

Primjena različitih postupaka dimenzioniranja hidroelektrane u obliku vodnog kola - primjer Matinog mlina na rijeci Donjoj Dobri u Jaškovu

Blažun, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:583945>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)

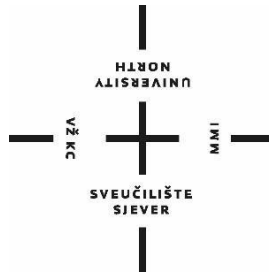


zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Studij Graditeljstva



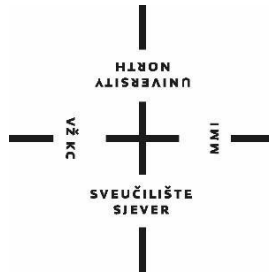
DIPLOMSKI RAD br. 78/GRD/2023

**PRIMJENA RAZLIČITIH POSTUPAKA DIMENZIONIRANJA
HIDROELEKTRANE U OBLIKU VODNOG KOLA - PRIMJER
MATINOG MLINA NA RIJECI DONJOJ DOBRI U JAŠKOVU**

Marija Blažun, 1204/336D

Varaždin, srpanj 2023.

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Studij Graditeljstva



DIPLOMSKI RAD br. 78/GRD/2023

**PRIMJENA RAZLIČITIH POSTUPAKA DIMENZIONIRANJA
HIDROELEKTRANE U OBLIKU VODNOG KOLA - PRIMJER
MATINOG MLINA NA RIJECI DONJOJ DOBRI U JAŠKOVU**

Student:

Marija Blažun, 1204/336D

Mentor:

Izv.prof.dr.sc. Bojan Đurin

Varaždin, srpanj 2023.

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za graditeljstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Graditeljstvo		
PRISTUPNIK	Marija Blažun	JMBAG	0160136232
DATUM	28.03.2023.	KOLIBRI	Vodni sustavi
NASLOV RADA	Primjena različitih postupaka dimenzioniranja hidroelektrane u obliku vodnog kola - primjer Matinog mlina na rijeci Donjoj Dobri u Jaškovu		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Application of various procedures for sizing hydroelectric power plant in the form of a water wheel - an example of the Matin Mlin on the river Donja Dobra in Jaskovo		
MENTOR	dr.sc. Bojan Đurin	ZVANJE	Izvanredni profesor
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. prof.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša 2. izv.prof.dr.sc. Bojan Đurin 3. doc.dr.sc. Anđelko Crnoja 4. doc.dr.sc. Željko Kos-zamjenski član 5.		

Zadatak diplomskog rada

BROJ 78/GRD/2023

OPIS

Rad će prikazati različite načine i metodologije dimenzioniranja hidroelektrane u obliku vodnog kola na stvarnom primjeru na rijeci Donjoj Dobri. Mogućnost proizvodnje električne energije analizirati će se na izgrađenom mlinu, tj. vodnom kotu Matinog mlina u Jaškovu.

Okvirni sadržaj rada sastojati će se od uvodnog poglavlja, teoretskih postavki o elektranama u obliku vodnog kola, hidrološku i hidrauličku analizu, primjer proračuna, analizu dobivenih rezultata i zaključak. Rad će uz stručni, imati i znanstveni doprinos budući da prikazana metodologija dimenzioniranja i analize funkcionalnih zavisnosti dobivenih rezultata još nije provedena na razini Hrvatske i svijeta.

ZADATAK URUČEN 05.04.2023.



POTPIS MENTORA

Sveučilište
Sjever

KLON
ALISSAIND



SVEUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU

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, Marija Blažun pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom „Primjena različitih postupaka dimenzioniranja hidroelektrane u obliku vodnog kola - primjer Matinog mlina na rijeci Donjoj Dobri u blizini Jaškova“ te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:
Marija Blažun

Marija 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, Marija Blažun neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom „Primjena različitih postupaka dimenzioniranja hidroelektrane u obliku vodnog kola - primjer Matinog mlina na rijeci Donjoj Dobri u blizini Jaškova“ čiji sam autor.

Student:
Marija Blažun

Marija Blažun
(vlastoručni potpis)

Sažetak:

U ovom diplomskom radu prikazana je primjena različitih postupaka dimenzioniranja hidroelektrane u obliku vodnog lica na primjeru Matinog mlina na rijeci Donjoj Dobri U Jaškovu. Kako bi se dokazala mogućnost i potencijal proizvodnje električne energije na mlinici, na lokaciji Matinog mlina su provedena hidrometrijska mjerenja. Princip proizvodnje električne energije kod vodenica sličan je i proizvodnji električne energije kod 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. Provedena mjerenja su izvršena pomoću ultrazvučnog mjerača FlowTracker2 i radarskog mjerača SQ-R FlowMeter te mjerača broja okretaja Tachometer. Nakon mjerenja proračunate su snage turbine u obliku vodnog kola te je napravljena analiza dobivenih rezultata. Cjelokupni opis uređaja, mjerenja i proračuna prikazani su u radu.

Ključne riječi: Donja Dobra, mlinica, vodno kolo, protok, brzina vode, proizvodnja električne energije, snaga turbine.

Summary:

In this graduation thesis is shown the application of different hydroelectric power plant dimensioning process, in the form of a water surface, on the example of the Matin mill situated on the Donja Dobra river in Jaškovo. In order to prove the possibility and potential of electricity production at the mill, hydrometric measurements were carried out at the location of the Matin mill. The principle of electricity production at water mills is similar to the production of electricity at hydroelectric power plants. As is the case with the hydroelectric power plants, the potential energy of the water that has been brought through supply channels or pipelines to the turbine or, in the case of water mills, to the mill wheel is converted into kinetic energy. The measurements were carried out by means of the FlowTracker2 ultrasonic meter, the SQ-R FlowMeter radar meter, and the Tachometer. Once the measurements have been done, the power of the turbine in the form of a water wheel was calculated, and the obtained results were analyzed. The complete description of the device, measurements and calculations are presented in the paper.

Key words: Donja Dobra, mill, water wheel, water flow, water speed, electricity production, turbine power.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Princip proizvodnje električne energije iz vodnih kola.....	3
3. Hidrološka analiza promatrane lokacije	10
3.1. Mjerna postaja Lešće Toplice	11
3.2. Mjerna postaja Stative Donje.....	20
3.3. Provođenje hidrometrijskih mjerenja na rijeci Donjoj Dobri u blizini Matinog mlina	25
3.3.1. Postupak mjerenja pomoću uređaja Flow Tracker2.....	25
3.3.2. Rezultati mjerenja – Flow Tracker 2 uređaj	28
3.3.3. Postupak mjerenja pomoću uređaja SQ-R Flow Meter	41
4. Primjer dimenzioniranja hidroelektrane u obliku vodnog kola – Matin mlin, Donja Dobra	46
4.1. Opis lokacije i princip rada Matinog mlina.....	46
4.2. Proračunate snage turbine u obliku vodnog kola	53
5. Analiza dobivenih rezultata	56
6. Zaključak.....	58
Popis slika	59
Popis tablica.....	61
Literatura	62

1. UVOD

Vodna kola (vodeni kotači) su 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.

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 [1].

Hidroenergija može imati veliku ulogu na lokalnoj i regionalnoj razini za društveno-gospodarski razvoj, budući da se hidroelektrane često grade u kombinaciji s novom infrastrukturom. Za velike hidroelektrane, znatne dodatne koristi mogu doći od višenamjenskog korištenja akumulacija korištenih za proizvodnju hidroenergije, budući da voda uskladištena u akumulacijama može pridonijeti povećanim protocima na nizvodnim predjelima (npr. u razdoblju niskih vodostaja ili suša). U vrijeme poplava, akumulacije mogu, ako se njima upravlja na ispravan način, pridonijeti zadržavanju vode i ublažavanju posljedica poplava [2].

Tijekom povijesti hidroenergija se koristila za pokretanje mehaničkih uređaja kao što su mlinovi, drobilice, crpke i drugo prenošenjem energije s vodeničkog kola. Prvi dokaz o vodeničkom kolu pogonjen vodom potječe iz trećeg stoljeća prije nove ere, u mjestu Perahora u Grčkoj. Prva industrijska revolucija temelji se na ugljenu kao energentu, ali je

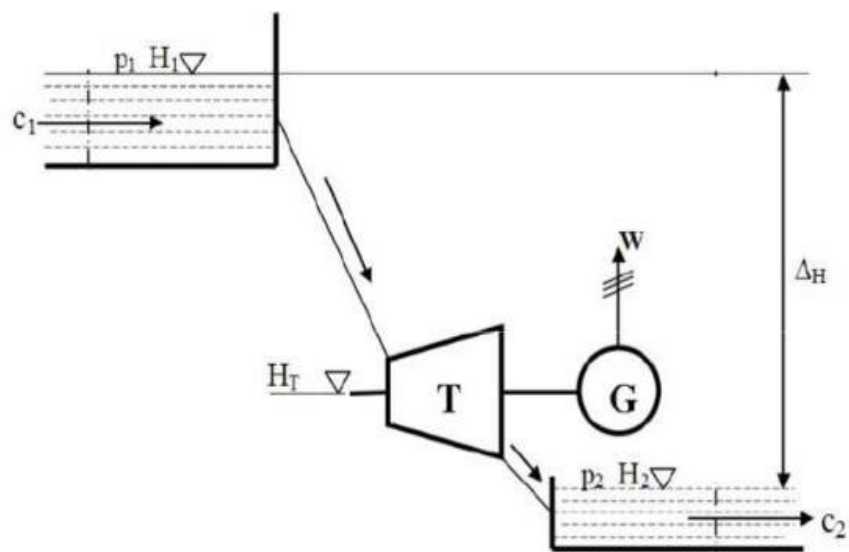
povezana i sa hidroenergijom što je predstavljalo tehnološki napredak izumom strojeva pokretanih vodeničkim kolom.

Godine 1882. kod mjesta Appleton (sjever SAD) na rijeci Fox izgrađena je prva hidroelektrana snage 12,5 kW koja je opskrbljivala električnom energijom nekoliko objekata [3].

U ovome radu dan je pregled svih postojećih metoda dimenzioniranja hidroelektrana u obliku vodnog kola na primjeru Matinog mlina na rijeci Dobri u mjestu Jaškovo u Karlovačkoj županiji. S obzirom na raspoložive podatke i njihovu mogućnost dobivanja, tj. uvjete kod terenskih mjerenja, razmotriti će se relevantni izrazi za dobivanje snage turbine, odnosno hidroelektrane u obliku vodnog kola.

2. PRINCIP PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ VODNIH KOLA

Vodenice su jedan od najnovijih, ali najstarijih oblika proizvodnje čiste energije. Ova tehnologija može iskoristiti energiju tekućih potoka, rijeka ili kanala [5]. Slika 1 prikazuje princip rada hidroelektrane, odnosno protok vode kroz energetske sustav. Sličan princip primjenjuje se i kod proizvodnje električne energije pomoću vodnih kola.



m – protok
mase vode [kg/s]

ρ – gustoća vode [kg/m³]

p – tlak zraka na površini vode [N/m²]

T – turbina

H – razina vode [m]

c – brzina vode [m/s]

W – električna energija [W]

G – generator

Slika 1. Princip rada hidroelektrane [13].

Princip proizvodnje električne energije kod vodenica sličan je i proizvodnji električne energije kod 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.

Uz zanemarivanje gubitaka strujanja, primjenom zakona očuvanja energije za maseni protok vode dobiva se općeniti izraz za energiju, koju masa tekućine ima na ulazu u turbinu [6].

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

Maseni protok vode može se izraziti kao produkt volumnog protoka Q [m^3/s] i gustoće ρ [kg/m^3] te se u konačnici dobije izraz za vodnu snagu mase tekućine na ulazu u turbinu, odnosno za snagu hidroelektrane [6].

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

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 [6]:

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

Stupanj učinkovitosti vodenih turbina, koje koriste potencijalnu energiju vode, kreće se u rasponima od 0,75 do 0,95 [6].

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 [6]:

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

Kod kinetičkih turbina, stupanj učinkovitosti je manji u odnosu na turbine koje koriste potencijalnu energiju vode [6].

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

$$E = P \cdot t \quad (6)$$

gdje je t vrijeme rada hidroelektrane [1].

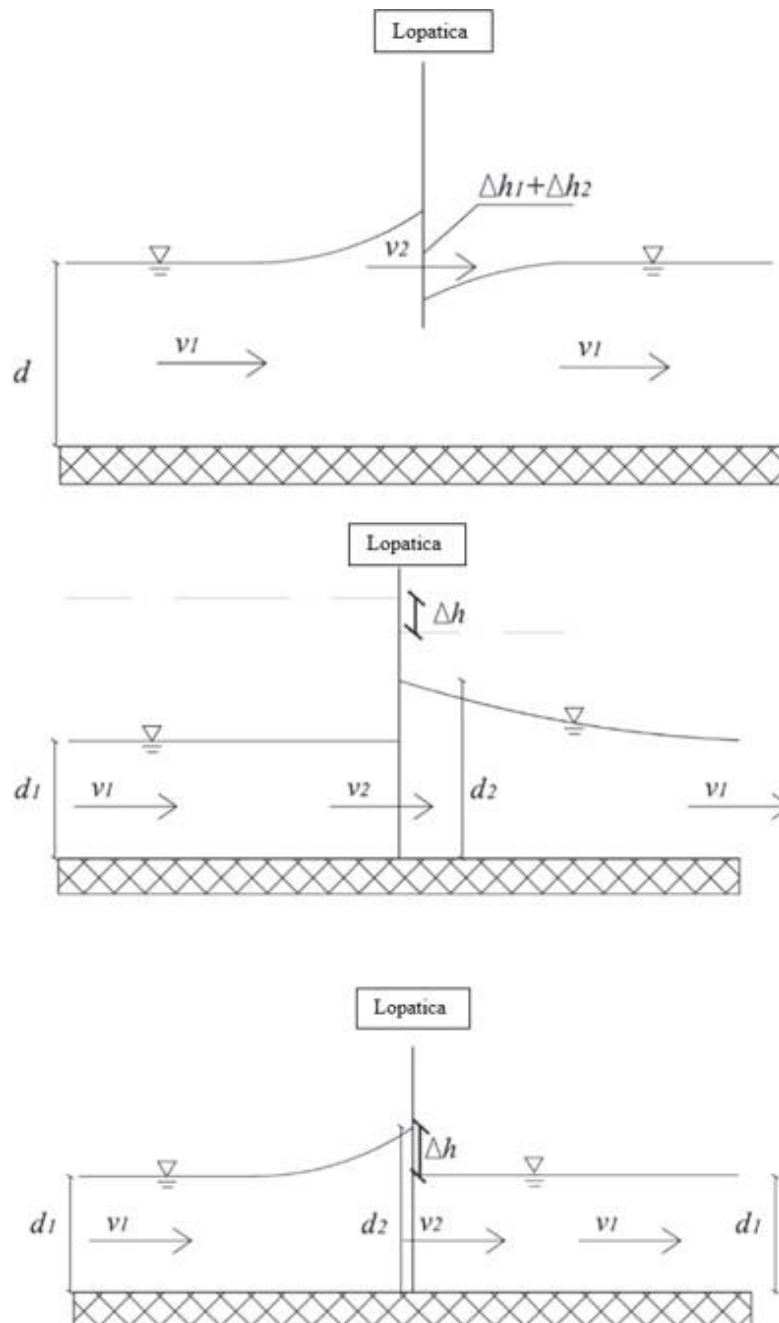
Funkcija turbine je transformacija kinetičke energije vode u mehaničku energiju rotirajućih dijelova turbine. Postoji mnogo različitih tipova turbina kako bi se pokrio široki raspon uvjeta koji proizlaze iz konfiguracije terena odnosno različitih kombinacija protoka i pada. U velikom broju slučajeva turbine koje se koriste kod malih hidroelektrana su umanjene verzije turbina koje se koriste u konvencionalnim velikim hidroelektranama. Izbor tipa, oblika i dimenzija turbine prvenstveno ovisi o neto padu, instaliranom (projektiranom) protoku, brzini vrtnje, koja određuje tip i osnovni oblik rotora turbine i ostalih dijelova, najvećoj brzini koja se može postići bez priključenog električnog opterećenja, troškovima izgradnje male hidroelektrane [7].

S obzirom da turbine znaju imati značajan utjecaj na okoliš zato što zahtijevaju cijevi pod tlakom, difuzor i rešetke kako bi se izbjegao prolaz sedimenata i ribe kroz samu turbinu, a neke od njih nisu ni prikladne zbog male brzine protoka pri čemu može doći do kovitlanja toka, u posljednjim desetljećima na tržište uvedeni su 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 [1].

Uz osnovne prikazane 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.

Slika 2 prikazuje segment lopatice vodnog kola kod kretanja vode za plitki tok: a) mirni režim tečenja, b) siloviti režim tečenja te za c) duboki tok. Plitki tok podrazumijeva dubinu približno jednaku visini lopatice vodnog kola. Minimalna energija nizvodnog toka, odnosno maksimalna proizvodnja energije će se postići kada dubina dosegne kritičnu dubinu.



Slika 2. Grafički prikaz ponašanja mlinskog kola za tri različita oblika tečenja [1].

Za pravokutni poprečni presjek, režim tečenja definira se putem kritične dubine jednačba (7), odnosno Froudeovog broja Fr jednačba (8) [1], [14],

$$d_{kr} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot B}} \quad (7)$$

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (8)$$

Za sve dubine d manje od d_{kr} , tok je silovit. Ukoliko je d veći od d_{kr} , tok je miran. Dubina d jednaka kritičnoj dubini d_{kr} podrazumijeva kritični tok. Kod Froudeovog broja, $FR = 1$ podrazumijeva kritični tok, FR manji od 1 mirni, dok FR veći od 1 podrazumijeva siloviti tok.

2.1. Vodno kolo u mirnom toku kretanja vode

Najjednostavniji pokušaj procjene izlazne snage vode P opisan je u jednadžbi [9]. 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:

$$P = \rho A (v_1 - v_2)^2 v_2 \quad (9)$$

gdje je A uronjeno područje lopatice, v_1 ulazna brzina vode i v_2 brzina okretanja lopatica vodnog kola (obodna brzina), dok je ρ gustoća vode. Teoretski model prikazuje najveću snagu kada je omjer v_2/v_1 jednak 0.33.

Brzina okretanja lopatica vodnog kola, tj. obodna brzina v_2 dobije se pomoću poznatog izraza:

$$v_2 = \frac{2r\pi}{T} = 2r\pi f \quad (10)$$

Gdje je T period rotacije (okretaja) najčešće izražen u minutama ili sekundama, a f frekvencija, odnosno broj okretaja u jedinici vremena (minute ili sekunde).

Sređivanjem odnosno pojednostavljenjem jednadžbe (9), dobiva se općenita jednadžba za proračun snage turbine koja koristi kinetičku energiju:

$$P_{kin} = \frac{1}{2} \rho A C_p v_1^3 \quad (11)$$

Uvrštavanjem koeficijenta C_p u jednadžbu (9), koji u stvari izražava učinkovitost turbine, dobije se izraz koji predstavlja izlaznu snagu turbine u obliku vodenice:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p v_1^3 \quad (12)$$

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 (12) 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.

Voda teče prema mlinskom kolu, stoga se gornja razina vode može povećavati 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 η jednaka:

$$\eta = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{d_1}{d_2}\right) \quad (13)$$

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 (13) je veća nego ona dobivena eksperimentalnim rezultatima u odnosu na učinkovitost iz jednadžbe (12). Pri tome vrijedi da je $0.6 \leq d_1/d_2 \leq 0.9$. Uzimanjem u obzir gubitaka uslijed turbulencije tečenja vode, izlazna snaga turbine može se procijeniti kao:

$$P = \eta P_{in} - \gamma Q_l \Delta H - K v_m^3 \quad (14)$$

gdje je:

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

η – učinkovitost procijenjena jednadžbom (13)

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 jednačbe (7-9). Za učinkovitost kinetičke turbine, odnosno vrijednost koeficijenta snage usvaja se $C_p = 0,30$, tj. 30 %.

2.2. Vodno kolu u silovitom toku kretanja vode

Izlazna snaga turbine u obliku vodnog kola za ovaj režim kretanja vode dobije se preko sljedeća tri izraza [14].

$$P = \rho_w \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h \quad (15)$$

$$\Delta h = d_1 + \frac{v_1^2}{2g} - (d_2 + \frac{v_2^2}{2g}); \Delta h \geq 0 \quad (16)$$

$$d_2 = \frac{v_1}{v_2} \cdot d_1 \quad (17)$$

2.3. Vodno kolo u dubokom toku vode

Duboki tok vode podrazumijeva dubinu veću od visine lopatica vodnog kola [1].

Kako bi se postigla točnija procjena, izlazna snaga može se izračunati uzimajući u obzir prikazani idealni proces za duboki tok na slici 2, koji ovisi o sili kojom na uronjenu lopaticu djeluje izmjena momenta sa malom razlikom visine. Na ovaj način se izlazna snaga može procijeniti pomoću izraza [14].:

$$P = \rho g \frac{b}{2} [(d_1 + \Delta h_1)^2 - (d_1 - \Delta h_2)^2] \cdot v_2 + \rho b (d_1 + \Delta h_1)^2 \cdot (v_1 - v_2)^2 \cdot v_2 \quad (18)$$

3. HIDROLOŠKA ANALIZA PROMATRANE LOKACIJE

Hidrološka analiza izvršiti će se s obzirom na postojeće podatke mjernih postaja na rijeci Donjoj Dobri te na osnovu provedenih hidrometrijskih mjerenja u blizini razmatrane lokacije Matinog mlina. Također, na izlaznom kanalu iz vodnog kola provedena su hidrometrijska mjerenja. Nakon izlaza iz HE Gojak u Karlovačkoj županiji od voda Gornje Dobre i Zagorske Mrežnice, formirana je Donja Dobra. Protiče surovim krajem, nepristupačnih obala, visokih strmih litica i jedinstvene ljepote. Nizvodno od mosta u mjestu Trošmarija, nastavlja se teško pristupačni klanac dug oko 13 kilometara, s 15 manjih ili većih slapova i brzaka. Rijeka je široka od 15 do 25 metara, kod srednjeg vodostaja do 4 metra dubine. Dno je izrazito neravno i nepravilno, s naglim izdignućima, kanalima i rupama. Razlog tome je tektonski rasjed koji se prostire cijelim koritom [9].

Sliv rijeke Dobre smješten je između $45^{\circ}15'$ i $45^{\circ}34'$ N te $14^{\circ}56'$ i $15^{\circ}32'$ E. Tok rijeke Dobre moguće je podijeliti na tri djela. Tok Gornje ili Ogulinske Dobre dug je 51,2 km. Rijeka ponire u Đulinom ponoru koji se nalazi u samom gradu Ogulinu. Drugi dio, tj. podzemni tok rijeke Dobre, protječe kroz do danas otkriveni sustav krških kanala i kaverni dug 16.396 m čija visinska razlika između najviše i najniže točke iznosi 83 m. Na površinu voda izbija kod sela Gojak, kroz niz stalnih i povremenih krških izvora. Treći dio ovog vodotoka pod nazivom Donja Dobra s ušćem u rijeku Kupu dug je 52,1 km. Duž površinskih tokova kako Gornje tako i Donje Dobre postoje brojne tzv. suspendirane dionice duž kojih se u određenim hidrološko-hidrogeološkim situacijama gubi voda u krško podzemlje. U gornjem dijelu Gornje Dobre vodotok ima karakteristike brdskog bujičnog vodotoka, dok u najnižvodnijem dijelu Donje Dobre, prije ušća u rijeku Kupu, ima karakteristike nizinskog vodotoka. Hidroelektrana Gojak kao i akumulacija Sabljaki izgrađena je 1959.godine dok je hidroelektrana Lešće s radom počela 2010.godine a nalazi se oko dvanaest kilometara nizvodno od HE Gojak na Donjoj Dobri [11].

Na slici 3 prikazane su dvije mjerne hidrološke postaje Lešće Toplice i Stative Donje na lokaciji Donja Dobra.



Slika 3. Lokacije Matinog mlina i mjernih postaja na vodotoku Donja Dobra [12].

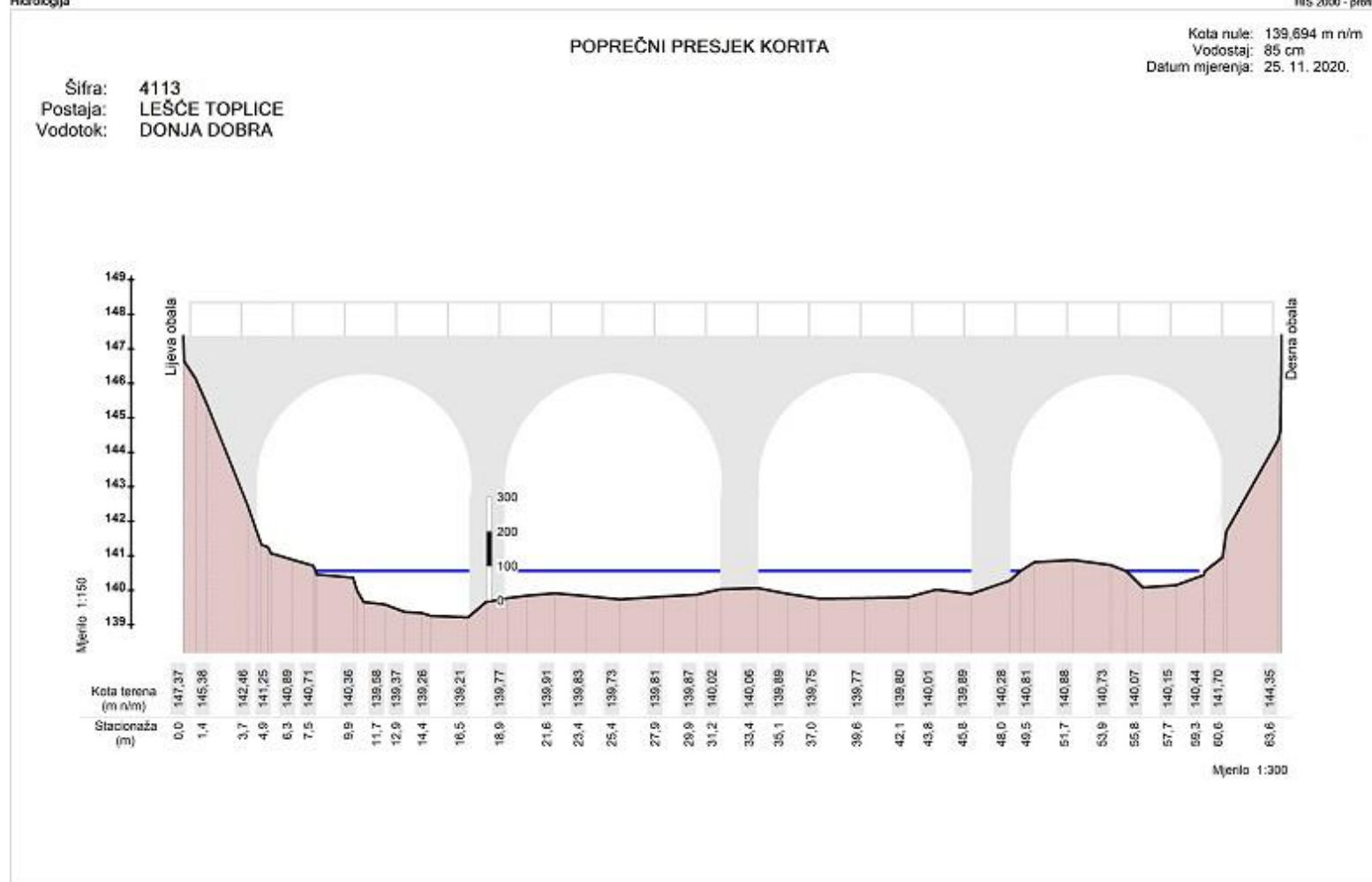
3.1. Mjerna postaja Lešće Toplice

Mjerna postaja Lešće Toplice je automatska mjerna postaja puštena u rad 1946. godine. Pripada vodotoku Donja Dobra topografske površine sliva 608,000 km² [12]. Na slici 4 prikazan je poprečni presjek korita rijeke Donje Dobre, mjerna postaja Lešće Toplice. Posljednje mjerenje poprečnog profila izvršeno je 25.11.2020 godine pri kojem visina vodostaja iznosi 85 cm.

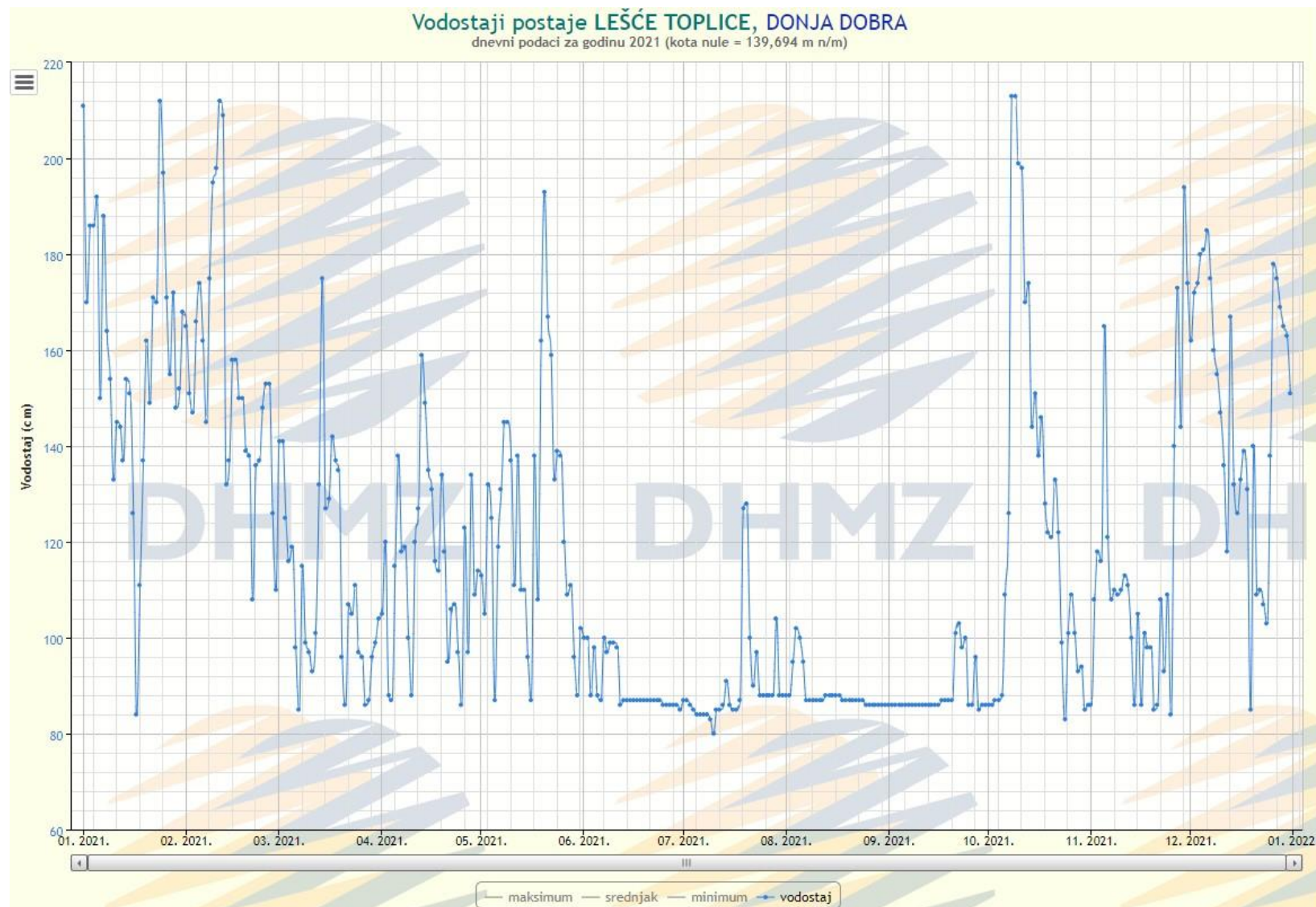
U tablici 1 prikazani su ekstremi izmjereni tijekom rada postaje, dok su na slici 5 prikazani vodostaji postaje Lešće toplice za 2021. godinu. Protoci izmjereni tijekom 2021. godine vidljivi su na slici 6.

Tablica 1. Prikaz rezultata mjerenja na mjernoj postaji Lešće Toplice [12].

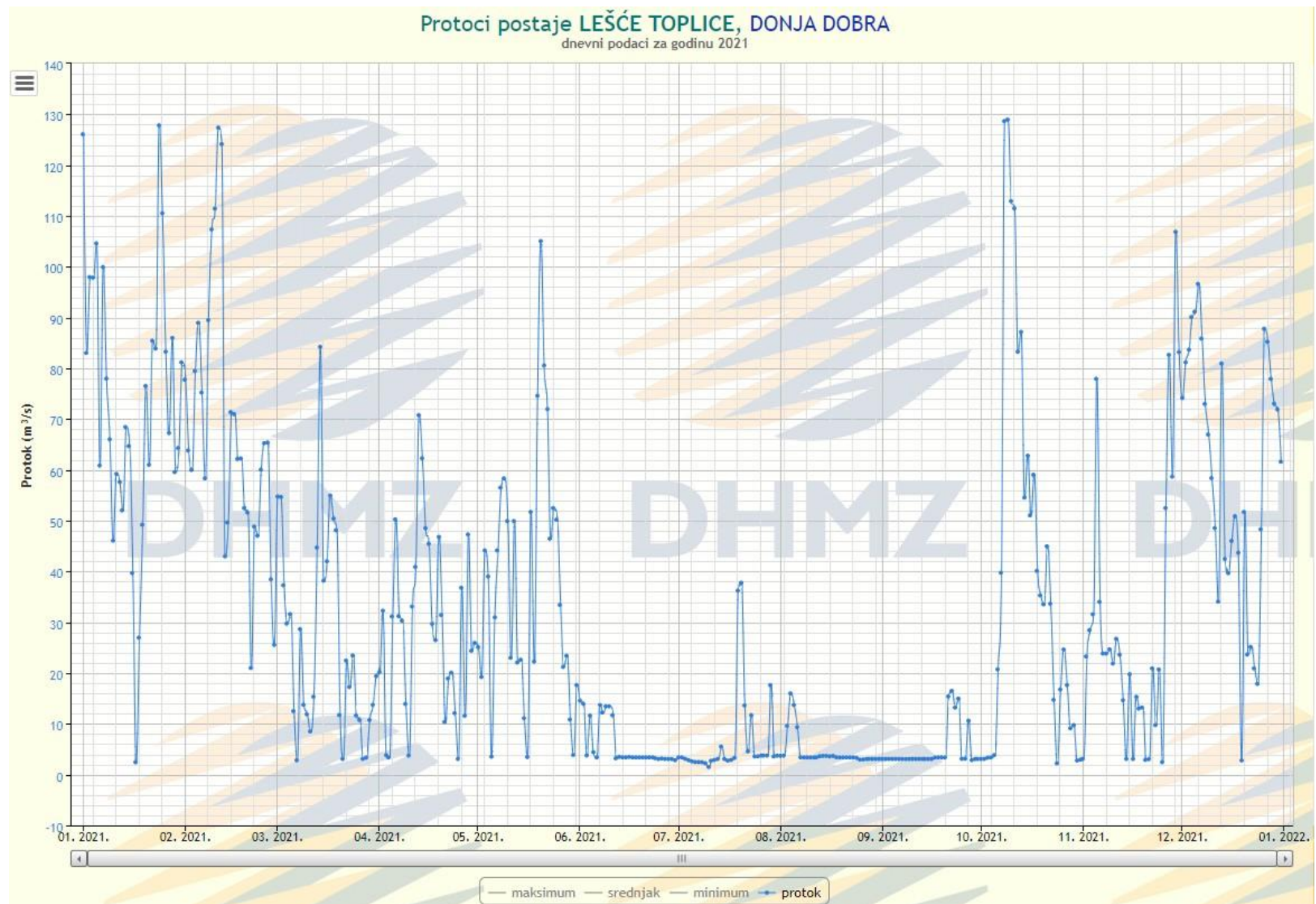
	Razdoblje:	Ekstremi:
Vodostaj	1962. – 2021.	Minimum: 17 cm, datum: 29.06.2009. Maksimum: 276 cm, datum: 12.11.2013.
Protok	1946. – 2021.	Minimum: 0,001 m ³ /s, datum: 16.08.1946. Maksimum: 205,9 m ³ /s, datum: 17.05.1991.
Temperatura	1988. – 1988.	Minimum: 2 °C, datum: 24.11.1988. Maksimum: 21 °C, datum: 25.07.1988.



Slika 4. Poprečni presjek rijeke Donje Dobre, mjerna postaja Lešće Toplice [12]

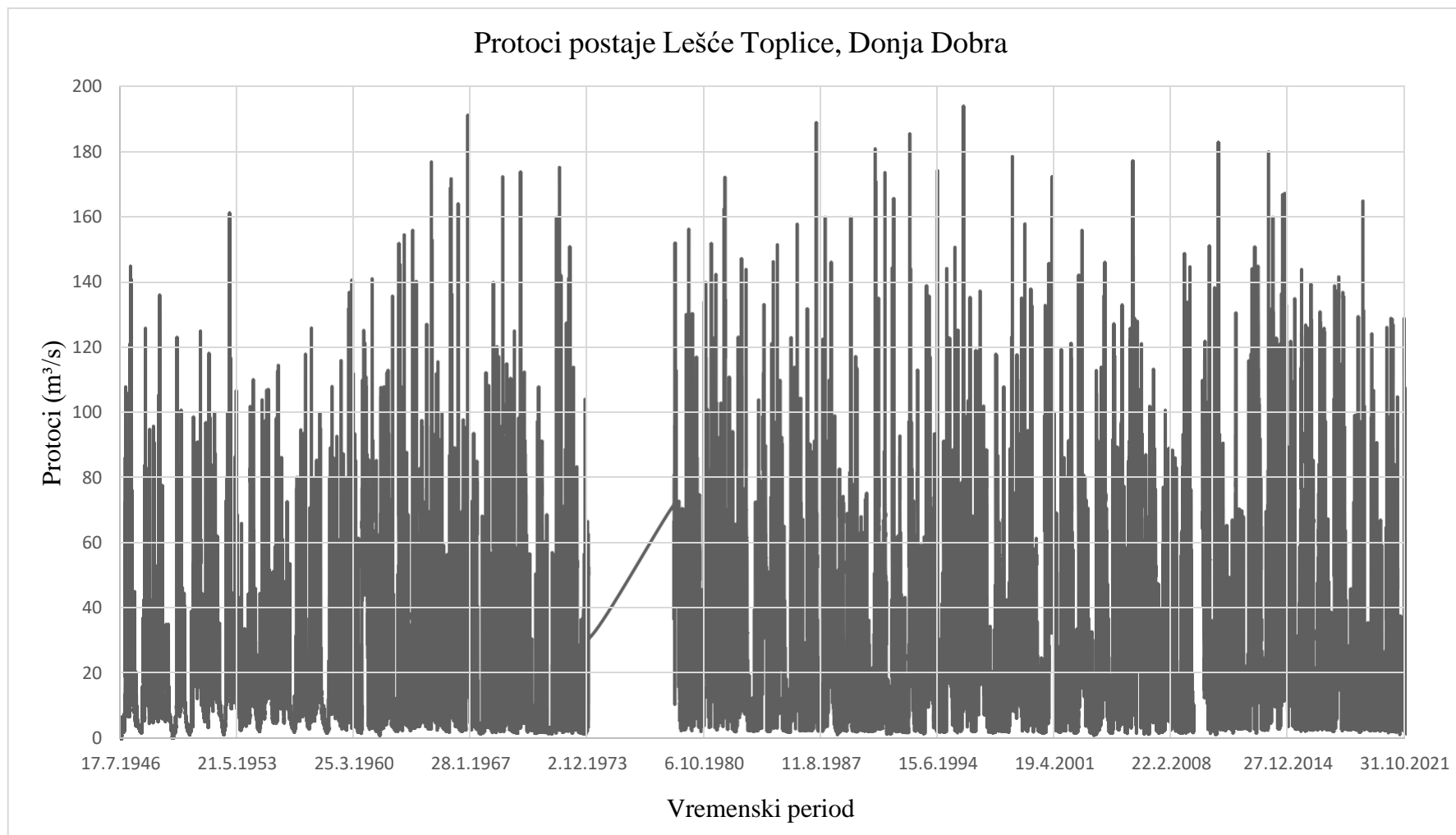


Slika 5. Vodostaji rijeke Donje Dobre izmjereni na mjernoj postaji Lešće Toplice [12]

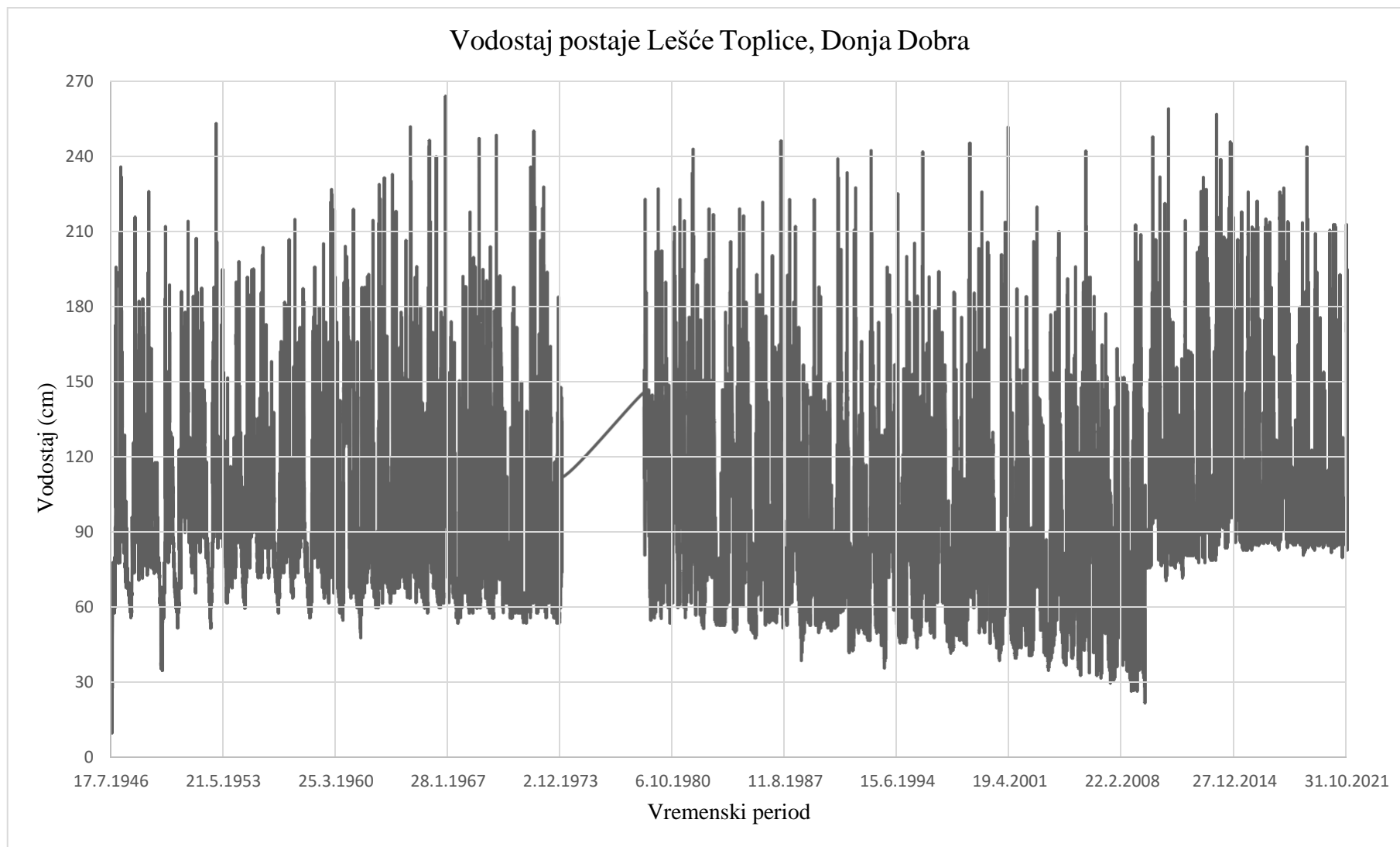


Slika 6. Srednji dnevni protoci rijeke Donje Dobre izmjereni na mjernoj postaja Lešće Toplice [12]

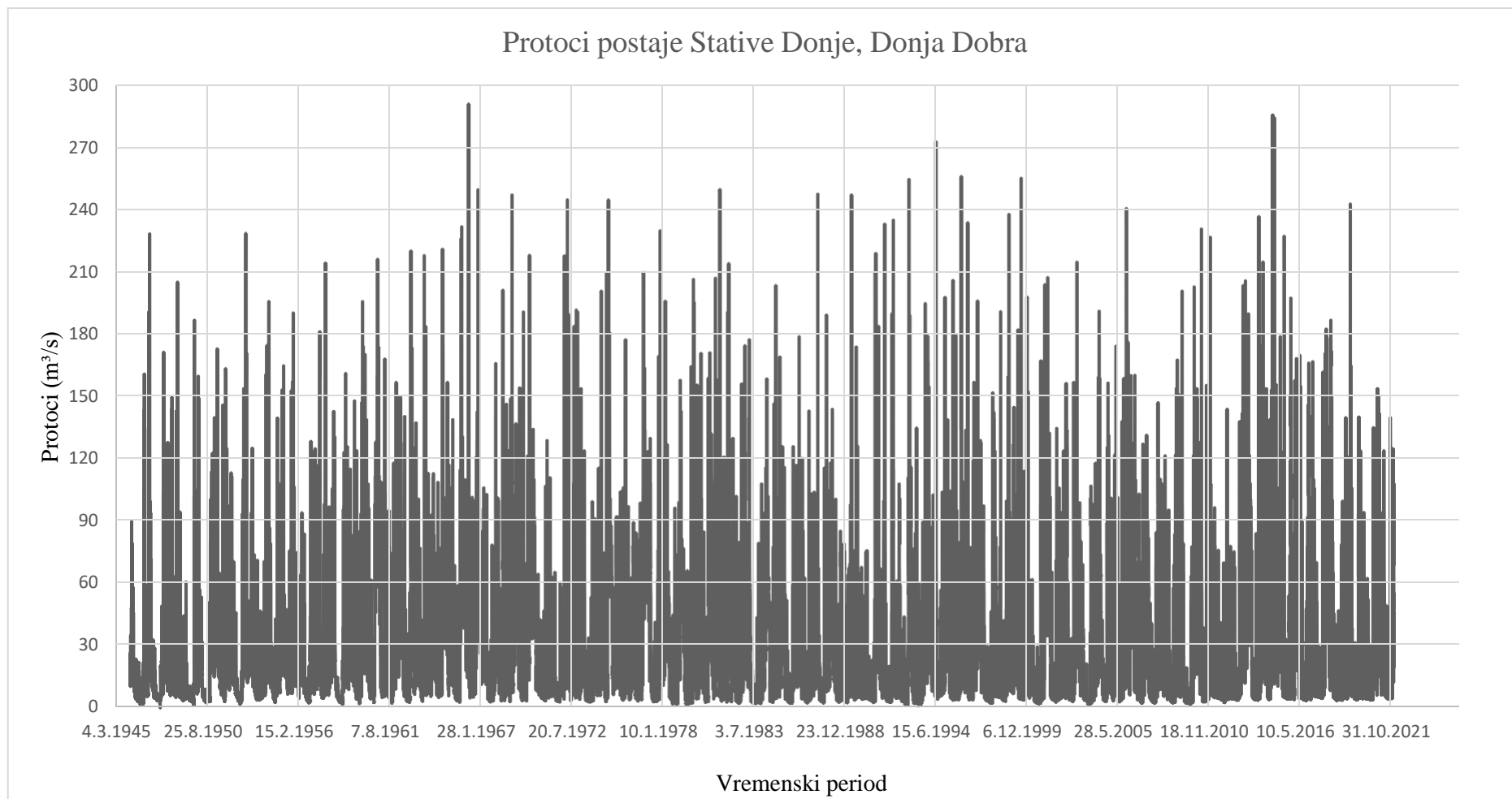
Zbog boljeg uvida u hidrološke karakteristike rijeke Donje Dobre na mjernoj postaji Lešće Toplice na slikama 7 i 8 prikazan je niz srednjih dnevnih protoka i vodostaja za vremenski period od 1946. godine do 2021. godine.



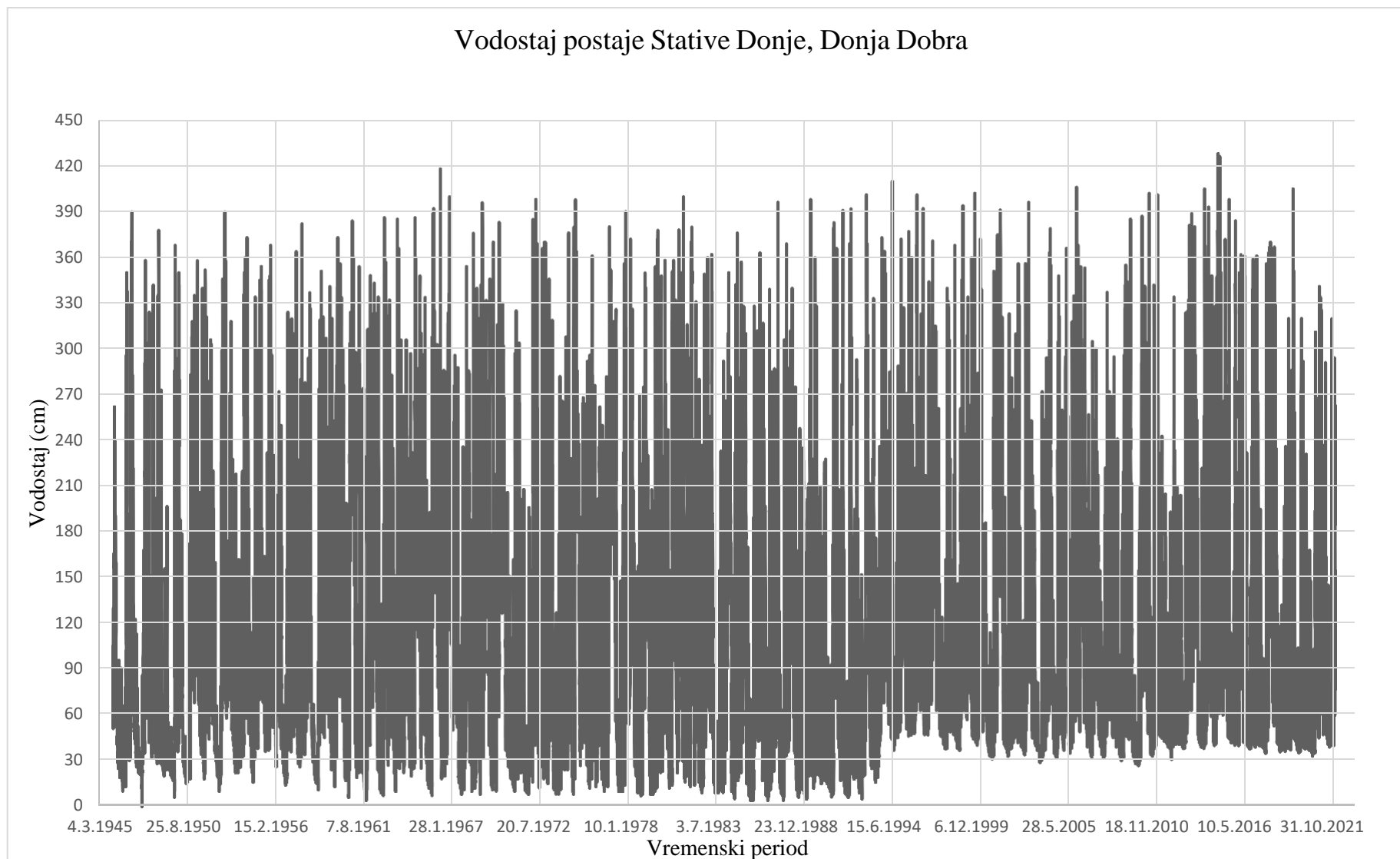
Slika 7. Srednji dnevni protoci u razdoblju od 1946. godine do 2021.godine za mjernu postaju Lešće Toplice, Donja Dobra [12]



Slika 8. Srednji dnevni vodostaji u razdoblju od 1946. godine do 2021.godine za mjernu postaju Lešće Toplice, Donja Dobra [12]



Slika 9. Srednji dnevni protoci u razdoblju od 1946. godine do 2021.godine za mjernu postaju Stative Donje, Donja Dobra [12]

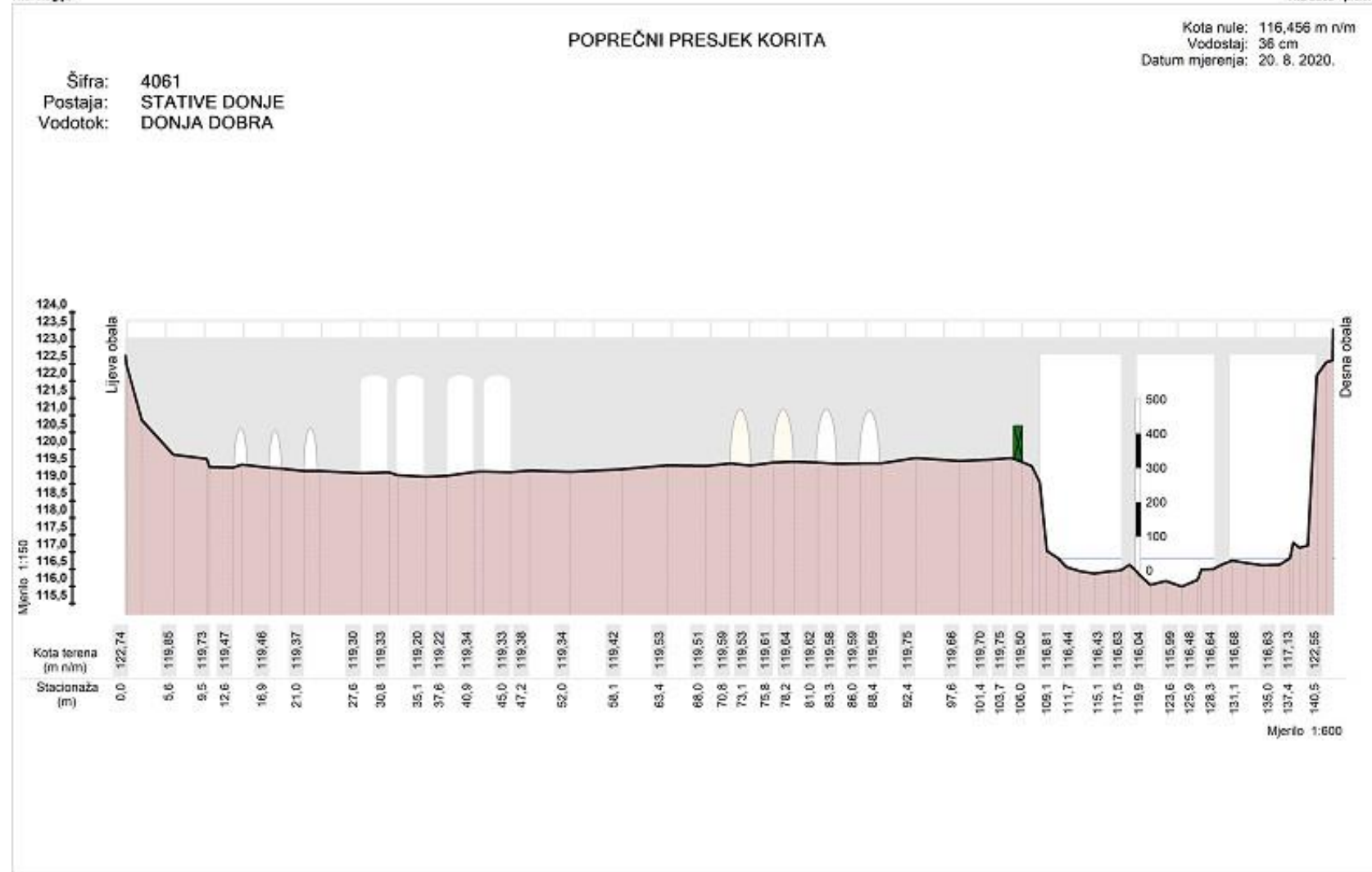


Slika 10.Srednji dnevni vodostaji u razdoblju od 1946. godine do 2021.godine za mjernu postaju Stative Donje, Donja Dobra [12]

Zbog boljeg uvida u hidrološke karakteristike rijeke Donje Dobre na mjernoj postaji Stative Donje, na slikama 9 i 10 prikazan je niz srednjih dnevnih protoka i vodostaja za vremenski period od 1946. godine do 2021. godine.

3.2. Mjerna postaja Stative Donje

Stative Donje je automatska mjerna postaja, puštena je u rad 1939. godine, pripada vodotoku Donja Dobra ukupne topografske površine sliva 1008,000 km² [12]. Na slici 11 prikazan je poprečni presjek korita rijeke Donje Dobre, mjerna postaja Stative Donje. Posljednje mjerenje poprečnog profila izvršeno je 20.08.2020. godine, pri kojem visina vodostaja iznosi 38 cm.

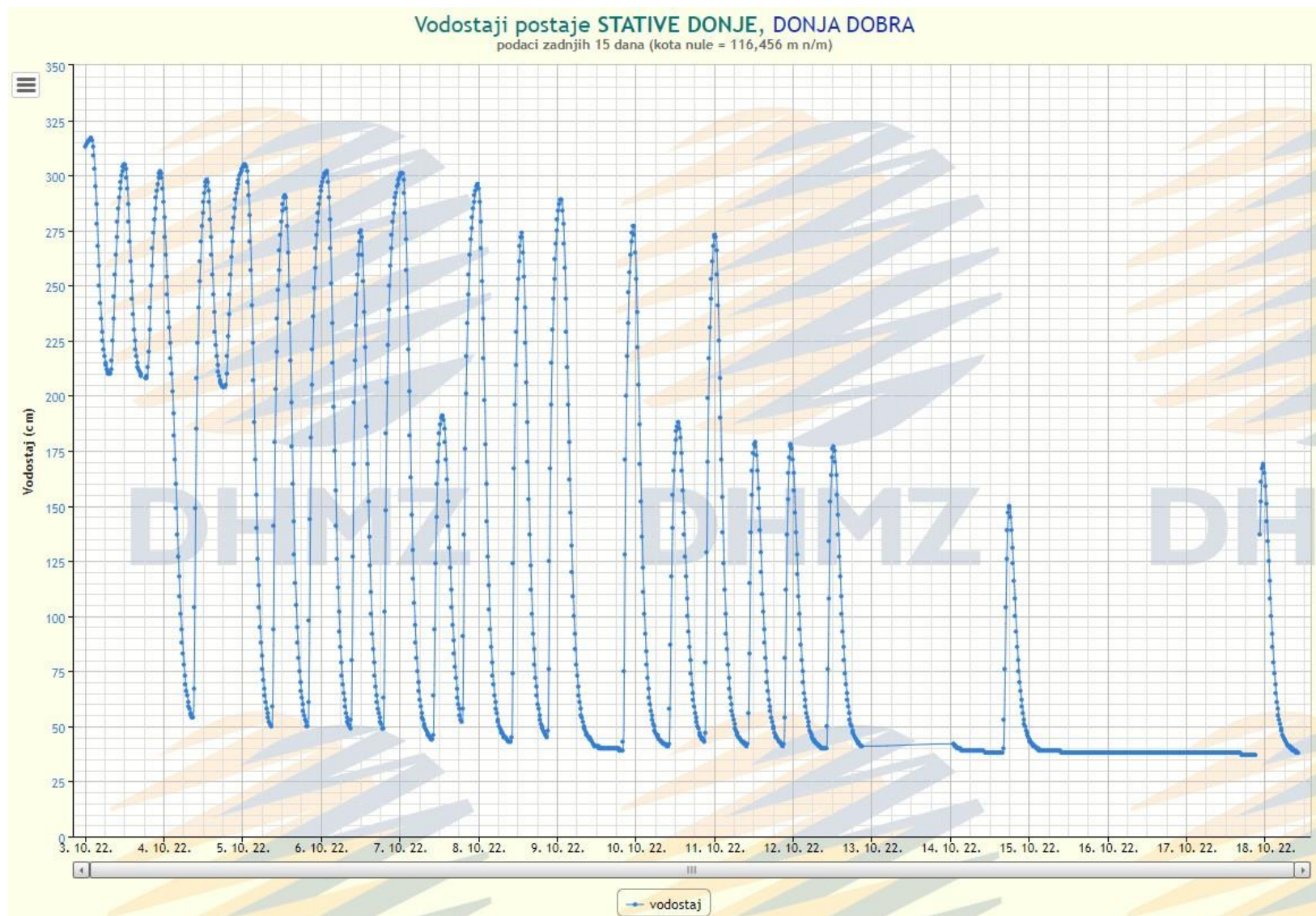


Slika 11. Poprečni presjek rijeke Donje Dobre, mjerna postaja Stative Donje [12]

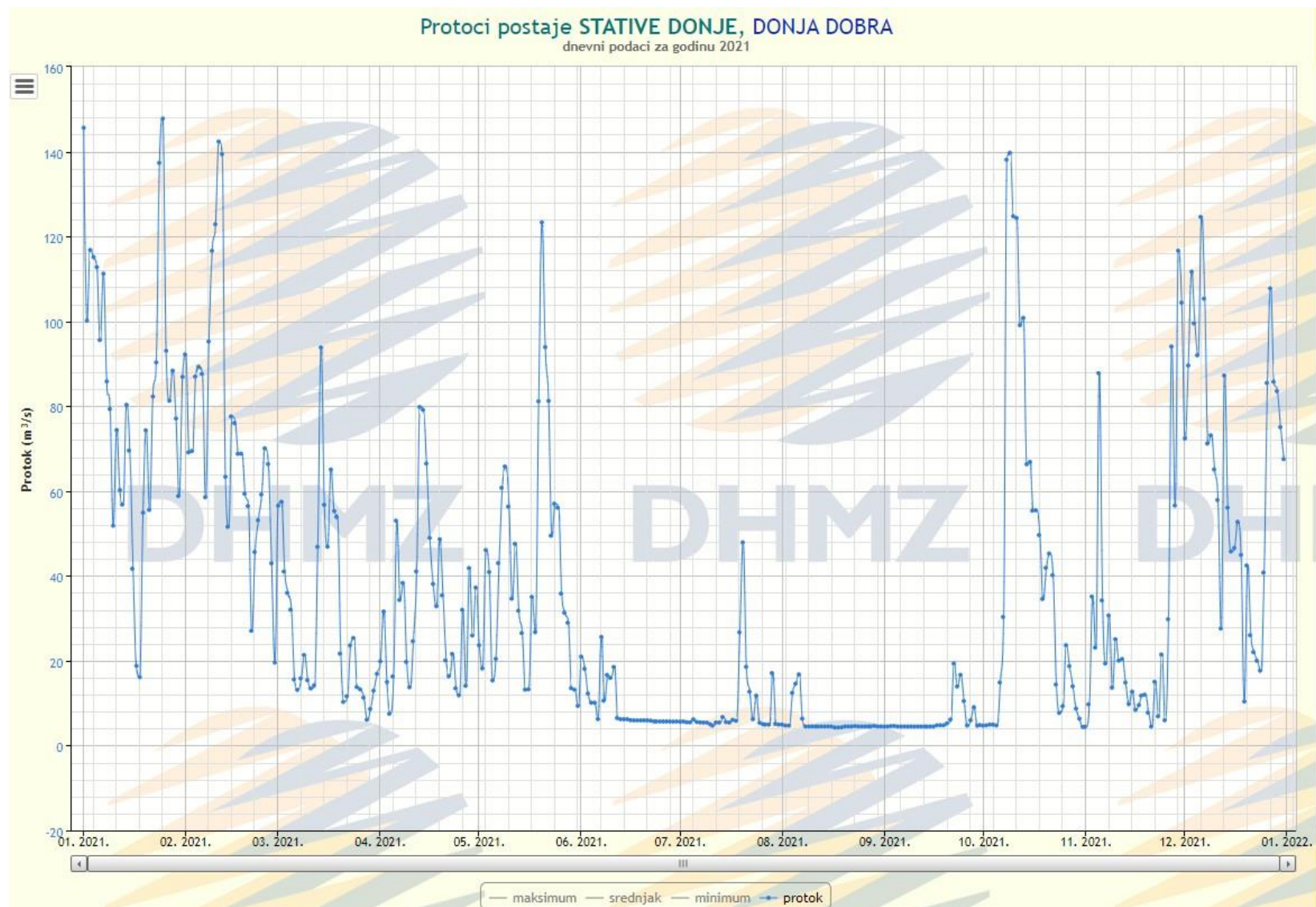
Tijekom godina rada zabilježeni su ekstremi kod vodostaja, protoka i temperature što je vidljivo u tablici 2. Na slici 12 prikazani su vodostaji postaje Stative Donje za 2021. godinu, dok su protoci izmjereni tijekom 2021. godine vidljivi na slici 13.

Tablica 2. Prikaz rezultata mjerenja postaje Stative Donje [12]

	Razdoblje:	Ekstremi:
Vodostaj	1946. – 2021.	Minimum: 0 cm, datum: 25.10.1947. Maksimum: 460 cm, datum: 29.07.1999.
Protok	1946. – 2021.	Minimum: 0,362 m ³ /s, datum: 25.10.1947. Maksimum: 405,5 m ³ /s, datum: 29.07.1999.
Temperatura	1957. – 2021.	Minimum: 0,0 °C, datum: 04.12.1973. Maksimum: 27,4 °C, datum: 27.06.1983.



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



Slika 13. Protoci rijeke Donje Dobre na mjernoj postaji Stative Donje [12]

3.3. Provođenje hidrometrijskih mjerenja na rijeci Donjoj Dobri u blizini Matinog mlina

3.3.1. Postupak mjerenja pomoću uređaja Flow Tracker2

Mjerenja protoka rijeke Donje Dobre izvršena su na dvije lokacije prikazane na slici 14. Prva lokacija se nalazi neposredno ispod restorana „Papalina“ i na toj lokaciji su izvršena tri mjerenja dana 29.04.2022., 30.06.2022. i 19.07.2022., dok se druga lokacija nalazi na profilu rijeke Dobre nizvodno od Matinog mlina.



Slika 14. Satelitski prikaz lokacija mjerenja [4]

Sva navedena mjerenja izvršena su pomoću ultrazvučnog mjerača protoka Flow Tracker2 mjereni su brzina i protok vode na lokacijama 1 i 2.

Na rijeci Donjoj Dobri u Jaškovu dana 30.04.2022. izvršena su mjerenja brzine i protoka vode. Mjerenja su izvršena na profilu neposredno ispod restorana „Papalina“ koji se nalazi na istoj lokaciji. Mjerenja brzine i protoka vode izvode se pomoću ultrazvučnog uređaja Flow Tracker2 pri čemu je kao pomoć mjerenju korištena mjerna traka. Mjerna traka služi za određivanje pravilnog razmaka po dužini profila kanala, u ovome slučaju raster iznosi 2.0 metra (Slika 15.), budući da se prema ISO standardu uzima 1/20 širine rijeke.



Slika 15. Postavljanje mjerne trake na profilu rijeke Dobre [8]

Na samom početku mjerenja potrebno je definirati prikladno mjesto za mjerenje, a to je ono mjesto gdje je najmanje bujna vegetacija. Nakon odabira profila i postavljanja mjerne trake slijedi priprema uređaja i kontrolna provjera podataka kako bi mjerenje bilo što preciznije i kvalitetnije. Postupak mjerenja kreće tako da se uređaj postavi na početnu točku, pri čemu se zadaje lokacija i operater koji izvršava mjerenje.

Na slici 16 prikazan je postupak mjerenja sa Flow Tracker2 ultrazvučnim uređajem. Uređaj je fiksiran na način da je postavljen vertikalno i usmjeren je okomito na poprečni presjek. Sonda uređaja usmjerena je suprotno u odnosu na smjer tečenja. Mjerenje traje 40 sekundi za svaku točku, mjestima gdje je rijeka Dobra dublja od 0,5 metra mjerenje je izvršeno na dvije dubine na istoj mjernoj točki. Zatim uređaj za svaki dio presjeka izračunava srednju brzinu, površinu i protok. Nakon završetka mjerenja na profilu, softver unutar uređaja izvršava analizu/proračun.



Slika 16. Postupak mjerenja Flow Tracker2 ultrazvučnim uređajem [8]

Hidrološki uvjeti su zadovoljavajući, odnosno dotok vode na vodno kolo je uvijek osiguran. Ekstremni uvjeti kod poplava, koji mogu dovesti do plavljenja dovodnog kanala, odnosno vodnog kola mogu prouzročiti prekid rada, no to je kratkotrajno, nekoliko puta u godini u trajanju nekoliko dana. Sušni periodi ne utječu na protok rijeke Donje Dobre, odnosno na dotok vode na vodno kolo, budući da se pred ulaznom zapornicom nalazi mala akumulacija u koju se uvijek skuplja voda.

Dizanja razine vode, odnosno povećanja protoka zbog ispuštanja vode iz akumulacije HE Lešće ne utječu na ulazak vode u dovodni kanal, budući da spomenuta akumulacija, kao i slap/prag prelijevaju sav višak vode u vodotok rijeke Dobre. Slapište je izgrađeno još u vrijeme Austrougarske monarhije upravo radi osiguranja dovoljne količine vode na mlin, kao i za zaštitu od prelijevanja. U pravilu, sav višak vode iz akumulacije HE Lešće ispušta se tijekom noći radi opasnosti za kupaće koji se tijekom dana nalaze u blizini analizirane lokacije Matinog mlina.

3.3.2. Rezultati mjerenja – Flow Tracker 2 uređaj

Mjerenja pomoću uređaja FlowTracker2 izvršena su na lokacijama prikazanim na slici 14. Nakon što je mjerenje završeno podaci iz uređaja prebacuju se na računalo i obrađuju. Rezultat obrade podataka na računalu je izvještaj u .pdf ili .csv obliku. Izvještaj se sastoji od nekoliko stranica.

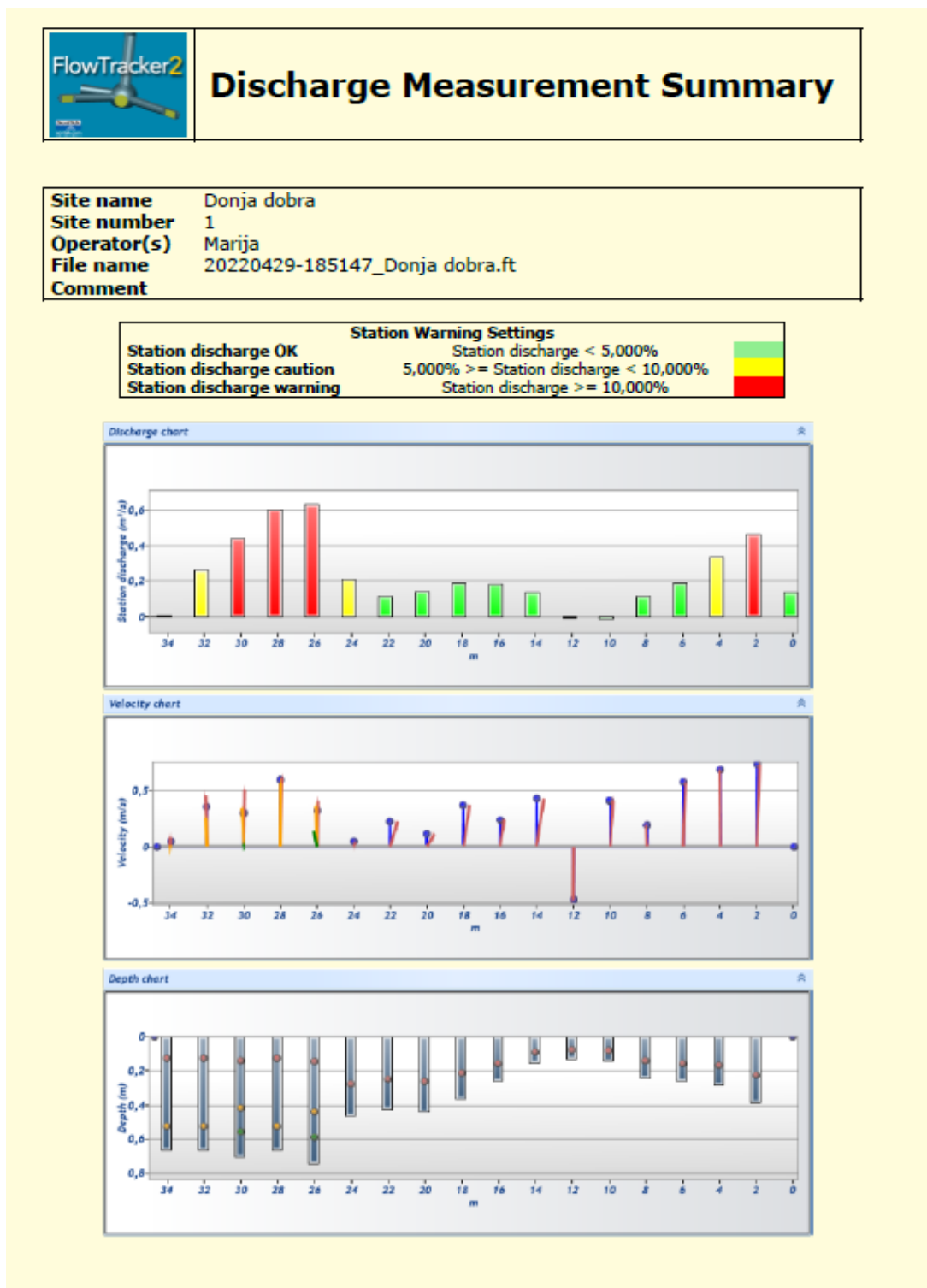
3.3.2.1. Mjerenje br.1 - Lokacija 1

Prvo mjerenje pomoću uređaja FlowTracker2 izvršeno je 29.04.2022. Prva stranica izvještaja sadrži općenite informacije o mjerenju i lokaciji (Slika 20.)

FlowTracker2		Discharge Measurement Summary			
Site name	Donja dobra	Start time	29.4.2022. 17:52		
Site number	1	End time	29.4.2022. 18:49		
Operator(s)	Marija	Start location latitude	45,551		
File name	20220429-185147_Donja dobra.ft	Start location longitude	15,472		
Comment		Calculations engine	FlowTracker2		
Sensor type	Top Setting	Handheld serial number	FT2H2025030		
Handheld serial number	FT2H2025030	Probe serial number	FT2P2024010		
Probe serial number	FT2P2024010	Probe firmware	1.30		
Probe firmware	1.30	Handheld software	1.7		
Handheld software	1.7				
# Stations	19	Avg interval (s)	40	Total discharge (m³/s)	4,184
Total width (m)	34,700	Total area (m²)	13,451	Wetted Perimeter (m)	35,033
Mean SNR (dB)	16,026	Mean depth (m)	0,388	Mean velocity (m/s)	0,311
Mean temp (°C)	14,104	Max depth (m)	0,740	Max velocity (m/s)	0,729
Discharge Uncertainty		Discharge equation		Mean Section	
Category	ISO IVE	Discharge uncertainty		IVE	
Accuracy	1,0 %	Discharge reference		Rated	
Depth	0,2 %				
Velocity	0,6 %				
Width	0,2 %				
Method	1,7 %				
# Stations	2,6 %				
Overall	3,4 %				
		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 17. Prva stranica izvještaja za mjerenje br.1 [8]

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 (Slika 21.).



Slika 18. Druga stranica izvještaja za mjerenje br.1 [8]

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 22.).



Discharge Measurement Summary

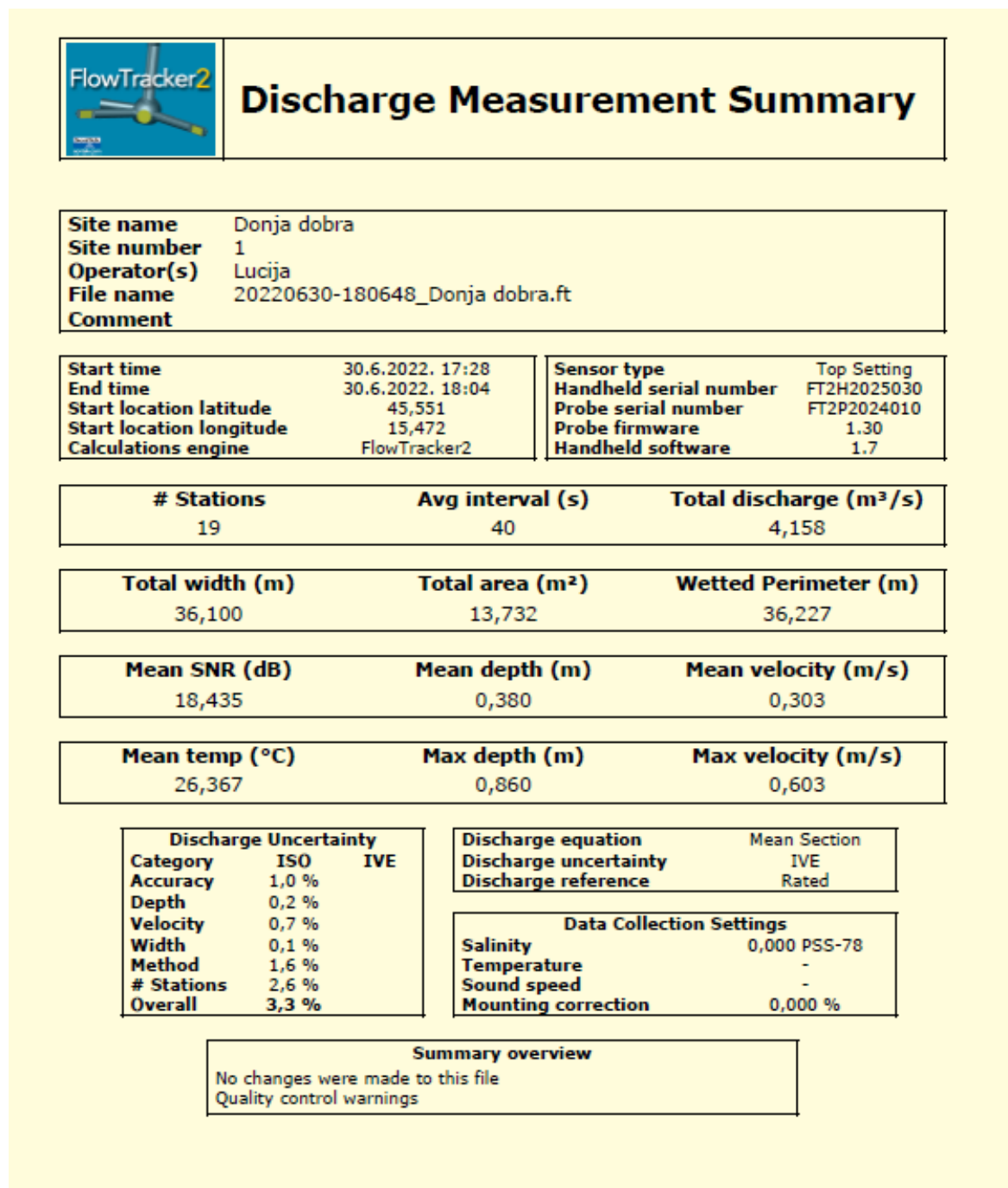
Site name	Donja dobra
Site number	1
Operator(s)	Marija
File name	20220429-185147_Donja dobra.ft
Comment	

Measurement results													
St#	Time	Location (m)	Method	Depth (m)	%Depth	Measured Depth (m)	Samples	Velocity (m/s)	Correct on	Mean Velocity (m/s)	Area (m ²)	Flow (m ³ /s)	%Q
0	17:52	0,000	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,365	0,380	0,139	3,311 ✓
1	17:53	2,000	0,6	0,380	0,600	0,228	80	0,729	1,000	0,708	0,660	0,468	11,176 ✓
2	17:58	4,000	0,6	0,280	0,600	0,168	80	0,688	1,000	0,631	0,540	0,341	8,149 ✓
3	18:00	6,000	0,6	0,260	0,600	0,156	80	0,575	1,000	0,382	0,500	0,191	4,563 ✓
4	18:02	8,000	0,6	0,240	0,600	0,144	80	0,189	1,000	0,302	0,380	0,115	2,744 ✓
5	18:05	10,000	0,6	0,140	0,600	0,084	80	0,415	1,000	-0,032	0,270	-0,009	-0,207 ✓
6	18:07	12,000	0,6	0,130	0,600	0,078	80	-0,480	1,000	-0,027	0,280	-0,007	-0,178 ✓
7	18:10	14,000	0,6	0,150	0,600	0,090	80	0,426	1,000	0,332	0,410	0,136	3,258 ✓
8	18:17	16,000	0,6	0,260	0,600	0,156	80	0,238	1,000	0,305	0,620	0,189	4,515 ✓
9	18:19	18,000	0,6	0,360	0,600	0,216	80	0,371	1,000	0,240	0,800	0,192	4,597 ✓
10	18:21	20,000	0,6	0,440	0,600	0,264	80	0,110	1,000	0,167	0,860	0,143	3,427 ✓
11	18:23	22,000	0,6	0,420	0,600	0,252	80	0,224	1,000	0,130	0,880	0,115	2,743 ✓
12	18:25	24,000	0,6	0,460	0,600	0,276	80	0,037	1,000	0,178	1,200	0,213	5,101 ✓
13	18:27	26,000	0,2/0,6/0,8	0,740	0,200	0,148	80	0,411	1,000	0,455	1,400	0,637	15,220 ✓
13	18:27	26,000	0,2/0,6/0,8	0,740	0,600	0,444	80	0,361	1,000	0,455	1,400	0,637	15,220 ✓
13	18:27	26,000	0,2/0,6/0,8	0,740	0,800	0,592	80	0,141	1,000	0,455	1,400	0,637	15,220 ✓
14	18:34	28,000	0,2/0,8	0,660	0,200	0,132	80	0,616	1,000	0,446	1,360	0,607	14,502 ✓
14	18:34	28,000	0,2/0,8	0,660	0,800	0,528	80	0,567	1,000	0,446	1,360	0,607	14,502 ✓
15	18:37	30,000	0,2/0,6/0,8	0,700	0,200	0,140	80	0,508	1,000	0,328	1,360	0,447	10,674 ✓
15	18:37	30,000	0,2/0,6/0,8	0,700	0,600	0,420	80	0,339	1,000	0,328	1,360	0,447	10,674 ✓
15	18:37	30,000	0,2/0,6/0,8	0,700	0,800	0,560	80	0,018	1,000	0,328	1,360	0,447	10,674 ✓
16	18:41	32,000	0,2/0,8	0,660	0,200	0,132	80	0,460	1,000	0,199	1,320	0,263	6,286 ✓
16	18:41	32,000	0,2/0,8	0,660	0,800	0,528	80	0,252	1,000	0,199	1,320	0,263	6,286 ✓
17	18:44	34,000	0,2/0,8	0,660	0,200	0,132	80	0,078	1,000	0,021	0,231	0,005	0,118 ✓
17	18:44	34,000	0,2/0,8	0,660	0,800	0,528	80	0,007	1,000	0,021	0,231	0,005	0,118 ✓
18	18:49	34,700	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000 ✓

Slika 19. Treća stranica izvještaja za mjerenje br.1 [8]

3.3.2.2. Mjerenje br.2 – lokacija 1

Drugo mjerenje pomoću uređaja FlowTracker2 izvršeno je na lokaciji 1 dana 30.06.2022.godine (Slika 23).






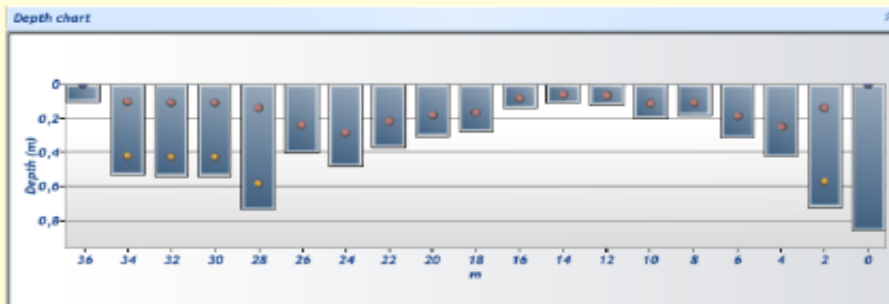
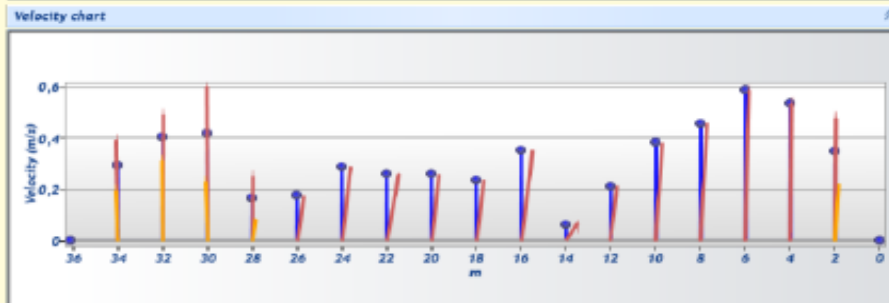
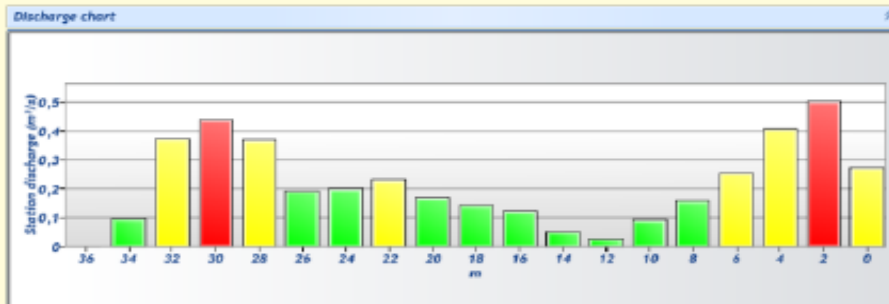
Slika 20. Prva stranica izvještaja mjerenja br.2 – lokacija 1 [8]



Discharge Measurement Summary

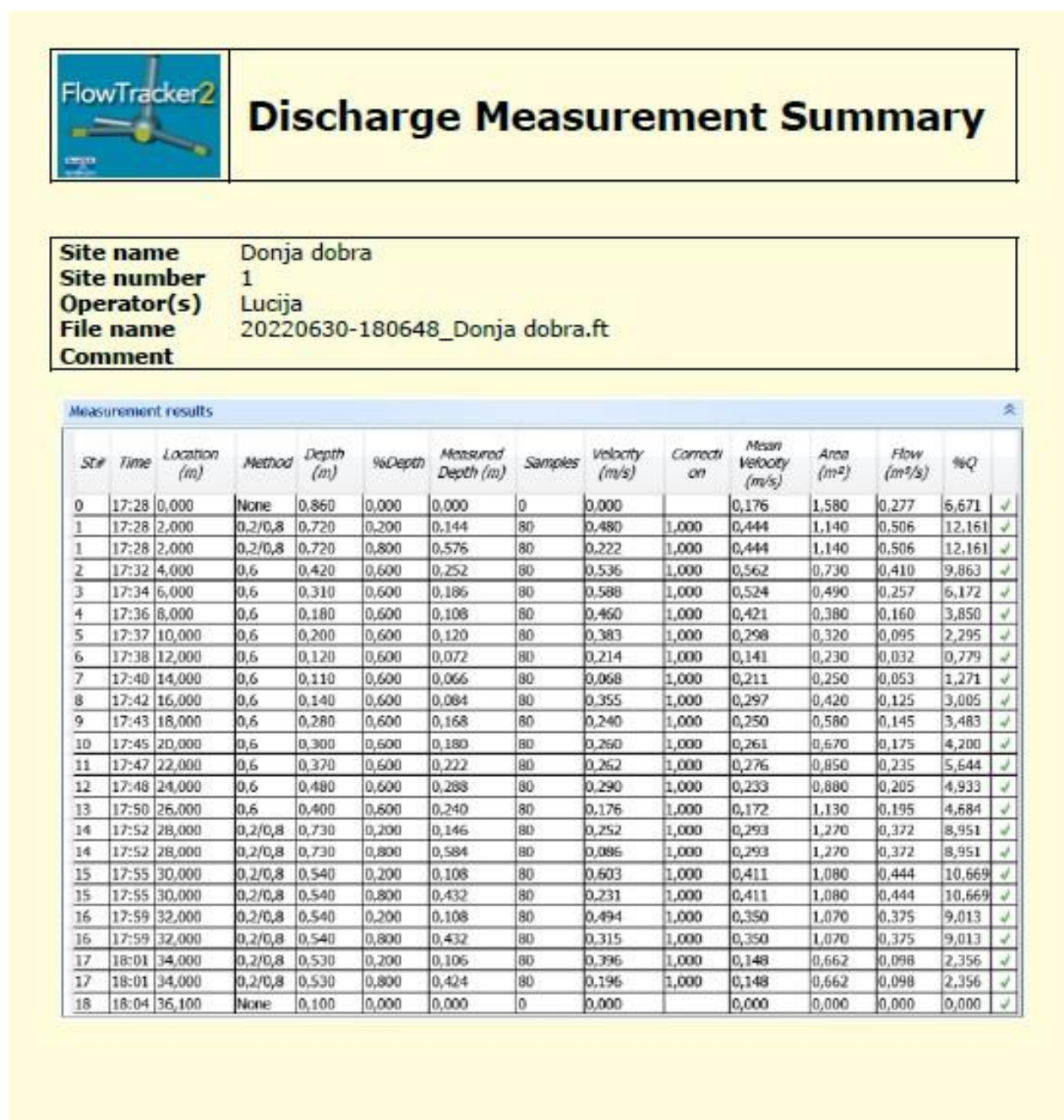
Site name Donja dobra
Site number 1
Operator(s) Lucija
File name 20220630-180648_Donja dobra.ft
Comment

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 21. Druga stranica izvještaja mjerenja br.2 - lokacija 1 [8]

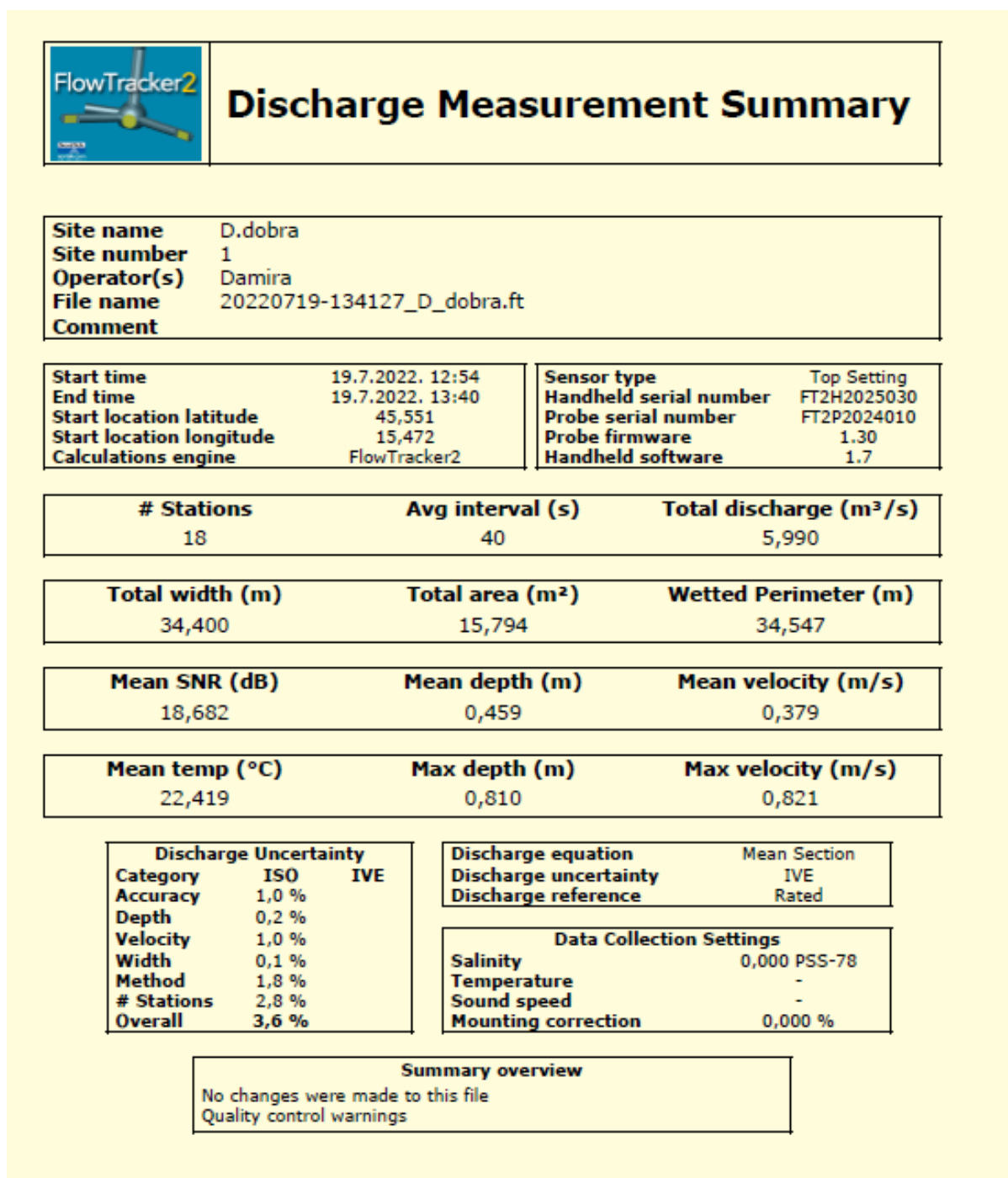
Treća stranica ovoga izvještaja sadrži tablični prikaz svih podataka dobivenih mjerenjem (Slika 22.)



Slika 22. Treća stranica izvještaja mjerenja br.2 - lokacija 1 [8]

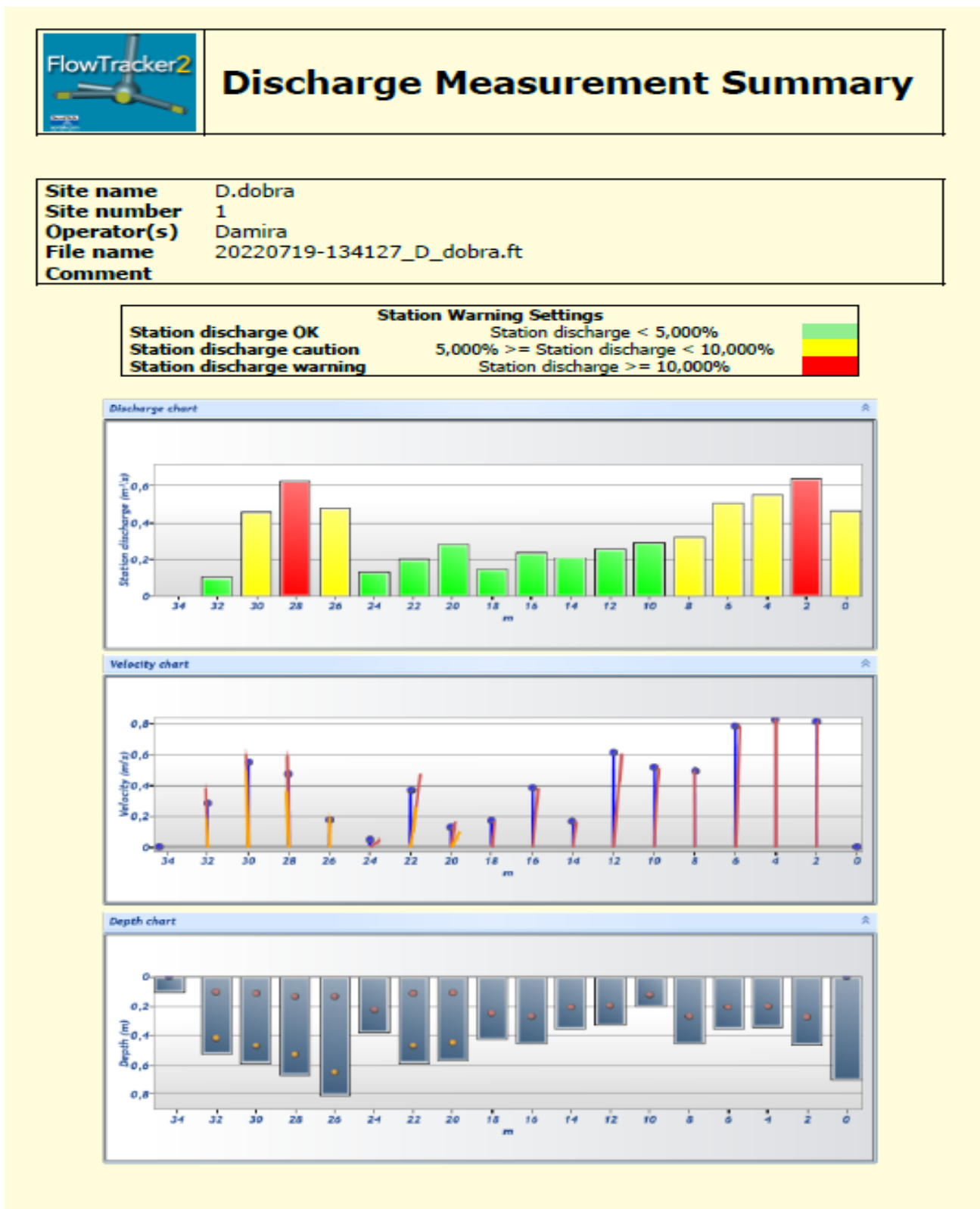
3.3.2.3. Mjerenje br.3 – lokacija 1

Treće mjerenje je izvršeno na lokaciji 1 dana 19.07.2022. (Slika 23.)



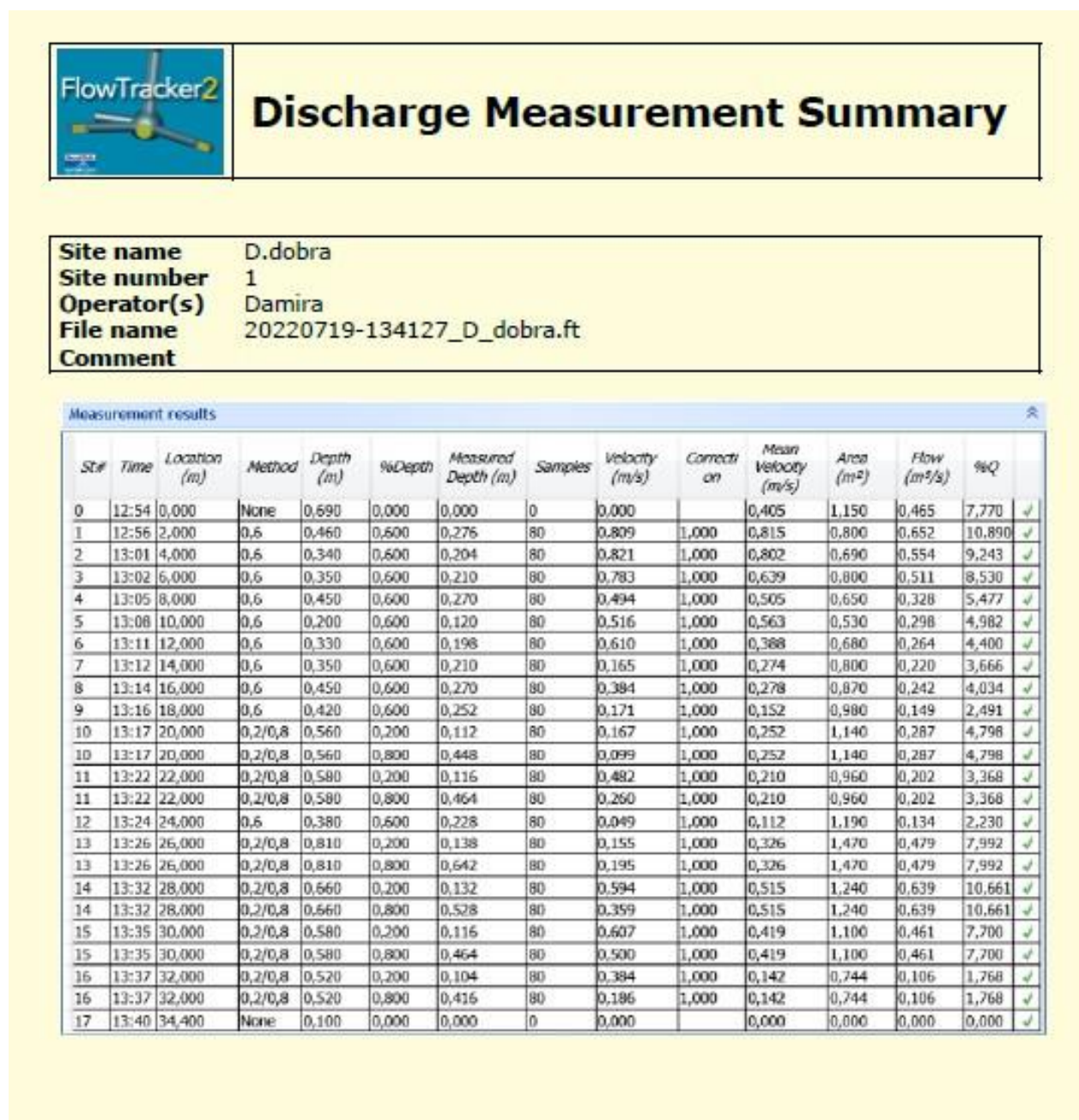
Slika 23. Prva stranica izvještaja mjerenja br. 3 - lokacija 1 [8]

Druga stranica izvještaja, kao i u prethodnim izvještajima, prikazuje grafički prikaz izmjerenih podataka (Slika 24.).



Slika 24. Druga stranica izvještaja mjerenja br. 3 - lokacija 1 [8]

Slika 25 prikazuje tablični prikaz izmjerenih podataka.



Slika 25. Treća stranica izvještaja mjerenja br.3 - lokacija 1 [8]


3.3.2.4. Mjerenje na lokaciji br.2

Mjerenje na lokaciji 2 prema slici 14 izvršeno je pomoću uređaja FlowTracker2, 800 metara nizvodno od Matinog mlina na profilu rijeke Dobre.



Slika 26. Mjerenje na lokaciji 2 [8]

Mjerenja su izvršena za vrijeme uobičajenog (niskog) vodostaja rijeke Dobre (Slika 27.).

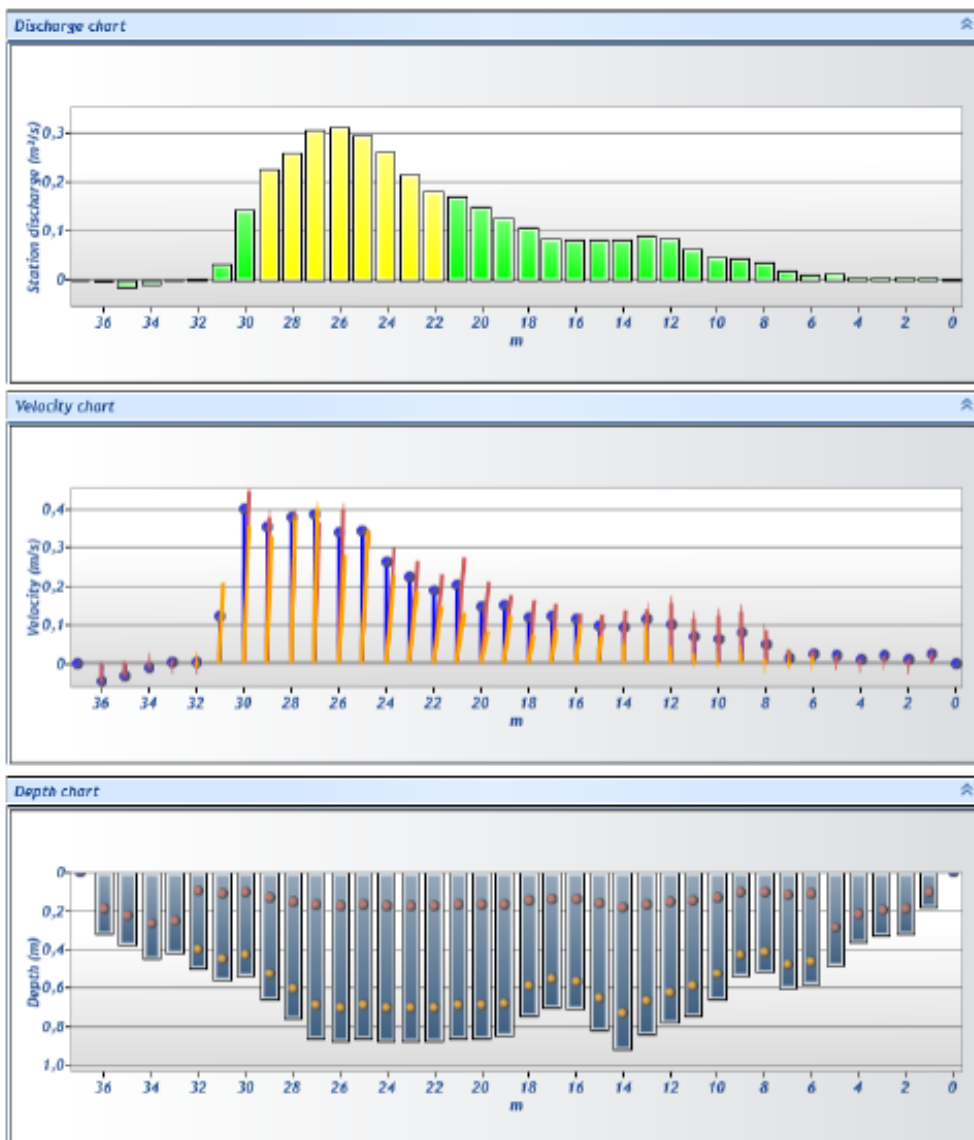
	Discharge Measurement Summary		
Site name	Donja Dobra		
Site number	4		
Operator(s)	Matija Blažun		
File name	Donja Dobra.ft		
Comment			
Start time	8.9.2021. 13:09	Sensor type	Top Setting
End time	8.9.2021. 15:49	Handheld serial number	FT2H2025030
Start location latitude	45,551	Probe serial number	FT2P2024010
Start location longitude	15,477	Probe firmware	1.30
Calculations engine	FlowTracker2	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	
Category	ISO IVE	Mean Section	
Accuracy	1,0 %	IVE	
Depth	0,1 %	Discharge uncertainty	
Velocity	0,3 %	Rated	
Width	0,1 %	Discharge reference	
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 27. Prva stranica izvještaja za mjerenje na lokaciji 2 [13]

Kao i na prethodnim mjerenjima, druga stranica izvještaja grafički prikazuje izmjerene podatke (Slika 28.).

Site name	Donja Dobra
Site number	4
Operator(s)	Matija Blažun
File name	Donja Dobra.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 28. Druga stranica izvještaja za mjerenje na lokaciji 2 [13]

3.3.3. Postupak mjerenja pomoću uređaja SO-R Flow Meter

Dolaskom na lokaciju kod Matinog mlina i pregledom trenutnog stanja razine vode zaključeno je da se može provesti postupak mjerenja. Cilj mjerenja je bio definirati dubinu vode prije vodnog kola i dubinu vode iza vodnog kola pri različitim visinama zapornica (Slika 30.).



Slika 30. Određivanje visine zapornice i puštanje vode prema vodnom kolu [8]

Početna dubina vode na zapornici iznosi 10 cm dok maksimalno otvorena zapornica iznosi 63 cm pri kojoj je ujedno definiran i maksimalni dotok vode na vodeno mlinsko kolo. Podizanje zapornice na razinu višu od 63 cm nije bilo moguće zbog jakog strujanja vode.

Pomoću uređaja SQ-R Flow metra koji je postavljen na sredinu dovodnog kanala (Slike 31. i 32.) i povezivanjem uređaja sa računalom koji zapisuje i obrađuje podatke, definirani su ulazni podaci. Od ulaznih podataka upisuje se širina dovodnog kanala, visina od dna kanala do uređaja, trenutna dubina vode u kanalu te nagib dovodnog kanala. Uređaj pomoću radara bilježi brzinu i dubinu vode, a pomoću definiranih geometrijskih karakteristika dovodnog kanala proračunava brzinu i protok vode. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 3.



Slika 31. Postavljanje uređaja SQ-R Flow Meter [13]

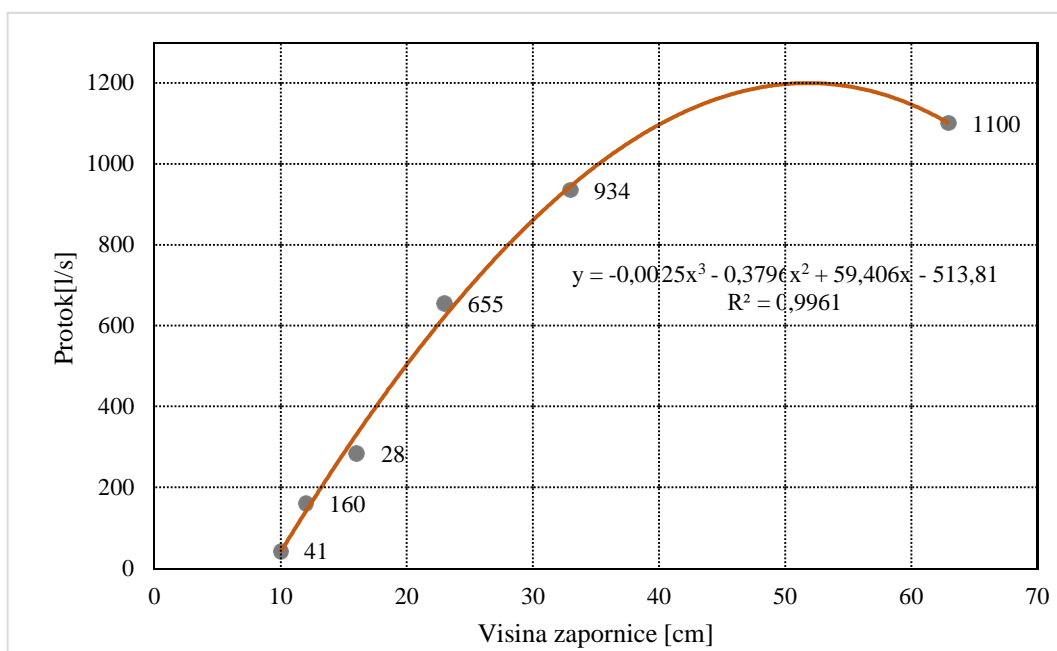


Slika 32. Analiza i obrada podataka SQ-R Flow Meter [13]

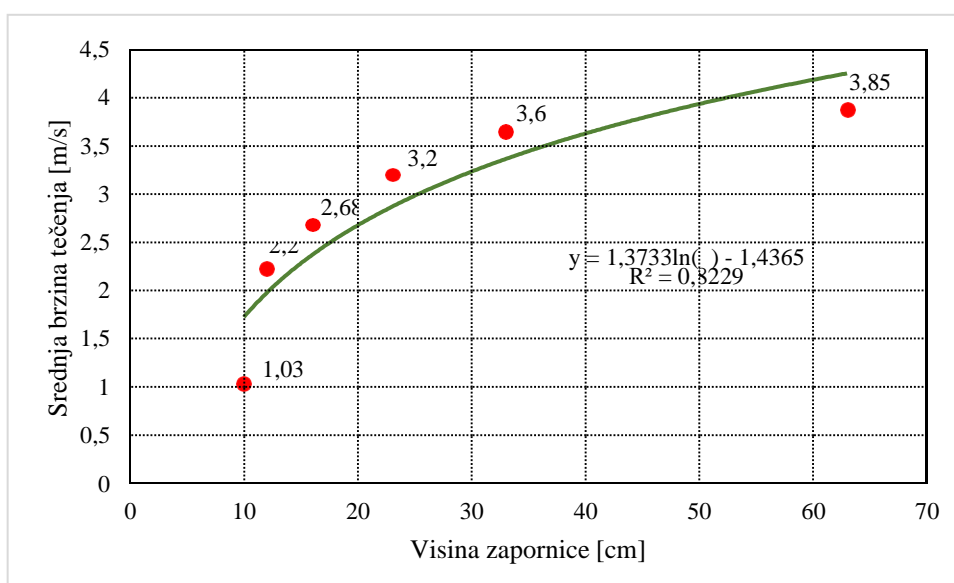
Tablica 3. Rezultati terenskih mjerenja [8]

R.b. mjerenja	Dubina vode na zapornici [cm]	Srednja brzina vode [m/s]	Protok [l/s]	Broj okretaja mlinskog kola [o/min]	Dubina vode na izlazu iz dovodnog kanala [cm]
1.	10	1,03	41	2,23	10
2.	12	2,20	160	3,15	11
3.	16	2,68	284	5,45	18
4.	23	3,20	655	11,50	24
5.	33	3,60	934	12,35	29
6.	63	3,85	1100	11,98	35

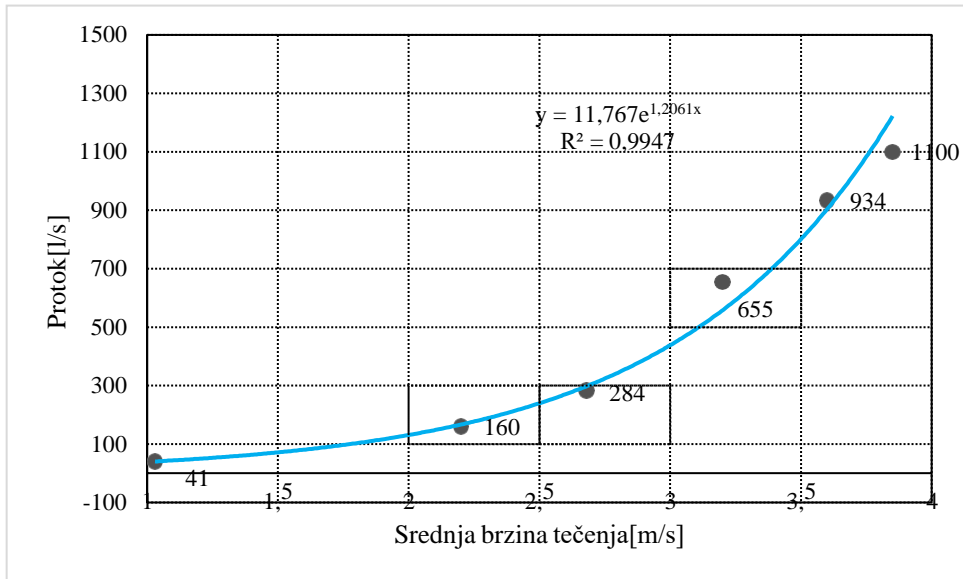
Iz dijagrama prikazanih na slikama 33-35 vidljivo je da se sa povećanjem visine zapornica povećavaju brzina tečenja vode i protok, dok je slici 36 prikazana razlika u dubinama vode na zapornici i dubina vode na izlazu iz dovodnog kanala pri čemu je vidljivo da sa povećanjem visine zapornice raste i dubina vode na izlazu iz dovodnog kanala.



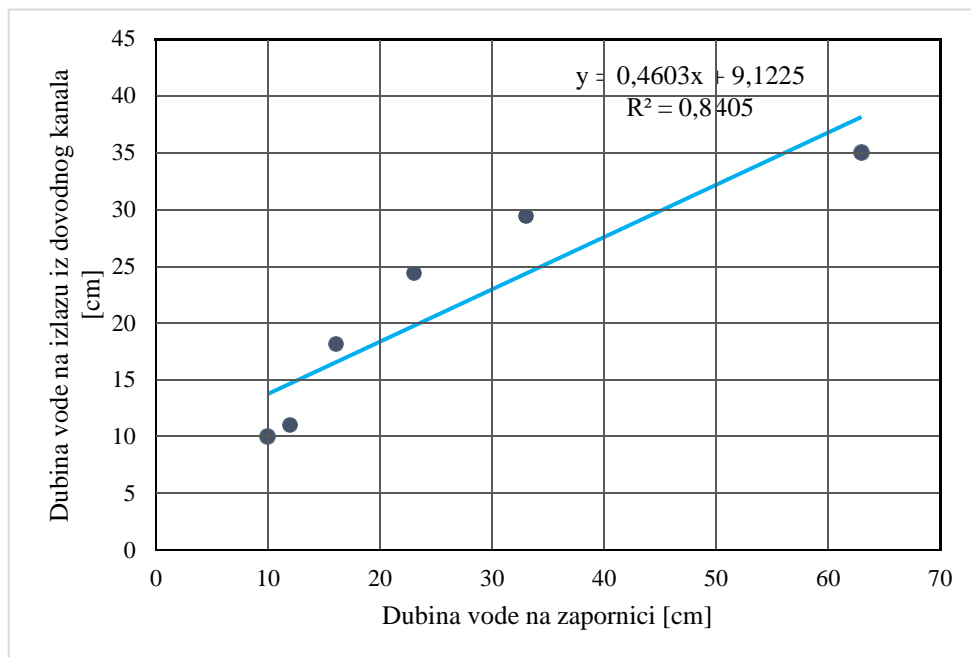
Slika 33. Ovisnost protoka o visini zapornice [8]



Slika 34. Ovisnost brzine tečenja o visini zapornice [8]



Slika 35. Ovisnost protoka i brzine tečenja [8]



Slika 36. Grafički prikaz dubine vode na zapornici i dubine vode na izlazu iz dovodnog kanala [8]

4. PRIMJER DIMENZIONIRANJA HIDROELEKTRANE U OBLIKU VODNOG KOLA – MATIN MLIN, DONJA DOBRA

4.1. Opis lokacije i princip rada Matinog mlina

Na Donjoj Dobri u mjestu Jaškovo nalazi se i Matin mlin (Slike 37. i 38.), što je predmet ovoga diplomskog rada.



Slika 37. Matin mlin na rijeci Dobri [4]



Slika 38. Matin mlin, Donja Dobra [8]

Na samoj lokaciji kod Matinog mlina rijeka Donja Dobra pregrađena je pomoću slapa koji omogućuje skretanje vode prema mlinu (Slika 39.).



Slika 39. Pogled na slap i Matin mlin na Donjoj Dobri [9]

Matin mlin na Donjoj Dobri u Jaškovu obuhvaća nekoliko dijelova, koji zajedno čine jednu cjelinu u samom procesu rada mlina. Prvo za istaknuti je dovodni kanal pravokutnog poprečnog presjeka ukupne duljine 12.6 m. U dovodnom kanalu se voda transportira od ulaza do mlinskog vodnog kola pri čemu ta ista voda iza vodnog kola izlazi u korito rijeke Dobre (Slike 40. i 41.).



Slika 40. Prikaz ulaza vode u dovodni kanal preko zapornice [8]



Slika 41. Prikaz izlaza dovodnog kanala [8]

Kako bi se osigurao siguran pristup i kako ne bi došlo do štetnog utjecaja na vodeni životinjski svijet, ispred dovodnog kanala postavljene su zaštitne rešetke koje sprečavaju prolaz vodenim životinjama ili bilo kojim drugim predmetima koji bi mogli oštetiti mlinsko kolo.

Na početku dovodnog kanala, iza zaštitnih rešetki nalaze se zapornice koje se za vrijeme rada mlina ručno otvaraju i služe za puštanje vode u dovodni kanal u kojem se nalazi mlinsko vodeno kolo (Slika 42.).



Slika 42. Prikaz zapornice [8]

Količina vode koja ulazi u dovodni kanal ovisi o visini podignute zapornice.

U slučaju Matinog mlina na rijeci Dobri pri postupku dimenzioniranja hidroelektrane u obliku vodnog kola u obzir se kao turbina uzima vodno kolo pri kojem se kinetička energija vode u pokretu 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 vode. 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 (Slike 43 i 44.).



Slika 43. Vodno kolo na Matinom mlinu [13]



Slika 44. Lopatice mlinskog kola [13]

Mlinsko kolo izrađeno je od hrastovog drveta s 28 lopatica, dimenzije lopatica iznose 1,60 m x 0,5 m. Mlinsko kolo fiksirano je na drvenu gredu koja služi kao vratilo i prenosi silu na mehanizam unutar mlina koji dalje pokreće kameni žrvanj (Slika 45.). Mlinsko kolo služi za pokretanje mlinskih kamena koji se nalaze unutar mlina, a služe za proizvodnju brašna od žitarica. Vratilo samog mlinskog kola fiksirano je s metalnim ležajevima na metalno postolje, koje je temeljeno na kamenoj osnovi.



Slika 45. Prijenos vrtnje s mlinskog kola na kameni žrvanj [8]

4.2. Proračunate snage turbine u obliku vodnog kola

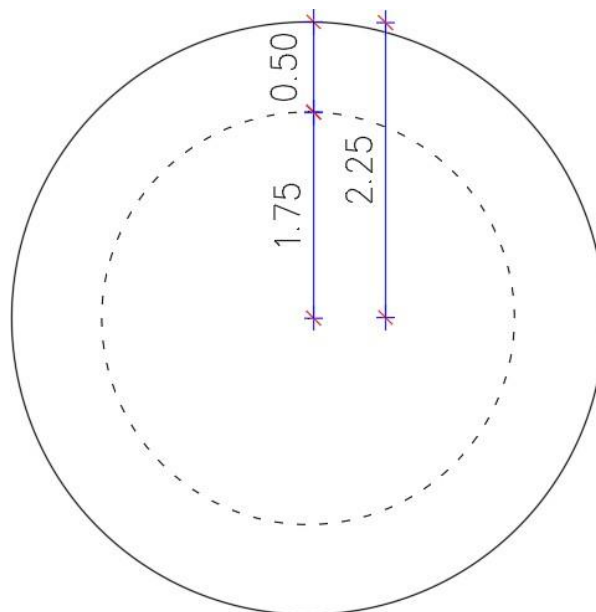
Korištenjem jednadžbe (5), dobivene su sljedeće snage turbine, prikazane u tablici 4. Brzine vode dobivene su pomoću uređaja SQ-R Flow Meter.

Tablica 4. Ulazni podaci i rezultati proračuna dobiveni radarskim mjernim uređajem SQ-R Flow Meter [13]

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

Potrebne snage turbine proračunate su s obzirom na najveću teoretsku učinkovitost, koja iznosi 30 %. Ove snage proračunate su u svrhu davanja prve, grube procjene snage turbine u obliku vodnog kola. U nastavku će se dati realna procjena stvarne snage turbine.

Na slici 46. prikazan je presjek vodnog kola sa svim dimenzijama:



Slika 46. Presjek vodnog kola [8]

Brzine vode (Tablica 3.), predstavljaju brzinu vode kod lopatice vodnog kola, tj. kod ulaza u prostor vodnog kola. Obodna brzina, tj. brzina okretanja lopatica vodnog kola proračunata je korištenjem izraza (10) i prikazana je u tablici 6. Ovisno o režimu tečenja, tj. da li se radi o mirnom ili silovitom tečenju, definiraju se snage turbine. Pri tome se primjenjuje jednačina (9) za mirni tok tečenja, odnosno jednačine (15-17) za siloviti tok tečenja. Režim tečenja može se utvrditi proračunom Froudeovog broja ili kritične dubine. Prema [1], preporuča se korištenje kritične dubine kao pokazatelja vrste toka. Za potrebe ovog diplomskog rada, odnosno istraživanja, proračunati će se oba pokazatelja.

Sljedeći korak je definiranje vrste tečenja preko kritične dubine, odnosno Froudeovog broja, jednačine (7-8), na osnovu podataka iz Tablice 3.

Tablica 5. Ulazni podaci i rezultati kritične dubine i Froudeov-og broja [8]

R.b. mjerjenja	Dubina vode na zapornici	Srednja brzina vode	Protok	Kritična dubina	Froudeov broj
	[cm]	[m/s]	[l/s]	[cm]	
1.	10	1,03	41	3,284	1,040
2.	12	2,2	160	8,139	2,118
3.	16	2,68	284	11,932	2,017
4.	23	3,2	655	20,828	2,085
5.	33	3,6	934	26,387	2,134
6.	63	3,85	1100	29,428	2,078

Kriterij kritične dubine pokazuje da se radi o mirnom toku, dok kriterij Froudeovog broja pokazuje da se radi o silovitom toku. Kao što je i pokazano u [1], primijeniti će se kriterij kritične dubine, pri čemu se usvaja mirni režim tečenja. Uzevši u obzir da se radi o plitkom vodotoku (visina lopatica približno jednaka ili manja od dubine ulazne količine vode), primijeniti će se metodologija dimenzioniranja za takve hidrauličke uvjete.

Primjenom jednačine (9) dobivene su snage turbine, odnosno hidroelektrane u obliku vodnog kola (tablica 6.).

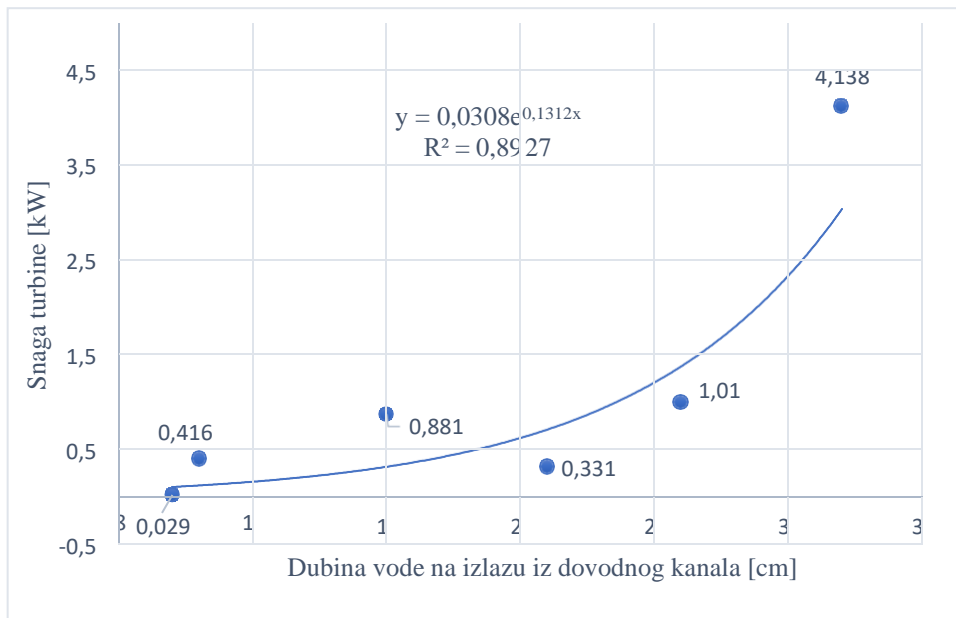
Tablica 6. Proračun snage turbine za mirni tok tečenja [8]

R.b. mjerenja	Dubina vode na izlazu iz dovodnog kanala	Snaga turbine - mirni tok tečenja
	[cm]	(W)
1.	10	29,45
2.	11	416,41
3.	18	881,10
4.	24	331,38
5.	29	1009,89
6.	35	4138,06

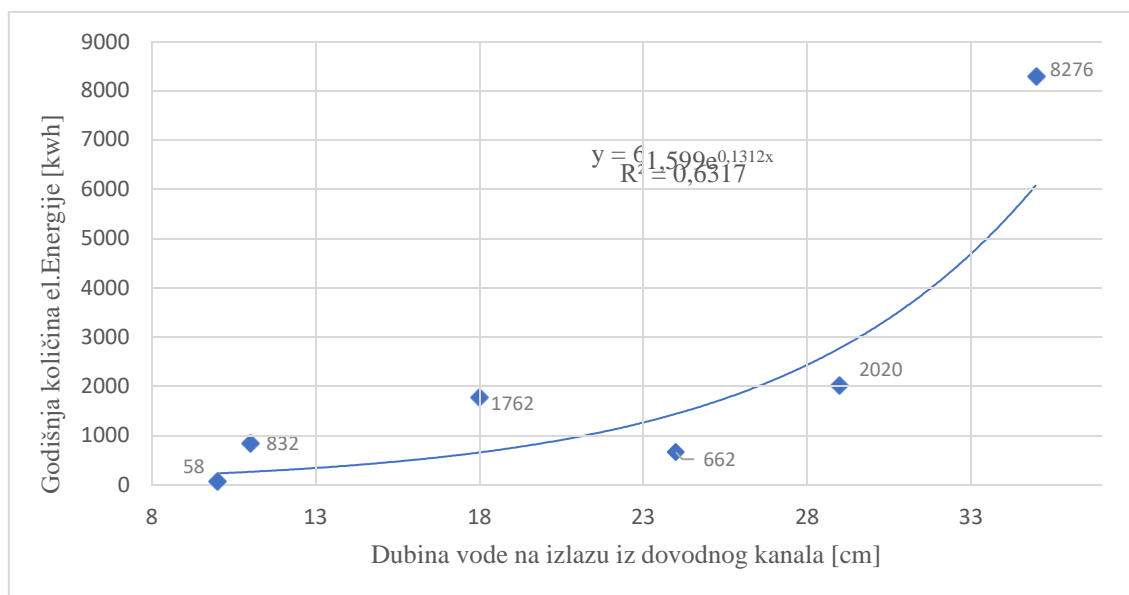
5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

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. Iz proračuna snage turbine je vidljivo da se javljaju veliki otpori tečenju zbog velike mase vodnog kola, tj. same konstrukcije od dasaka, kao i samog položaja vodnog kola u odnosu na ulaz vode u dovodni kanal zbog čega i proračunate snage nisu velike. Također, javljaju se velika povećanja snage od rednog broja mjerenja 5 što je vidljivo iz grafičkog prikaza ovisnosti snage turbine i dubini vode na izlazu iz dovodnog kanala.

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. U dovodnom kanalu su pomoću uređaja SQ-R Flow Metra izvršena mjerenja proračuna snage turbine i proizvodnje godišnje količine električne energije. Vidljivo je da povećanjem dubine vode na izlazu iz dovodnog kanala dolazi i do povećanja snage te godišnje količine proizvedene energije, slike 47. i 48. Količina električne energije proračunata je pomoću formule (6) i temelji se na osmosatnom radnom vremenu tijekom 250 radnih dana u godini.



Slika 47. Grafički prikaz ovisnosti snage turbine za mirni tok tečenja [8]



Slika 48. Grafički prikaz ovisnosti količine električne energije o dubini vode na izlazu iz dovodnog kanala [8]

Nadalje, lopatice su formirane od dasaka, koje su nepravilne i teške. Također, ulazna zapornica je dotrajala i propušta vodu čak i kad je spuštena. Time se mijenjaju hidraulički uvjeti, čime se stvaraju promjene u toku vode prema lopatici, što rezultira odstupanjima koja se ne bi pojavila u slučaju boljih tehničko-tehnoloških uvjeta.

Zbog malog ulaznog prostora, tj. raspoložive duljine betonskog kanala prije vodnog kola, a najviše iz sigurnosnih razloga nije bilo moguće izmjeriti razine vode pred ulazom u vodno kolo. No uzevši u obzir pravila struke i raspoložive spoznaje oko hidraulike i tečenja vode kod vodnih kola te duljine cijelog dovodnog kanala, dubina i ostale veličine izmjerene neposredno nakon vodnog kola dočaravaju stvarnu situaciju neposredno prije vodnog kola. Tomu u prilog ide i činjenica da se radi o mirnom režimu tečenja te da ne bi smjelo biti uspora, vrtloženja i turbulencija koje bi mogle poremetiti navedenu pretpostavku i smjernice proračuna.

6. Zaključak

U radu je prikazana moguća primjena različitih postupaka dimenzioniranja hidroelektrane u obliku vodnog lica na primjeru Matinog mlina na rijeci Donjoj Dobri, a sve za ciljem izračuna snaga hidroelektrana u obliku vodnih kola i proizvodnje električne energije. U svrhu određivanja mogućnosti proizvodnje električne energije pomoću Matinog mlina provedena su terenska mjerenja koja uključuju 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. S obzirom na hidrauličke uvjete, odabrane su jednadžbe za mirni režim tečenja u plitkom vodotoku. Ovisno o prijenosnom mehanizmu sa generatorom, postoji mogućnost povećanja snage.

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 Matin mlin ima veliki potencijal u proizvodnji električne energije. Preporuča se zamjena teških debelih daski u vodnom kolu ili sa lakšim i tanjim daskama, odnosno i sa aluminijskom konstrukcijom, no tu može doći do komplikacija radi konzervatorskih uvjeta što je svakako prethodno potrebno uzeti u obzir.

Popis slika

Slika 1. Princip rada hidroelektrane [13]	3
Slika 2. Grafički prikaz ponašanja mlinskog kola za tri različita oblika tečenja [1]	6
Slika 3. Lokacije Matinog mlina i mjernih postaja na vodotoku Donja Dobra [12].....	11
Slika 4. Poprečni presjek rijeke Donje Dobre, mjerna postaja Lešće Toplice [12]	12
Slika 5. Vodostaji rijeke Donje Dobre izmjereni na mjernoj postaji Lešće Toplice [12].....	13
Slika 6. Srednji dnevni protoci rijeke Donje Dobre izmjereni na mjernoj postaji Lešće Toplice [12].....	14
Slika 7. Srednji dnevni protoci u razdoblju od 1946. godine do 2021.godine za mjernu postaju Lešće Toplice, Donja Dobra [12]	16
Slika 8. Srednji dnevni vodostaji u razdoblju od 1946. godine do 2021.godine za mjernu postaju Lešće Toplice, Donja Dobra [12]	17
Slika 9. Srednji dnevni protoci u razdoblju od 1946. godine do 2021.godine za mjernu postaju Stative Donje, Donja Dobra [12].....	18
Slika 10.Srednji dnevni vodostaji u razdoblju od 1946. godine do 2021.godine za mjernu postaju Stative Donje, Donja Dobra [12].....	19
Slika 11. Poprečni presjek rijeke Donje Dobre, mjerna postaja Stative Donje [12].....	21
Slika 12. Vodostaji rijeke Donje Dobre izmjereni na mjernoj postaji Stative Donje [12].....	23
Slika 13. Protoci rijeke Donje Dobre na mjernoj postaji Stative Donje [12]	24
Slika 14. Satelitski prikaz lokacija mjerenja [4]	25
Slika 15. Postavljanje mjerne trake na profilu rijeke Dobre [8]	26
Slika 16. Postupak mjerenja Flow Tracker2 ultrazvučnim uređajem [8]	27
Slika 17. Prva stranica izvještaja za mjerenje br.1 [8]	28
Slika 18. Druga stranica izvještaja za mjerenje br.1 [8]	29
Slika 19. Treća stranica izvještaja za mjerenje br.1 [8]	30
Slika 20. Prva stranica izvještaja mjerenja br.2 – lokacija 1 [8].....	31
Slika 21. Druga stranica izvještaja mjerenja br.2 - lokacija 1 [8].....	32
Slika 22. Treća stranica izvještaja mjerenja br.2 - lokacija 1 [8].....	33
Slika 23. Prva stranica izvještaja mjerenja br. 3 - lokacija 1 [8].....	34
Slika 24. Druga stranica izvještaja mjerenja br. 3 - lokacija 1 [8].....	35
Slika 25. Treća stranica izvještaja mjerenja br.3 - lokacija 1 [8].....	36

Slika 26. Mjerenje na lokaciji 2 [8]	37
Slika 27. Prva stranica izvještaja za mjerenje na lokaciji 2 [13].....	38
Slika 28. Druga stranica izvještaja za mjerenje na lokaciji 2 [13].....	39
Slika 29. Treća stranica izvještaja za mjerenje na lokaciji 2 [13].....	40
Slika 30. Određivanje visine zapornice i puštanje vode prema vodnom kolu [8]	41
Slika 31. Postavljanje uređaja SQ-R Flow Meter [13]	42
Slika 32. Analiza i obrada podataka SQ-R Flow Meter [13].....	43
Slika 33. Ovisnost protoka o visini zapornice [8].....	44
Slika 34. Ovisnost brzine tečenja o visini zapornice [8].....	44
Slika 35. Ovisnost protoka i brzine tečenja [8].....	45
Slika 36. Grafički prikaz dubine vode na zapornici i dubine vode na izlazu iz dovodnog kanala [8]	45
Slika 37. Matin mlin na rijeci Dobri [4]	46
Slika 38. Matin mlin, Donja Dobra [8]	47
Slika 39. Pogled na slap i Matin mlin na Donjoj Dobri [9]	47
Slika 40. Prikaz ulaza vode u dovodni kanal preko zapornice [8].....	48
Slika 41. Prikaz izlaza dovodnog kanala [8].....	49
Slika 42. Prikaz zapornice [8]	50
Slika 43. Vodno kolo na Matinom mlinu [13].....	51
Slika 44. Lopatice mlinskog kola [13].....	51
Slika 45. Prijenos vrtnje s mlinskog kola na kameni žrvanj [8]	52
Slika 46. Presjek vodnog kola [8]	53
Slika 47. Grafički prikaz ovisnosti snage turbine za za mirni tok tečenja [8]	56
Slika 48. Grafički prikaz ovisnosti količine električne energije o dubini vode na izlazu iz dovodnog kanala [8]	57

Popis tablica

Tablica 1. Prikaz rezultata mjerenja na mjernoj postaji Lešće Toplice [12].....	11
Tablica 2. Prikaz rezultata mjerenja postaje Stative Donje [12].....	22
Tablica 3. Rezultati terenskih mjerenja [8].....	43
Tablica 4. Ulazni podaci i rezultati proračuna dobiveni radarskim mjernim uređajem SQ-R Flow Meter [13]	53
Tablica 5. Ulazni podaci i rezultati kritične dubine i Froudeov-og broja [8]	54
Tablica 6. Proračun snage turbine za mirni tok tečenja [8]	55

Literatura:

- [1] 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
- [2] Održiv hidroenergetski razvoj na slivu Dunava, https://www.icpdr.org/main/sites/default/files/nodes/documents/icpdr_hydropower_hr.pdf , datum pristupa 20.06.2022.
- [3] Prirodna osnova u prostornom planiranju, vode na kopnu u prostornom planiranju https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/POuPP_3.pdf , datum pristupa 20.06.2022.
- [4] Google Maps, <https://www.google.com/maps/place/Matin+mlin/@45.5512627,15.4703466,16z/data=!4m5!3m4!1s0x47643934c1a6f799:0x40ff70208a5acb37!8m2!3d45.5508588!4d15.4706275> , datum pristupa 20.06.2022.
- [5] Kako vodenice čine električnu energiju? <https://hr.science19.com/how-do-watermills-make-electricity-4855> , datum pristupa 12.09.2022.
- [6] Energetski sustavi transformacija energije vode hidroelektrane https://www.pfri.uniri.hr/web/dokumenti/uploads_nastava/20180427_094126_vpelic_ENERGETSKI.SUSTAVI.P5.Hidroelektrane.transformacija.energije.vode.pdf , datum pristupa 12.09.2022.
- [7] Male hidroelektrane, <https://www.menea.hr/wp-content/uploads/2013/12/6-hidroelektrane.pdf> , datum pristupa 12.09.2022.
- [8] Blažun Marija, arhiva za potrebe diplomskog rada, 2022.
- [9] Dobra, https://hr.wikipedia.org/wiki/Dobra#Donja_Dobra , datum pristupa 17.09.2022.
- [10] TZP KUPA, <https://tzp-kupa.hr/kultura-matin-mlin/matin-mlin-ozalj-09/> , datum pristupa 17.09.2022.
- [11] Bonacci O., Andrić I., (2015): Hidrološka analiza krške rijeke Dobre <file:///C:/Users/Racunovodstvo2/Desktop/DOBRA.pdf> , datum pristupa:18.10.2022.

[12] Državni hidrometeorološki zavod - hidrologija, <https://hidro.dhz.hr/>, datum pristupa 18.10.2022.

[13] Blažun M., (2022): Mogućnost korištenja mlinova na rijekama za proizvodnju električne energije – primjer „Matinog mlina“ na rijeci Donjoj Dobri, diplomski rad, Sveučilište Sjever u Varaždinu, datum pristupa: 21.11.2022.

[14] Müller G. i dr., (2007): Stream wheels for applications in shallow and deep water