 + 0,0003 x^3 - 0,0357 x^2 + 1,5793 x - 10,882\} \approx 12,026$$

$$\text{at } x \approx 35,494 \quad (13)$$

Za usporedbu i lakše shvaćanje proizvedene količine električne energije na slici 59 prikazani u statistički podaci o prosječnoj potrošnji električne energije za kućanstva. Sukladno tome, Matin mlin bi s količinom proizvedene električne energije mogao opskrbljivati nekoliko velikih kućanstava.

Razredi potrošnje za kućanstva

Razred potrošnje	Najniža potrošnja (kWh/g)	Najviša potrošnja (kWh/g)
Da-vrlo mala kućanstva		<1.000
Db-mala kućanstva	1.000	<2.500
Dc-srednja kućanstva	2.500	<5.000
Dd-velika kućanstva	5.000	<15.000
De-vrlo velika kućanstva	>15.000	

Slika 59. Prosječna potrošnja električne energije za kućanstva [15]

11. Zaključak

Ubrzana potrošnja neobnovljivih izvora energije potiče sve veći interes svjetske populacije za korištenjem obnovljivih izvora energije. Jedan od vodećih i najznačajnijih oblika obnovljive energije je hidroenergija, upravo to je razlog za sve većim promatranjem i analizom energetskeg potencijala malih vodotoka te proizvodnje električne energije pomoću tradicionalnih mlinica kao što je Matin mlin.

U ovom radu promatran je energetskeg potencijal rijeke Donje Dobre, točnije mogućnost proizvodnje električne energije pomoću tradicionalnog mlina smještenog na rijeci Donjoj Dobri. U svrhu određivanja mogućnosti proizvodnje električne energije pomoću Matinog mlina provedena su terenska mjerenja koja su uključivala odlazak na lokaciju Matinog mlina, analizu postojećeg stanja na lokaciji te mjerenje brzine tečenja vode i protoka u dovodnom kanalu. Brzina tečenja vode i protok su mjerodavne veličine potrebne za daljnju analizu i dimenzioniranje, odnosno određivanje snage turbine u obliku vodnog kola.

Kako bi se izmjerila brzina tečenja vode i odredio protok, korišteni su ultrazvučni mjerač protoka FlowTracker2 i radarski mjerač protoka SQ-R Flow Meter. Oba uređaja služe za mjerenje brzine tečenja vode i određivanje protoka, pri čemu se razlikuju s obzirom na način mjerenja protoka i brzine vode. Još je korišten i mjerač broja okretaja Tachometer.

Nakon dobivenih podataka s terena pristupalo se analizi izmjerenih veličina te proračunu snage turbine i proračunu godišnje proizvodnje električne energije. Iz proračuna u ovom radu vidljivo je da na bazi osmosatnog radnog vremena kroz dvjesto i pedeset (250) radnih dana godišnje s maksimalno podignutom zapornicom moguće proizvesti otprilike 35.480,00 kWh električne energije. Ako se u obzir uzme prosječna potrošnja električne energije za kućanstva, godišnja količina proizvedene električne energije pomoću Matinog mlina dovoljna je za godišnju opskrbu električnom energijom nekoliko velikih kućanstva. U kombinaciji s ostalim obnovljivim izvorima električne energije, a naročito sa solarnim fotonaponskim sustavom zbog obrnutih poklapanja režima proizvodnje električne energije, ovakav energetskeg sustav ima veliki značaj.

Bitna stavka kod proizvodnje električne energije konkretno pomoću Matinog mlina je činjenica da ovakav način proizvodnje električne energije nema gotovo nikakvih utjecaja na okoliš. Voda koja okreće vodno kolo izlazi van bez gubitaka i bez zadržavanja. Zaštitna rešetka na ulazu u

dovodni kanal ne dopušta prolazak ribama i ostalom životinjskom svijetu u vodno kolo, čime se izbjegava kontakt s lopaticama. U ovom slučaju, Matin mlin ne utječe negativno na okoliš iz razloga što ne zahtijeva dodatne promjene u prostoru, odnosno nije potrebno graditi nove dovodne kanale ili brane. Isto tako, budući rad turbine neće utjecati na migraciju riba, rakova i ostalih vodenih životinja, kao ni na biljni svijet.

Nakon provedenih mjerenja i proračuna zaključak ovog diplomskog rada je da uz proizvodnju brašna kao osnovne i prvobitne namjene mlina, uz minimalnu nadogradnju Matin mlin ima veliki potencijal u proizvodnji električne energije. Daljnja razrada ove tematike sastojati će se u još detaljnijem proračunu snaga turbina (hidroelektrana) u obliku vodenice s naglaskom na ulazne i izlazne razine vode, broj okretaja radnog kola, režim tečenja vode i ostale tehničke detalje. Pouzdaniji uvid u karakteristike i energetske potencijal na lokaciji Matinog mlina dobit će se kontinuiranim provođenjem hidroloških mjerenja protoka, praćenjem klimatoloških promjena odnosno praćenjem preraspodjele oborina tijekom godine te eventualno mjerenjem gubitaka vode, budući da se radi o krškom području.

Popis slika

Slika 1. Prikaz lokacije Matinog mlina na rijeci Dobri [2]	2
Slika 2. Matin mlin [3]	2
Slika 3. Princip proizvodnje električne energije [4].....	4
Slika 4. Reakcijska turbina [4]	6
Slika 5. Akcijska turbina [4]	6
Slika 6. Primjeri akcijskih i reakcijskih turbina [4].....	7
Slika 7. Radna područja različitih turbina [4]	7
Slika 8. Lokacije mjernih postaja na vodotoku Donja Dobra [7].....	9
Slika 9. Poprečni presjek rijeke Donje Dobre na mjernoj postaji Lešće Toplice [7].....	11
Slika 10. Protoci rijeke Donje Dobre izmjereni na mjernoj postaji Lešće Toplice [7]	12
Slika 11. Poprečni profil rijeke Donje Dobre na mjernoj postaji Stative Donje [7]	14
Slika 12. Protoci rijeke Dobre izmjereni na mjernoj postaji Stative Donje [7].....	15
Slika 13. Tabla s upozorenjem o mogućnosti nailaska vodnog vala iz hidroelektrane Lešće [3]	16
Slika 14. Grafički prikaz ponašanja mlinskog kola u plitkom toku [8]	18
Slika 15. Satelitski snimak Matinog mlina na rijeci Donjoj Dobri [3]	20
Slika 16. Zaštitne ulazne rešetke [3]	21
Slika 17. Zapornica [3].....	22
Slika 18. Poprečni presjek dovodnog kanala [3].....	23
Slika 19. Pogled na mlinsko kolo [3]	24
Slika 20. Pogled na lopatice mlinskog kola [3].....	24
Slika 21. Mehanizam prijenosa sile s mlinskog kola na kamenu žrvanj [3].....	25
Slika 22. FlowTracker2 [3]	26
Slika 23. Instrument FlowTracker2 u radu [3]	28
Slika 24. Mjerenje pomoću uređaja SQ-R Flow Meter na uređaju za pročišćavanje otpadnih voda [11]	29
Slika 25. Prikaz montaže i mjerenja sa SQ-R Flow Meter [3]	30
Slika 26. Testo 470 Tachometer [12]	31
Slika 27. Satelitski prikaz lokacija mjerenja [2].....	32
Slika 28. Mjerenje brzine vode u kanalu Matinog mlina pomoću FlowTracker-a [3].....	34
Slika 29. Mjerenje brzine vode na rijeci Donjoj Dobri [3]	34
Slika 30. Visina zapore [3]	35

Slika 31. Mjerenje na profilu rijeke Dobre [3].....	36
Slika 32. Postavljanje SQ-R Flow Meter [3].....	37
Slika 33. Analiza i obrada podataka SQ-R Flow Meter [3]	37
Slika 34. Određivanje visine zapornice i puštanje vode prema vodnom kolu [3].....	38
Slika 35. Mjerenja broja okretaja pomoću uređaja Tachometer [3].....	39
Slika 36. Prva stranica izvještaja za mjerenje br.1 [3]	40
Slika 37. Druga stranica izvještaja za mjerenje br.1 [3].....	41
Slika 38. Treća stranica izvještaja za mjerenje br.1 [3]	42
Slika 39. Prva stranica izvještaja za mjerenje br.2 [3]	43
Slika 40. Druga stranica izvještaja za mjerenje br.2 [3].....	44
Slika 41. Treća stranica izvještaja za mjerenje br.2 [3]	45
Slika 42. Prva stranica izvještaja za mjerenje br.3 [3]	46
Slika 43. Druga stranica izvještaja za mjerenje br.3 [3].....	47
Slika 44. Treća stranica trećeg izvještaja za mjerenje br.3 [3].....	48
Slika 45. Prva stranica izvještaja za mjerenje br.4 [3]	49
Slika 46. Druga stranica izvještaja za mjerenje br.4 [3].....	50
Slika 47. Treća stranica izvještaja za mjerenje br.4 [3]	51
Slika 48. Grafički prikaz ovisnosti protoka o visini zapornice [3].....	52
Slika 49. Grafički prikaz ovisnosti brzine tečenja o visini zapornice [3]	53
Slika 50. Grafički prikaz ovisnosti protoka o brzini tečenja [3]	53
Slika 51. Grafički prikaz ovisnosti protoka o visini zapornice	55
Slika 52. Grafički prikaz ovisnosti brzine tečenja o visini zapornice [3]	55
Slika 53. Grafički prikaz ovisnosti protoka i brzine tečenja [3].....	56
Slika 54. Grafički prikaz ovisnosti snage turbine o visini zapornice	59
Slika 55. Grafički prikaz ovisnosti godišnje proizvodnje el. energije o visini zapornice	60
Slika 56. Grafički prikaz ovisnosti snage turbine o visini zapornice	61
Slika 57. Grafički prikaz ovisnosti količine proizvedene el. energije o visini zapornice	61
Slika 58. Ovisnost broj okretaja mlinskog kola o visini zapornice	62
Slika 59. Prosječna potrošnja električne energije za kućanstva [15]	63

Popis tablica

Tablica 1. Prikaz rezultata mjerenja postaje Lešće Toplice [7]	10
Tablica 2. Prikaz rezultata mjerenja postaje Stative Donje [7]	13
Tablica 3. Rezultati mjerenja pomoću uređaja FlowTracker2 kod Matinog mlina.....	52
Tablica 4. Rezultati mjerenja pomoću SQ-R Flow Metra.....	54
Tablica 5. Ulazni podaci i rezultati proračuna dobiveni korištenjem uređaja FlowTracker2 ..	57
Tablica 6. Ulazni podaci i rezultati proračuna dobiveni radarskim mjernim uređajem SQ-R Flow Meter	58

Literatura:

- [1] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, <https://mingor.gov.hr/o-ministarstvu-1065/djelokrug-4925/energetika/energetska-politika-i-planiranje/strategije-planovi-i-programi-2009/2009>, datum pristupa 06.11.2021.
- [2] Google Maps, <https://www.google.com/maps>, datum pristupa 01.11.2021.
- [3] Blažun Matija, arhiva za potrebe diplomskog rada, 2021.
- [4] Energetski sustavi, https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads_nastava/20180427_094126_vpelic_, datum pristupa 08.11.2021.
- [5] Obnovljivi izvori energije <https://sites.google.com/site/tehskolamojaucionica/home/obnovljivi-izvori-energije/turbine-kod-hidroelektrana>, datum pristupa 03.10.2021.
- [6] Wikipedia – Rijeka Dobra, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Dobra>, datum pristupa 03.10.2021.
- [7] Državni hidrometeorološki zavod - hidrologija, <https://hidro.dhz.hr/>, datum pristupa 07.11.2021.
- [8] Quaranta, E. (2018): Stream water wheels as renewable energy supply in flowing water: Theoretical considerations, performance assessment and design recommendations, Energy for Sustainable Development, 45:96-109
- [9] Kos, Ž.; Đurin, B.; Dogančić, D.; Kranjčić, N. Hydro-Energy Suitability of Rivers Regarding Their Hydrological and Hydrogeological Characteristics. Water, 2021, 13, 1777.
- [10] Sontek, <https://www.sontek.com/flowtracker2>, datum pristupa 06.10.2021.
- [11] SQ-R Flow Meter, <https://www.sommer.at/en/products/sewage-wastewater/sq-flow-meters>, datum pristupa 18.11.2021.
- [12] Testo 470, <https://www.testo.com/hr-HR/testo-470/p/0563-0470>, datum pristupa 18.12.2021.
- [13] Library WMO: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=219, dostupno 11.09.2021.
- [14] Csmgeo: http://csmgeo.csm.jmu.edu/geollab/whitmeyer/IrelandDocuments/Hydrometry_Measurement_2007.pdf, dostupno 11.09.2021.
- [15] Struja plin, <https://strujaplin.com/energetsko-trziste/potrosnja-struje>, datum pristupa 15.12.2021.