

# Mogućnost primjene hibridnog sustava "Mala hidroelektrana - solarna fotonaponska elektrana" na primjeru rijeka Bednje i Česme

---

Opačak, Dalibor

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:122:674238>

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

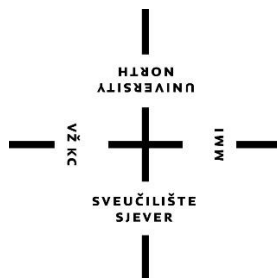
Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-18**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

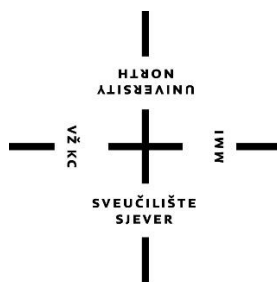
DIPLOMSKI RAD br. 77/GRD/2023

**Mogućnost primjene hibridnog sustava „Mala  
hidroelektrana - solarna fotonaponska elektrana” na  
primjeru rijeka Bednje i Česme**

Dalibor Opačak

Varaždin, travanj 2023. godine





**Sveučilište  
Sjever**

Odjel za Graditeljstvo

DIPLOMSKI RAD br. 77/GRD/2023

**Mogućnost primjene hibridnog sustava „Mala  
hidroelektrana - solarna fotonaponska elektrana” na  
primjeru rijeka Bednje i Česme**

Student:

Dalibor Opačak, 1222/336D

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Bojan Đurin

Varaždin, travanj 2023. godine

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za graditeljstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Graditeljstvo		
PRISTUPNIK	Dalibor Opačak	JMBAG	0149205150
DATUM	11.01.2023.	KOLEGIJ	Vodni sustavi
NASLOV RADA	Mogućnost primjene hibridnog sustava „Mala hidroelektrana - solarna fotonaponska elektrana“ na primjeru rijeka Bednje i Česme		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Possibility of applying the hybrid system "Small hydroelectric power plant - solar photovoltaic power plant" on the example of the rivers Bednja and Česma		
MENTOR	dr. sc. Bojan Đurin	ZVANJE	Izvanredni profesor
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc.dr.sc. Domagoj Nakić 2. izv.prof.dr.sc. Bojan Đurin 3. doc.dr.sc. Željko Kos 4. prof.dr.sc. Božo Soldo-zamjenski član 5.		

## Zadatak diplomskog rada

BROJ	77/GRD/2023
OPIS	Rad prikazuje mogućnost proizvodnje električne energije iz hibridnog sustava, koji se sastoji od male hidroelektrane i solarne fotonaponske elektrane. Analiziraju se rijeka Bednja i rijeka Česma. Okvirni sadržaj rada podrazumijeva uvodno poglavlje, teoretske postavke o malim hidroelektranama i solarnim fotonaponskim elektranama, primjer proračuna, analizu dobivenih rezultata i zaključak. Prikazani koncept još nije obrađivan na području Republike Hrvatske.

ZADATAK URUČEN 11.01.2023.



POTPIS MENTORA



IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

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, Dalibor Opačak pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom Mogućnost primjene hibridnog sustava „Mala hidroelektrana – solarna fotonaponska elektrana“ na primjeru rijeka Bednje i Česme te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:



(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, Dalibor Opačak neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom Mogućnost primjene hibridnog sustava „Mala hidroelektrana – solarna fotonaponska elektrana“ na primjeru rijeka Bednje i Česme čiji sam autor.

Student:



(vlastoručni potpis)

## **Predgovor**

Zahvaljujem se svom mentoru, izv.prof.dr.sc. Bojanu Đurinu na pomoći, dostupnosti, prenesenom znanju i uloženom vremenu koje mi je pružio tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se svima koji su svojom podrškom, razumijevanjem, strpljenjem bili uz mene tijekom mog školovanja te vjerovali u mene u ostvarivanju ovog cilja.

Dalibor Opačak

## **Sažetak**

U diplomskom radu prikazana je mogućnost proizvodnje električne energije iz hibridnih sustava koji se sastoje od male hidroelektrane i solarne fotonaponske elektrane. Opisane su teoretske pretpostavke o malim hidroelektranama i solarnim fotonaponskim elektranama. Analiziraju se lokacije rijeke Česme kod naselja Narta i rijeke Bednje u gradu Ludbreg. Analiziraju se potencijal hibridnih sustava, izračunate su snage solarnih fotonaponskih sustava i malih hidroelektrana te količina proizvedene električne energije. Izračun proizvodnje električne energije solarnih fotonaponskih elektrana obje lokacije izvršilo se pomoću računalnog programa PVGIS. Izvršen je detaljan opis pozicija, veličina, vrste solarnih panela, učinkovitosti solarnih fotonaponskih elektrana te njihove kombinacije s malim hidroelektranama s proračunom potrebne snage turbine. Iskazani su prihodi uslijed prodaje proizvedene električne energije oba sustava, kapitalni troškovi investicije i povratni period investicije pojedinih postrojenja.

Ključne riječi: hibridni sustav, male hidroelektrane, solarne fotonaponske elektrane, rijeka Česma, rijeka Bednja

## **Summary**

The thesis presents the possibility of producing electricity from hybrid systems consisting of a small hydroelectric power plant and a solar photovoltaic power plant. Theoretical assumptions about small hydroelectric and solar photovoltaic power plants are described. The locations of the Česma river near Narta and the river Bednja near the city of Ludbreg are analyzed. The potential of hybrid systems is analysed, and the power of solar photovoltaic systems and small hydropower plants and the amount of electricity produced is calculated. The calculation of the electricity production of the solar photovoltaic power plants of both locations was carried out using the PVGIS computer program. A detailed description of the position, size, type of solar panels, the efficiency of solar photovoltaic power plants and their combination with small hydroelectric power plants with the calculation of the required power of the turbine was described in detail. Revenue from the sale of electricity produced by both systems is shown, as well as capital investment costs and the payback period of individual plants.

Key words: hybrid system, small hydroelectric power plants, solar photovoltaic power plants, Česma river, Bednja river



## **Popis korištenih kratica**

HE – Hidroelektrana

FN – Fotonapon

SE – Solarna elektrana

kW – Kilovat

kWh – Kilovat sat

kWd – Kilovat dan

MW - Megavat

GW – Gigavat

GWh – Gigavat sat

TWh – Teravat sat

V - Volt

MHE – Mala hidroelektrana

HEP d.d. – Hrvatska elektroprivreda

HROTE – Hrvatski operator tržišta energije d.o.o.

OIE – Obnovljivi izvor energije

PDV – Porez na dodanu vrijednost

# SADRŽAJ

<b>1.</b>	<b>Uvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Princip proizvodnje električne energije iz malih hidroelektrana.....</b>	<b>4</b>
2.1.	<i>Osnovne značajke malih hidroelektrana .....</i>	<i>4</i>
2.1.1.	<i>Podjela malih hidroelektrana prema načinu iskorištavanja vode.....</i>	<i>5</i>
2.1.2.	<i>Podjela malih hidroelektrana prema smještaju strojarnice u odnosu na branu ili pregradu.....</i>	<i>7</i>
2.1.3.	<i>Crpno-akumulacijske (reverzibilne) hidroelektrane .....</i>	<i>10</i>
2.2.	<i>Osnovni dijelovi malih hidroelektrana .....</i>	<i>10</i>
2.3.	<i>Proizvodnja električne energije iz MHE.....</i>	<i>22</i>
2.4.	<i>Primjeri malih hidroelektrana u Hrvatskoj .....</i>	<i>23</i>
2.5.	<i>Primjeri malih hidroelektrana u svijetu.....</i>	<i>25</i>
<b>3.</b>	<b>Princip proizvodnje električne energije iz solarnih fotonaponskih sustava ...</b>	<b>28</b>
3.1.	<i>Osnovne značajke solarnih fotonaponskih elektrana.....</i>	<i>28</i>
3.2.	<i>Podjela fotonaponskih sustava.....</i>	<i>29</i>
3.3.	<i>Proizvodnja električne energije iz fotonaponskih elektrana.....</i>	<i>32</i>
<b>4.</b>	<b>Hibridni energetske sustavi „Mala hidroelektrana - solarna fotonaponska elektrana“ .....</b>	<b>33</b>
<b>5.</b>	<b>Proizvodni kapaciteti i proizvodnja električne energije na lokacijama vodotoka Bednja i Česma.....</b>	<b>35</b>
5.1.	<i>Općenito o rijeci Bednji i Česmi .....</i>	<i>35</i>
5.2.	<i>Ulazni hidrološki podaci.....</i>	<i>37</i>
5.2.1.	<i>Ulazni hidrološki podaci za rijeku Česmu.....</i>	<i>37</i>
5.2.2.	<i>Ulazni hidrološki podaci za rijeku Bednju .....</i>	<i>39</i>
5.3.	<i>Hidrometrijska mjerenja .....</i>	<i>41</i>
5.4.	<i>Sunčevo zračenje na analiziranim lokacijama.....</i>	<i>46</i>
<b>6.</b>	<b>Dobiveni rezultati.....</b>	<b>48</b>
6.1.	<i>Brzine i protoci na mjernim profilima na Česmi i Bednji.....</i>	<i>48</i>
6.1.1.	<i>Rezultati mjerenja na lokaciji rijeke Česme u naselju Narta .....</i>	<i>48</i>

6.1.2.	<i>Rezultati mjerenja na lokaciji rijeke Bednje u Ludbregu .....</i>	<i>52</i>
6.1.3.	<i>Rezultati prebačenog mjerenja na lokaciji rijeke Bednje u Ludbregu .....</i>	<i>56</i>
6.2.	<i>Proračunate snage hidroelektrane i solarne fotonaponske hidroelektrane .....</i>	<i>60</i>
6.3.	<i>Ekonomska analiza .....</i>	<i>67</i>
6.3.1.	<i>Ekonomska analiza proizvodnje električne energije iz solarnih elektrana ..</i>	<i>67</i>
6.3.2.	<i>Ekonomska analiza proizvodnje električne energije iz malih hidroelektrana .....</i>	<i>68</i>
6.3.3.	<i>Ekonomska analiza proizvodnje električne energije iz hibridnih sustava mala hidroelektrana – solarna elektrana .....</i>	<i>70</i>
6.3.4.	<i>Određivanje vremenskog perioda povrata investicije .....</i>	<i>71</i>
<b>7.</b>	<b>Zaključak .....</b>	<b>73</b>
<b>8.</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>74</b>
<b>9.</b>	<b>Popis slika .....</b>	<b>77</b>
<b>10.</b>	<b>Popis tablica.....</b>	<b>80</b>

## 1. Uvod

Tehnologije temeljene na hidroenergiji u određenom smislu koriste vodu kao „gorivo“, a ovisе o oborinama i stvaranju tekuće vode koja se, zahvaljujući prirodnom padu kao posljedici gravitacijske sile Zemlje, može koristiti za stvaranje mehaničke snage, odnosno može se reći da se hidroenergija koristi snagom pada vodotoka [1]. Za dobivanje energije iz strujanje vode u prirodi, obuhvaćene su sljedeće mogućnosti:

- iz kopnenih vodotoka
- iz morskih mijenja: plime i oseke
- iz morskih valova

Globalni instalirani hidroenergetski kapacitet porastao je za 26 GW na 1360 GW u 2021. godini, s obzirom na prethodnu godinu. Iz hidroenergije proizvedeno je 4.250 TWh čiste električne energije, jedan i pol puta više od ukupne potrošnje električne energije u EU [2]. Tehnologija korištenja kinetičke energije vode je gotovo vrlo blizu svog maksimuma tehnološkog razvoja te se ne može ne može očekivati nekakav značajniji napredak u tehnologiji. Kod hidroelektrana posljednja manje značajna poboljšanja idu u smjeru tehnologije kvalitetnijeg modeliranja turbina i njegovih karakteristika, točnije bolje zaobljenosti lopatice. Slijedom toga, određena poboljšanja usmjerena su prema ekologiji i ekološkom smislu odnosno, tehnologija izvedba turbina su sve više modelirane kao „*fish-friendly*“ te se prilikom podmazivanja ležaja turbina izostavljaju ulja i masti zbog zaštite okoliša, a uvodi se podmazivanje ležaja na bazi vode [3] što je prihvatljivo za okoliš. Hidroenergija najvećim dijelom potječe od cirkuliranja vode u prirodi koje je najvećim dijelom uzrokovano Sunčevim zračenjem [4]. Na području Gorske i Primorske Hrvatske nalaze se rijeke s velikom brzinom tečenja vodotoka sa strmim nagibom, a u Nizinskoj Hrvatskoj je rijeka Drava s tri velike hidroelektrane. Hrvatska ima veliki hidroenergetski potencijal za izgradnjom još hidroelektrana na cijelom njezinom području, s obzirom na količinu vodotoka koje posjeduje i na taj način iskoristi sav taj potencijal za obnovljivim izvorom energije. Izgradnjom hidroelektrana koristi se obnovljive izvore energije te se omogućava točnija predviđanja buduće proizvodnje energije u kombinaciji s drugim izvorima proizvodnje obnovljive energije. Hidroelektrana je proizvodno postrojenje za proizvodnju električne energije koja u svom sastavu ima barem jednu proizvodnu jedinicu pretvorbe energije hidropotencijala u električnu energiju te prateća postrojenja [5]. Bitno je istaknuti da postoji značajni interes za izgradnjom malih hidroelektrana kako bi se iskoristio hidropotencijal na manjim vodotocima. Hidroelektrane su dugovječnije od

ostalnih izvora energije te im je trajnost najmanje sto godina. Koriste vodu rijeka kao trajan i besplatan izvor energije koji direktno ne proizvodi stakleničke plinove.

Sunčeva energija omogućava život na Zemlji. Ona se u svakom satu generira prema Zemlji te je dovoljna za pokrivanje sveukupnih energetske potreba cijelog čovječanstva u cijeloj kalendarskoj godini [4]. Svakog sata Sunce zrači toliko energije na Zemlju koliko je ukupna ljudska populacija iskoristi u cijeloj godini, te jedan prosječni četvorni metar izložen Sunčevom svjetlu primi oko jedan kilovat na sat sunčeve energije [4]. Globalni kumulativni instalirani kapacitet solarne fotonaponske energije u 2020. iznosio je 735,4 GW i predviđa se da će rasti uz prosječnu godišnju stopu rasta od više od 12% [6]. Korištenjem generirane Sunčeve energije kroz fotonaponske sustave proizvodi se električna energija. Unutar zadnjih 20 godina, naročito je iz značajno skupe, egzotično primjenjive tehnologije u konkretnu energetske tehnologiju, sposobnu za prihvaćanje izazova daljnjeg tehnološkog razvoja i zauzimanja značajnog dijela tržišta [3]. Oni su sve značajniji obnovljivi izvori energije koji koriste izravnu Sunčevu svjetlost za pretvorbu u električnu energiju. Za takvu pretvorbu karakteristično je da se fotonaponski paneli međusobno povezuju u sustave fotonaponskih elektrana te da na taj način proizvode istosmjernu energiju. Uz to se istosmjerna energija iz više povezanih panela pretvara i isporučuje u izmjenični elektroenergetski sustav. Fotonaponske elektrane mogu biti različitih veličina koji pokrivaju dio krovne plohe neke zgrade, ali mogu biti postavljene i na većim površinama u prostoru te, shodno tome, veće snage [5]. Hrvatska kao zemlja s velikim brojem sunčanih sati, naročito Hrvatsko primorje, svrstava se u red najsunčanijih teritorija Europe. Jednako kao hidroenergija, Sunčeva energija je besplatni izvor energije. Princip rada ova dva sustava se obrnuto preklapa, npr. ljeti kada je sušno vrijeme, smanjena je količina oborina, razina vode u vodotoku je niža te je hidroenergija smanjena, odnosno nema dovoljno protoka za proizvodnju energije, no u tom razdoblju je broj sunčanih sati veći, solarna energija može nadopuniti energiju male hidroelektrane, a pravilo vrijedi u obrnutom slučaju. Hrvatska ima gotovo sve idealne prirodne, gospodarske i populacijske uvjete iskoristiti prirodne resurse kao što su energija vode i energija sunca za proizvodnju obnovljive izvore energije.

U ovom diplomskom radu su obrađene dvije lokacije, vodotok Bednja u gradu Ludbreg u Varaždinskoj županiji i vodotok Česma pored naselja Česma u Bjelovarsko-bilogorskoj županiji. Na temelju raspoloživih podataka i terenskih mjerenja protoka svakog vodotoka, izvršen je proračun snaga postrojenja i količina proizvedene energije male hidroelektrane

i solarnog fotonaponskog sustava, uz uvođenje koncepta HE hibridnog sustava, koji predstavlja kombinaciju malih hidroelektrana i fotonaponskih elektrana.

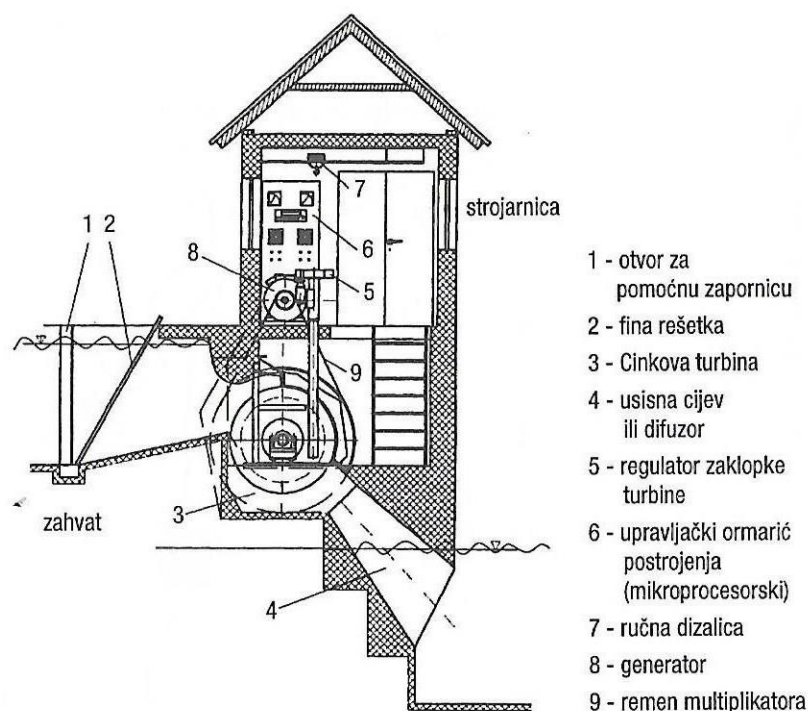
## 2. Princip proizvodnje električne energije iz malih hidroelektrana

### 2.1. Osnovne značajke malih hidroelektrana

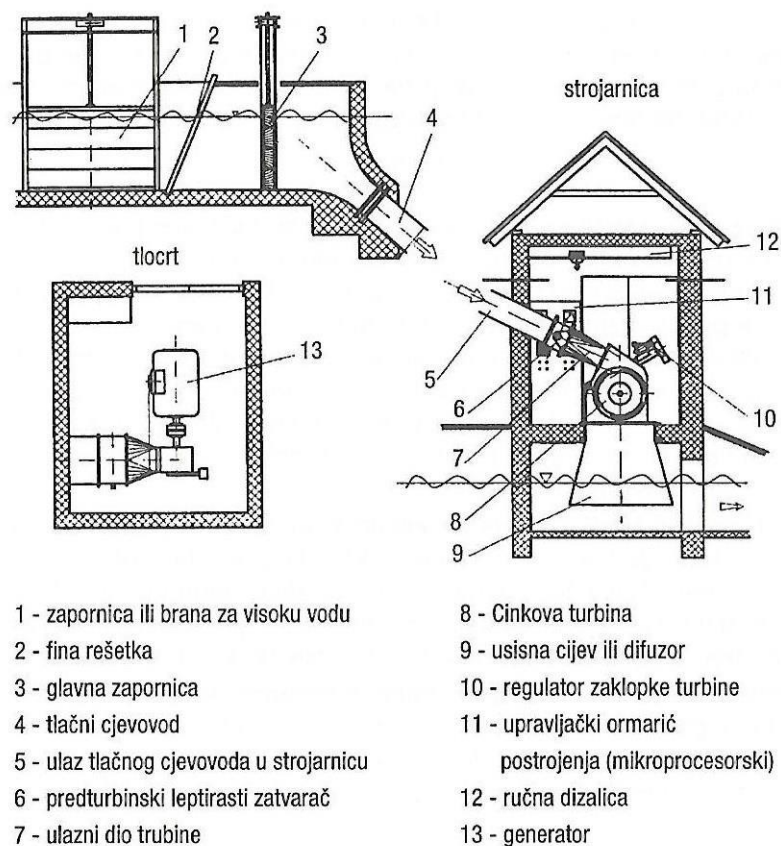
Male hidroelektrane su hidroenergetski sustavi manjih snaga, koji su izgrađeni na malim vodotocima, manjim rijekama, potocima i kanalima. Granična vrijednost snage koja dijeli hidroelektrane na male hidroelektrane razlikuje se kod svih zemalja. U pravilu za male hidroelektrane uzimaju se instalirane snage od 50 kW do 10 MW (Paish, 2002.) te se podjela za Republiku Hrvatsku uzima kao relevantna i ona je prihvaćena. Treba napomenuti da više od 50% svih proizvodnih pogona i snaga postrojenja su hidroelektrane [7]. Prema visinskoj razlici između zahvata i ispusta vode, male hidroelektrane se dijele na [12]:

- Niskotlačne, s padom do 25 m
- Srednjotlačne, s padom između 25 m i 200 m
- Visokotlačne, s padom iznad 200 m

Na slici 2.1. je shema niskotlačne male hidroelektrane, a na slici 2.2. je shema srednjotlačne odnosno visokotlačne male hidroelektrane.



Slika 2.1. Shema niskotlačne male hidroelektrane [4]



Slika 2.2. Shema srednjotlačne odnosno visokotlačne male hidroelektrane [4]

Kapacitet do 10 MW općenito je prihvaćen kao gornja granica vrijednosti malih hidroelektrana u Republici Hrvatskoj, a iskorištavaju snagu vode za zadovoljavanje potrebe malih lokalnih zajednica ili industrijski pogon. Male hidroelektrane se mogu spojiti na elektrodistribucijske mreže kao povoljnije obnovljive izvore energije. Također obično imaju minimalne akumulacije i zahtijevaju neznatne građevinske zahvate te se obično smatraju projektima s relativno malim utjecajem na okoliš, u usporedbi s velikim hidroelektranama. Jedna od najvažnijih karakteristika MHE je izostanak štetnog utjecaja na okoliš koji ovisi o ravnoteži između vodotoka i proizvodnji električne energije.

### 2.1.1. Podjela malih hidroelektrana prema načinu iskorištavanja vode

#### I. Protočne hidroelektrane bez akumulacijskog bazena

Ove vrste elektrana su najprikladnije za nizinske rijeke u ravničarskim područjima gdje se mogu izgraditi samo niske brane ili brane. Ima mali pad, ali su stope protoka znatne i nema rezervoara. One služe kao elektrane s osnovnim opterećenjem i njihova izlazna snaga u potpunosti ovisi o stvarnom protoku rijeke. Ako se prekorači maksimalni radni protok,



ostatak vode teče preko pregrade bez ikakve upotrebe energije [8]. Kinetička energija se direktno koristi za pokretanja rada vodenih turbina. Ovaj tip hidroelektrane je vrlo jednostavan za izvođenje te ima vrlo mali utjecaj na okoliš. U slučaju kada je protok veći od predviđenog, višak vode se jednostavno prelije iznad brane. Nedostatak je što ovisi o raspoloživosti vodotoka odnosno o količini protoka, jer u slučaju malog protoka, smanjuje se proizvodnja električne energije. Na slici 2.3. je primjer protočne hidroelektrane bez akumulacijskog bazena.



Slika 2.3. Hidroelektrana Gojak [9]

## II. Akumulacijske hidroelektrane s prirodnim ili umjetnim akumulacijskim bazenom

Akumulacijska hidroelektrana uvijek ima akumulaciju tj. pregrađenu dolinu. Ciklus proizvodnje energije određen je volumenom rezervoara i brzinom kojom voda teče u njega. To može trajati danima, tjednima ili čak duže. Akumulacijske elektrane obično proizvode energiju samo u razdobljima vršne potražnje, a u ostalim vremenima samo akumuliraju vodu u rezervoaru [8]. Grade se ako teren omogućuje ekonomičnu izgradnju umjetnog akumulacijskog jezera ili korištenje postojećeg i/ili prirodnog odnosno njegovu nadogradnju ako se za to ukaže potreba. U kišnom periodu, odnosno u periodu velikih oborina, sav višak vode se sprema u akumulaciju dok u sušnom periodu akumulacija služi kao povećanje broja dana normalnog protoka što je ujedno mjerodavni protok za dimenzioniranje. Također imaju mogućnost pričuve jeftinog izvora energije kada ga ima dovoljno i potrošnje istog po potrebi. Nedostatak je otežani pogon ili potpuni zastoji ljeti kada su smanjeni vodni tokovi zbog manjih oborina odnosno sušnog perioda. Na slici 2.4. je primjer hidroelektrane s akumulacijskim bazenom.

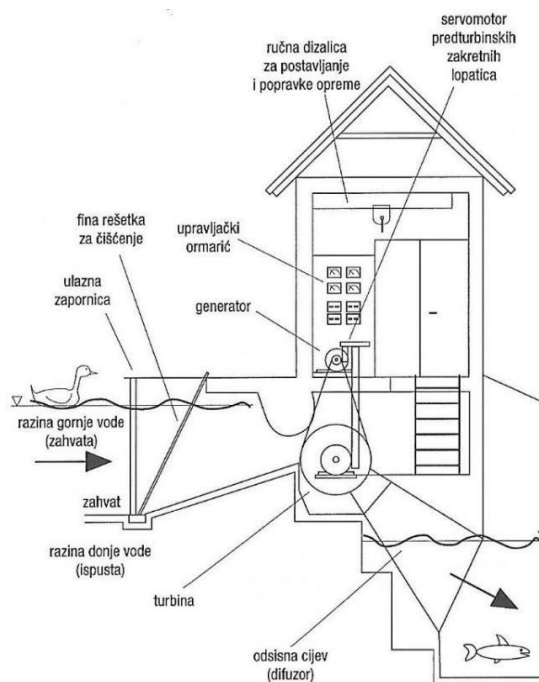


Slika 2.4. Hidroelektrana Peruća [10]

### 2.1.2. Podjela malih hidroelektrana prema smještaju strojarnice u odnosu na branu ili pregradu

#### I. Pribranske hidroelektrane

Pribranske hidroelektrane imaju strojarnicu smještenu uz branu, unutar brane ili je objekt izgrađen kao dio brane. Izvode se na mjestima na kojima se potrebni geodetski pad može postići samo izgradnjom brane, na primjer gdje se nalazi prirodna stepenica na vodotoku ili gdje je dubina dovoljno velika pa se razina vode može podignuti [4]. Ovakve hidroelektrane se obično grade na većim rijekama sa manjim padovima. Na slici 2.5. je shema male pribranske hidroelektrane sa smještajem strojarnice i zahvata, a na slici 2.6. je primjer pribranske hidroelektrane u Hrvatskoj.



Slika 2.5. Shema strojarnice i zahvata pribranske MHE [4]

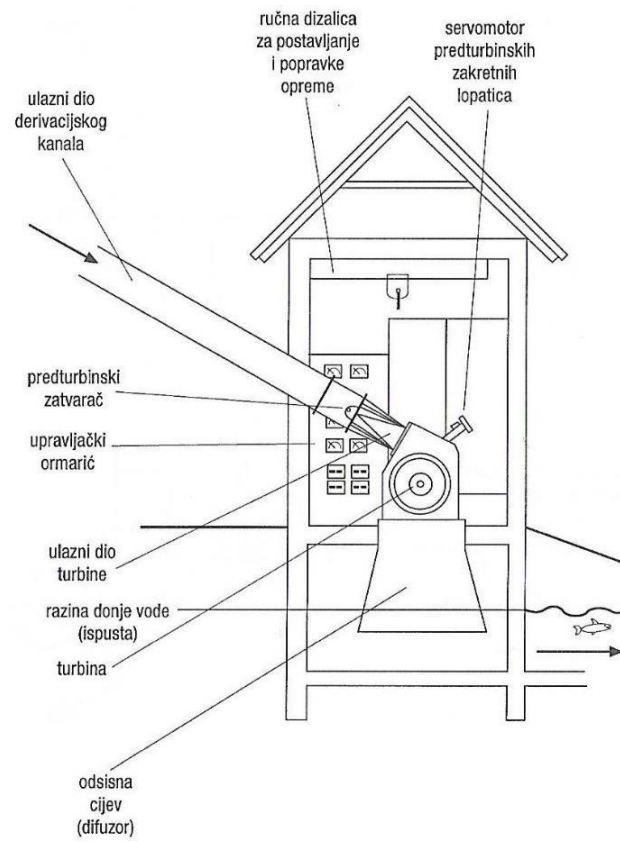


Slika 2.6. Hidroelektrana Sklope [11]

## II. Derivacijske hidroelektrane:

- a) s otvorenim dovodnim kanalom,
- b) sa zatvorenim dovodnim kanalom
- c) s tlačnim kanalom

Zahvat vode i strojarnica su odvojeni kod derivacijskih hidroelektrana. Ovisno o konfiguraciji terena, dovodni i odvodni cjevovodi mogu biti otvoreni ili pod tlakom, a postoji mogućnost da se ni ne grade ako nije potrebno. Princip rada derivacijske hidroelektrane očituje se u preusmjeravanju dijela rijeke u derivacijski kanal koji je znatno manje strm od izvornog riječnog korita. Korištenjem brane ili baraža se postiže usmjeravanje vodotoka. Hidroelektrana koja koristi pad između preusmjerene vode i rijeke najčešće je nekoliko kilometara udaljena od brane. U slučaju da su kanali otvorenog tipa i prate konfiguraciju terena, govorimo o netlačnoj derivaciji. U slučaju derivacije pod tlakom, voda koja napaja turbine vodi se u cjevovod ili podzemnim tunelom. Voda se vraća u prvobitno prirodno korito nakon izlaska iz turbine. Utjecaj okoliša i sezonske promjene i značajno utječu na izlaznu snagu ovih vrsta postrojenja [8]. Na slici 2.7. je shematski prikaz strojarnice derivacijskih malih hidroelektrana, a na slici 2.8. je primjer derivacijske hidroelektrane u Hrvatskoj.



Slika 2.7. Shema strojarnice derivacijske MHE [4]

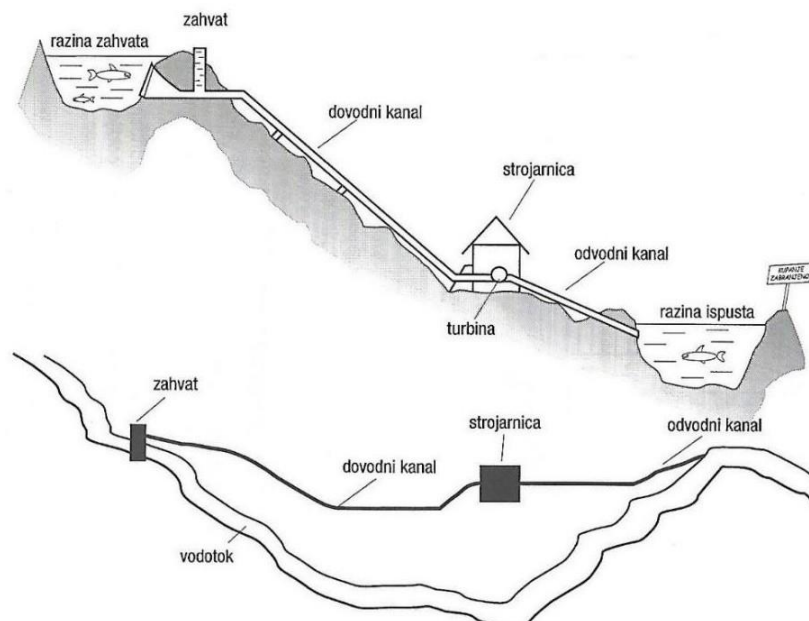


Slika 2.8. Hidroelektrana Zakučac [9]

### 2.1.3. Crpno-akumulacijske (reverzibilne) hidroelektrane

Jedina poznata tehnologija pohranjivanja proizvedene električne energije je u potencijalnoj energiji vode. Karakteristična značajka ovih hidroelektrana su dva različita rezervoara, gornji i donji rezervoari, koji su međusobno povezani s cjevovodima. Agregat postrojenja sastoji se od pumpe za vodu, vodene turbine i elektromotora-generatora na jednoj osovini. U vrijeme prevelike proizvodnje električne energije, ovo postrojenje troši struju i pumpa vodu iz donjeg rezervoara u gornji. Kada je postignuto vršno opterećenje i kada nema dovoljno energije u mreži, akumulirana voda se oslobađa za pogon turbine i generatora i vraća akumuliranu energiju natrag u mrežu. Za proizvodnju 1 kW električne energije, pumpno-akumulacijsko postrojenje troši otprilike 1,3 kW tijekom vremena izvan vršnog opterećenja. Velika prednost crpno-akumulacijskih elektrana je njihova sposobnost da u samo nekoliko minuta brzo promijene način rada s crpnog na proizvodnju električne energije i na taj način dinamički reagiraju na stvarno stanje opterećenja u mreži [8]. Također, osigurava opskrbu pri vršnom opterećenju, iskorištavajući vodu koja kruži između donjeg i gornjeg rezervoara pomoću pumpi koje koriste višak energije iz sustava u vrijeme niske potražnje. Kada je potražnja za električnom energijom velika, voda se vraća u donji rezervoar kroz turbine za proizvodnju električne energije [13].

## 2.2. Osnovni dijelovi malih hidroelektrana



Slika 2.9. Shema sustava male hidroelektrane [4]

Svi dijelovi sustava MHE mogu se podijeliti na tri osnovne skupine [4]:

- Građevinski dijelovi (brana, zahvat, dovodni kanal: derivacijski ili tlačni cjevovod, strojarnica i odvodni kanal)
- Hidrotehnički dijelovi (zapornica, rešetke, pjeskolovi, predturbinski zatvarač i dijelovi turbine)
- Elektrostrojarski dijelovi (turbine, multiplikatori, generatori, transformatori, regulacijski i zaštitni dijelovi, spoj na elektroenergetski sustav)

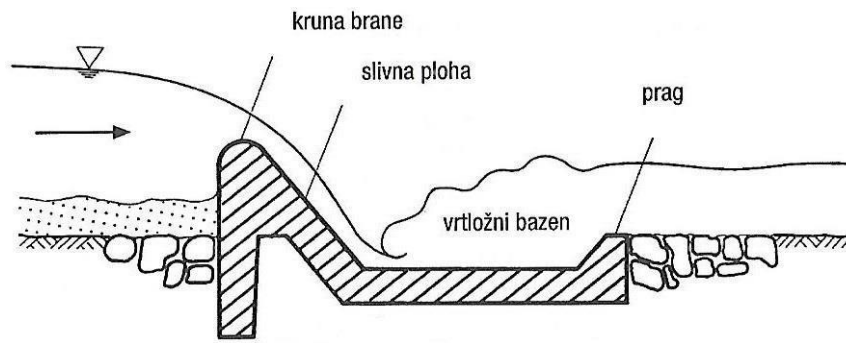
### **Građevinski dijelovi:**

**Brana** je jedan od najvažnijih dijelova svake hidroelektrane i ima vrlo važnu ulogu u konstruktivnom smislu te i u samoj funkciji rada same hidroelektrane. Također, brana ima funkciju povećati razinu vode kako bi se mogao postići bolji pad vodotoka te ako se ukaže potreba za stvaranje akumulacije u kritičnim periodima. Mogu biti izgrađene u obliku niskog preljevog praga npr. od armiranog betona, kod malih se hidroelektrana može iskoristiti i neka određena prirodna prepreka na vodotoku koja ga usporava i produbljuje tok vode npr. dijelovi stijenskih masa, batude i sl.

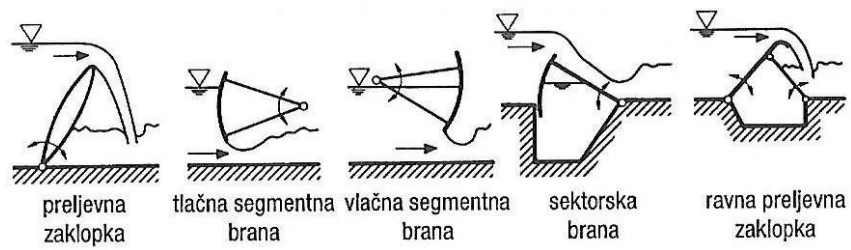
Prema izvedbi brane MHE mogu biti [4]:

- Čvrste
- Pomične
- Kombinirane

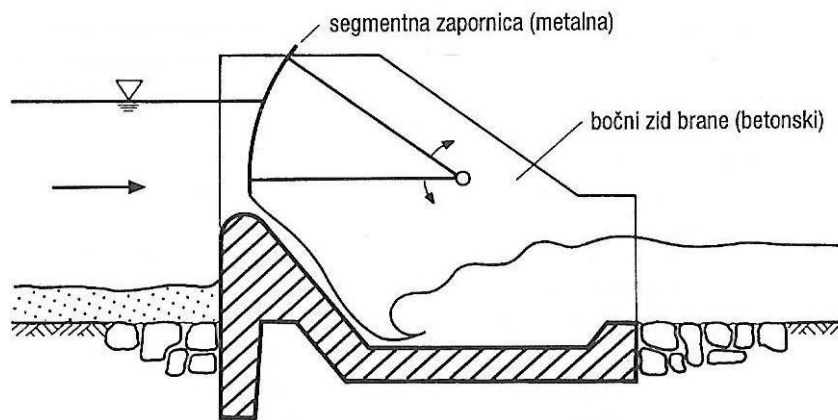
Čvrste brane se najčešće izvode od betona ili armiranog betona i u slučaju velikih voda imaju izgrađene rasteretne otvore (slika 2.10.). Pomične brane se sastoje od čelične konstrukcije i betonskog temelja odnosno jezgre, gdje se pomični dijelovi pokreću hidraulički, a u ranijim izvedbama se ono pokretalo mehanički (slika 2.11.) [4]. U današnje vrijeme postoji nekoliko vrsta kao što su s preljevom i ravnom preljevnom zaklopkom, ili s tlačnim i vlačnim segmentnima, te sektorske itd. Važna pozitivna karakteristika je što smanjuju presjek vodotoka te su izričito prikladne za bujičaste vodotoke. Treća izvedba je kombinirana brana (slika 2.12.) koja povezuje dobre karakteristike čvrstih i pomičnih brana, a sastoji se od armiranobetonskog tijela, odnosno krune, iznad koje se nalazi pomična sklopka.



Slika 2.10. Shema čvrste brane za male hidroelektrane [4]



Slika 2.11. Shema nekoliko izvedbi pomičnih brana za MHE [4]



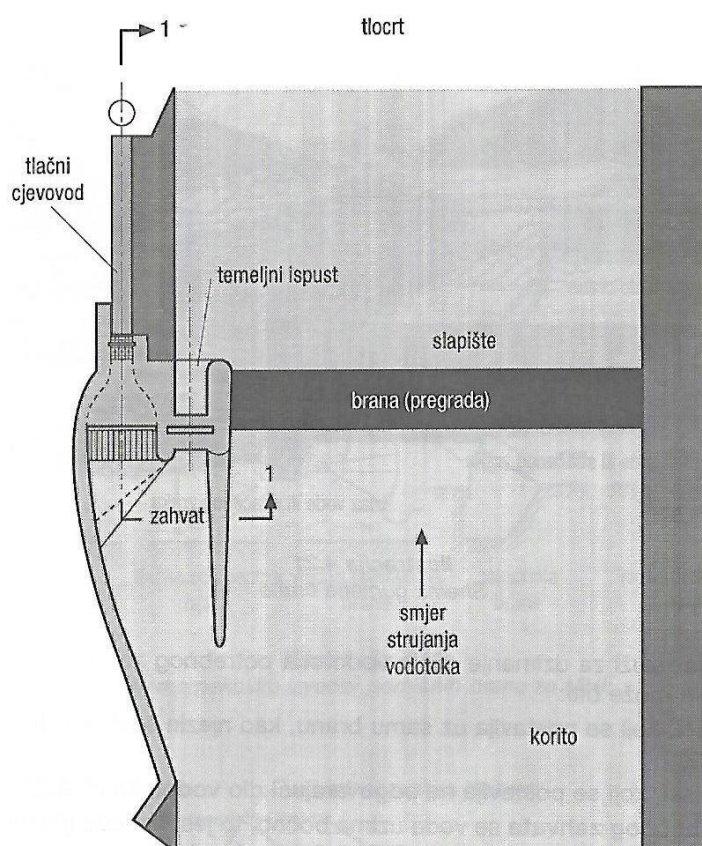
Slika 2.12. Shema kombinirane brane za MHE [4]

**Zahvat** je dio MHE koji ima funkciju prikupljanja dijela vodotoka i preusmjerenje vode potrebnog za pokretanje pogona turbine. Vrste zahvata mogu biti [4]:

- Zahvat na površini ili bočni zahvat
- Zahvat ispod površine ili tirolski zahvat

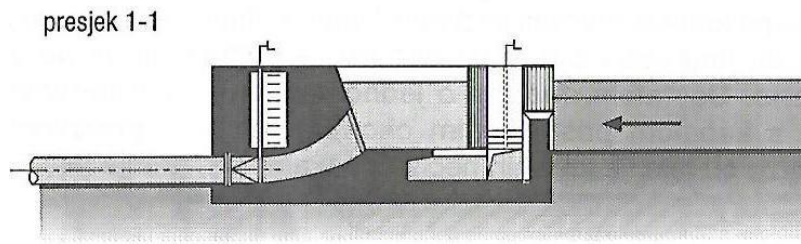
Zahvat na površini odnosno bočni zahvat se postavlja na odgovarajući dio vodotoka uz samu branu koji je sastavni dio njezinog konstruktivnog dijela i međusobno je povezano. Na ovaj način se voda uzima bočno, odnosno između glavnog tijela brane i obale. Na slici 2.13. i 2.14. su shematski prikazi bočnog zahvata. Zahvat ispod površine, odnosno tirolski zahvat uzima vodu po cijeloj širini korita vodotoka te je samim time i ekološki prihvatljiviji jer se može tako izvesti da je nevidljiv i nije štetan za ekosustav. Kompletni zahvat je ispod površine vodotoka i jedino se može koristiti kada je prirodni pad vodotoka velik i da je konfiguracija korita takva da se cijela izvedba zahvata može izgraditi.

Zapravo, radi se o jednostavnoj, niskoj armiranobetonskoj pregradi s kanalom postavljenim okomito na tok i prekrivenim rešetkom za odvajanje krupnih nečistoća, odnosno gruba rešetka (kamenje, granja i sl.). Na slici 2.15. je shematski prikaz tirolskog zahvata.

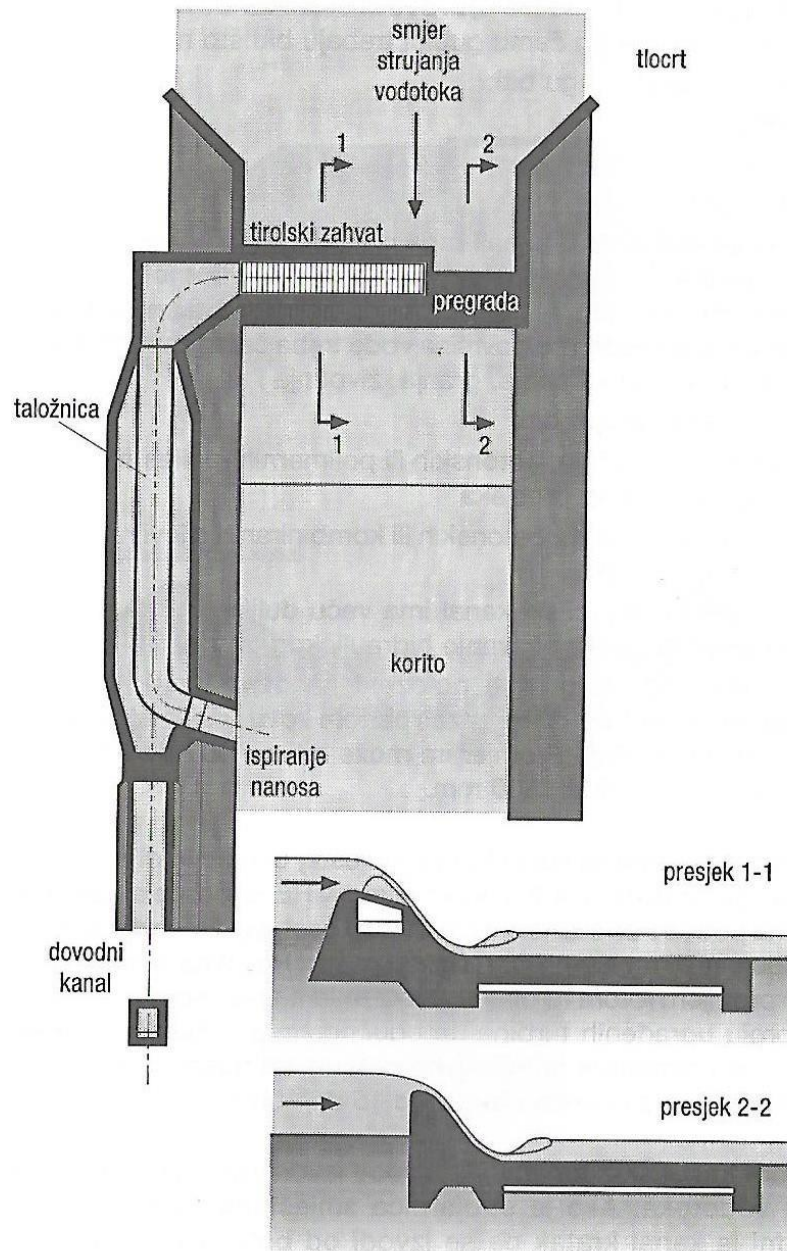


Slika 2.13. Shema bočnog zahvata – Tlocrt [4]





Slika 2.14. Sheme bočnog zahvata – Presjek 1-1 [4]



Slika 2.15. Shema tirolskog zahvata – Tlocrt, Presjek 1-1 i Presjek 2-2 [4]

**Derivacijski kanal i tlačni cjevovod** ima funkciju dovođenja potrebne količinu vode od zahvata do turbine, vodeći računa o izvedbi konstrukcije na način da se postignu najmanji hidraulički gubici.

Derivacijski kanali mogu biti [4]:

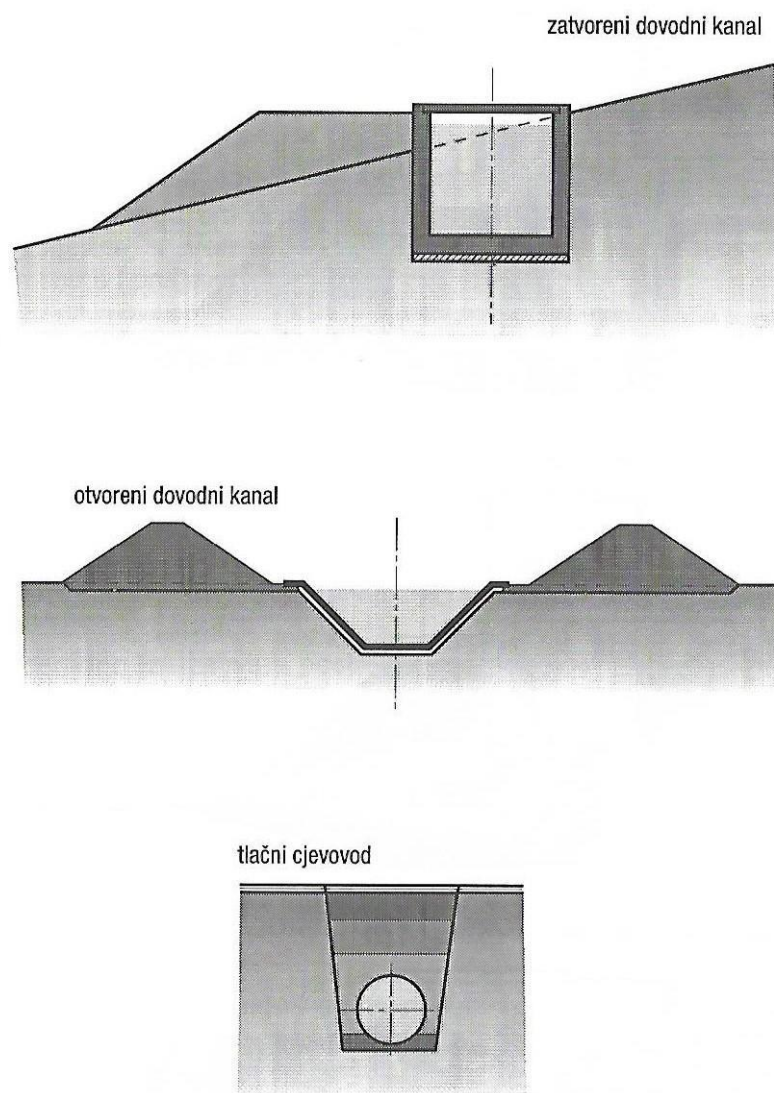
- Otvoreni
- Zatvoreni
- Kombinirani

Otvoreni derivacijski kanali se izvode kao armiranobetonska konstrukcija, trapeznog ili pravokutnog poprečnog presjeka. Trapezni poprečni presjek najpovoljniji je za vodotoke s većim protokom i malim padom dok je za pravokutni poprečni presjek povoljan vodotok s manjim protokom i većim padom.

Zatvoreni kanali mogu biti [4]:

- Nadzemni kanali – izvedeni od čeličnih, betonskih ili polimernih (poliesterskih) cijevi kružnog poprečnog presjeka
- Podzemni kanali – izvedeni od čeličnih, betonskih ili kombiniranih cijevi raznih oblika poprečnih presjeka

Na slici 2.16. je shematski prikaz zatvorenog i otvorenog betonskog derivacijskog kanala i polimernog tlačnog cjevovoda.



Slika 2.16. Shema zatvorenog i otvorenog betonskog derivacijskog kanala i polimernog tlačnog cjevovoda [4]

U slučaju da zatvoreni derivacijski kanali imaju veću duljinu potrebno je izgraditi vodenu komoru kako bi spriječili mogućnost hidrauličkog udara [4]. Dimenzioniranje u tom slučaju vodene komore imaju veliki utjecaj na pravilno funkcioniranje hidroelektrane.

Tlačni cjevovodi mogu biti položeni na otvorenom, najčešće su položeni u rovu što je i najprihvatljivije rješenje za okoliš. Promjer cjevovoda može biti od 400 mm do 2800 mm, a najčešće između 700 mm do 1500 mm [4].

Funkcija **strojarnice** je smještaja osnovnih dijelova MHE za proizvodnju električne energije, a odnosi se na turbine i generatora. Najčešći način rada MHE je automatski te nema potrebe za prisutnošću djelatnika te se samim time strojarnica dimenzionira na način da se unutar postrojenja može ugraditi kompletna oprema MHE za njezino potpuno

funkcioniranje i pravilnog rada. Površina strojarnice ovisi o promjeru rotora turbine koji je razmjernan njezinoj snazi, tipu, broju ugrađenih turbina i mogućnostima koji su prihvatljivi za okoliš [4].

**Odvodni kanal** ima funkciju odvodnje iskorištene vode iz turbine nazad u prirodno korito vodotoka. Ako je strojarnica smještena uz sam vodotok, odvodni kanal je kratke duljine te se izvodi od betona s pravokutnim poprečnim presjekom. U slučaju ako je strojarnica smještena dalje od vodotoka, odvodni kanal je veće duljine te je obložen kamenom oblogom s trapeznim poprečnim presjekom [4].

### **Hidrotehnički dijelovi:**

**Zapornice** imaju funkciju regulaciju vodotoka i mogu biti rasteretne i remontne. Rasteretne zapornice se koriste za propuštanje viška vode kod visokih vodostaja, a remontne zapornice se koriste za zatvaranje protoka prema turbini. Zapornici mogu biti izrađene od materijala kao što su drvo, čelik ili kombinirano ta dva materijala. Ovisno o konstrukciji mogu biti klizne pločaste, segmentne i preljevne [4].

**Rešetke** imaju funkciju sprječavanja prolaska većih mehaničkih nečistoća koje bi se mogle naći u vodotoku i začepiti dovodni kanal ili oštetiti turbinu. Prema namjeni mogu biti grube i fine rešetke. Postavljaju se na ulazu u tlačni cjevovod ili ispred turbine neposredno na kraju derivacijskog kanala. Iza zahvata postavlja se taložnica ili pjeskolov koji odvaja pijesak i kamenčiće nanesenih vodom [4].

**Turbinski zatvarači** imaju funkciju zatvaranja turbine u slučaju prestanka rada te se postavljaju neposredno prije ulaza u turbinu. **Izlazni dijelovi turbine** imaju funkciju reduciranja gubitaka te se izvode kao difuzori u obliku stošca.

### **Elektrostrojarski dijelovi:**

Najosnovniji element svake hidroelektrane je **turbina** s kojom dolazi do promjene iz kinetičke energije strujanja vode u mehaničku energiju vrtnje vratila turbine odnosno generatora [4]. Ima mnogo različitih tipova turbina koji moraju zadovoljiti uvjete konfiguracije terena odnosno vrsti vodotoka te potrebe koje hidroelektrana mora zadovoljiti u smislu proizvodnje električne energije. U pravilu, turbine koje se ugrađuju kod malih hidroelektrana su umanjene verzije turbina koje se ugrađuju kod velikih

hidroelektrana. Potrebno je voditi računa kod izbora tipa turbina koja bitno ovisi o protoku i padovima da se što više efikasno koristi turbina.

Klasifikaciju turbina dijelimo na:

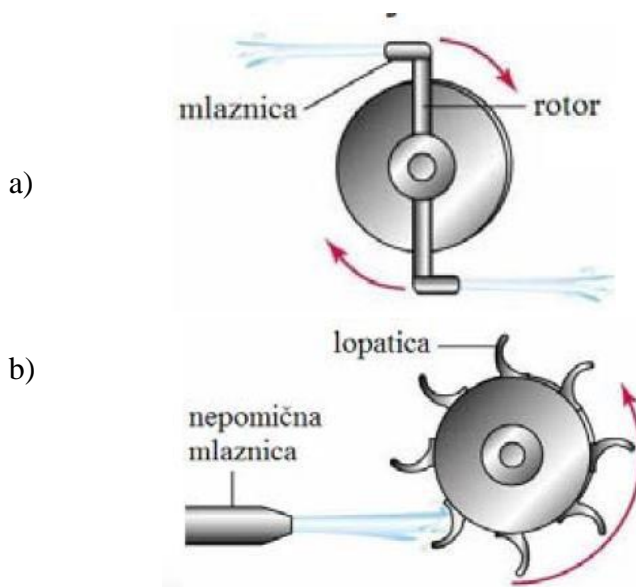
### I. Reakcijske turbine

- Snaga proizlazi iz pada tlaka na turbini
- Potpuno je uronjena u vodu
- Obodna brzina se pretvara u snagu osovine
- Najčešći tipovi ove vrste turbina: Propelerna, Francisova i Kaplanova turbina

### II. Impulsne turbine

- Pretvaraju kinetičku energiju vode tako da mlaznice pogađaju lopatice
- Nema pada tlaka na turbini
- Najčešći tipovi ove vrste turbina: Peltonova, Turgo i Crossflow turbina

Na slici 2.17. je shematski prikaz rada reakcijske u impulsne turbine.



Slika 2.17. Shematski prikaz rada turbina: a) Reakcijska b) Impulsna [16]

Peltonova turbina koristi koncept sile mlaza za stvaranje energije. Voda se usmjerava u cjevovod pod tlakom s uskom mlaznicom na jednom kraju. Voda prska iz mlaznice u mlazu, udarajući u dvostruke kante pričvršćene na kotač. Udar jakog mlaza na zakrivljene

žlice stvara silu koja rotira kotač s visokom učinkovitošću od 70% do 90%. Peltonove turbine dostupne su u različitim veličinama i najbolje rade u uvjetima niskog protoka i visokog pada [14].

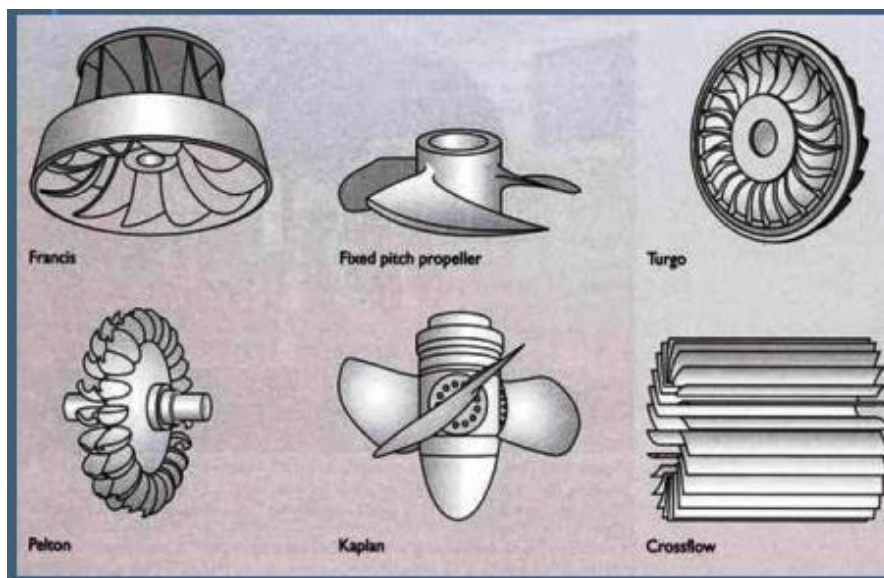
Turgo je nadograđena verzija Pelton turbine. Koristi isti koncept mlaza, ali Turgo, koji je manji od Peltona za otprilike 50%, je nagnut tako da mlaz pada u tri kante odjednom. Kao rezultat toga, Turgo kotač se kreće dvostruko brže. Također je manje masivan, nije potrebno velika količina stupnjeva prijenosa te je kvalitetan za rad sa minimalnim poteškoćama. Turgo može raditi u uvjetima niskog protoka, ali zahtijeva srednji ili visoki pad [14].

Turbina s križnim protokom, odnosno *Crossflow* projektirana je pomoću velikog cilindričnog mehanizma koji se sastoji od središnjeg rotora okruženog „kavezom“ lopatica raspoređenih u obliku vodenog kotača. Ove su lopatice općenito naoštrene kako bi se povećala učinkovitost turbine smanjenjem otpora protoku vode. Voda se usmjerava na turbinu kroz mlaznicu koja stvara ravnu vodenu ploču, a zatim se usmjerava na lopatice pomoću vodeće lopatice. Voda prvo udara u lopatice i kreće se prema unutrašnjosti turbine, pri čemu voda još jednom udara u lopatice dok voda izlazi iz središta turbine [17].

Najčešće korištena turbina hidroelektrana je Francis turbina. Voda koja prolazi kroz Francis turbinu gubi pritisak, ali ostaje približno iste brzine. Nakon što voda prodire u turbinu, voda uvijek teče prema unutra odnosno prema središtu. Nakon što voda prođe kroz turbinu, ona izlazi aksijalno – paralelno s rotacijskom osi. U tim postrojenjima voda pod visokim pritiskom ulazi u turbinu kroz kućište puževe kućice. Time se smanjuje tlak dok se voda izvija kroz cijev, ali se brzina vode održava. Nakon prolaska kroz spiralnu, voda se kreće kroz vodeće lopatice i usmjerava se prema lopaticama na vodilici pod optimalnim kutovima. Proces skretanja vode kroz lopatice klizača rezultira silom koja gura lopatice u suprotnom smjeru od skretanja vode. Budući da se turbina pomiče kao rezultat te reakcijske sile, Francisova turbina jedna je od najpoznatije reakcijske turbine [17].

Kod Kaplanove turbine voda teče u i iz Kaplanovih turbina duž njihove rotacijske osi - aksijalni tok. Posebna karakteristika Kaplanove turbine je ta što lopatice mogu mijenjati svoj kut na zahtjev kako bi održale maksimalnu učinkovitost za različite brzine protoka vode. Površina u koju voda može ući u ove turbine je velika, jednaka cijeloj površini koju zauzimaju lopatice. Velika površina Kaplanovih turbina čini ih najkorisnijima tamo gdje teče velika količina vode odnosno veliki protok, a mogu se koristiti čak i u branama s relativno niskim padom. Ovo je posebno važno budući da je prije razvoja Kaplanove

turbine većina turbina bila prikladna samo za velike visine vode [17]. Na slici 2.18. je grafički prikaz različitih tipova turbina.



Slika 2.18. Grafički prikaz tipova turbina [16]

Za odabir odgovarajuće turbine za male hidroelektrane, najvažniji proračunski parametri su neto pad i protok vodotoka. Važna veličina za odabir odgovarajuće turbine za sustav je njezina specifična brzina.

$$N_s = n \sqrt{\frac{P_t}{H^2 \sqrt{H_n}}} \approx 53n \frac{r_{ul}}{v_{ul,r}} \approx 500 \cdot \left(\frac{r_{ul}}{r_r}\right) \cdot \left(\frac{v_r}{v_{ul,r}}\right) \quad (1)$$

Gdje su:

$N_s$  – specifična brzina (Tablica 2.1.)

$n = 60 \frac{v_r}{2\pi r_r}$  – brzina vrtnje rotora [ $\text{min}^{-1}$ ]

$v_r$  – brzina lopatice [m/s]

$r_r$  – polumjer rotora [m]

$P_t$  – snaga turbine [W] ili [kW]

$H_n$  – neto pad vodotoka [m]

$r_{ul}$  – polumjer ulazne površine [m]

$v_{ul,r}$  – brzina vode na ulazu u rotor [m/s]

Tablica 2.1. Specifične brzine pojedinih izvedbi turbine [14]

TURBINA	SPECIFIČNA BRZINA
Francisova	70 – 500
Propelerska	600 – 900
Kaplanova	350 – 1000
Peltonova	10 – 35

Pomoću specifične brzine možemo odabrati turbinu koja najviše odgovara potrebama sustava MHE, što je vidljivo u tablici 2.1., a njezina veličina se određuje pomoću odnosa između protoka i neto pada vodotoka koji su ulazni parametri za odabir turbine.

**Multiplikator** je uređaj koji je potreban u svakoj MHE te se pomoću nje povećava broj okretaja vratila turbine na vrijednost koja je potrebna za pogon vratila generatora.

Funkcija **generatora** je pretvaranje mehaničke energije osovine u električnu energiju. Postoje dvije vrste generatora – sinkroni i asinkroni. Osim aktivne snage, sinkroni generatori proizvode i reaktivnu snagu te u odnosu na električnu mrežu mogu biti induktivni ili kapacitivni. Asinkroni generatori mogu biti kapacitivni pri čemu se reaktivna snaga može jeftinije proizvoditi statičkim kompenzatorima, imaju bolju iskoristivost, mogu se više preopteretiti te je jednostavniji priključak na mrežu, a cijena im je niža. Nedostatak im je što moraju koristiti struju magnetiziranja iz mreže te je potrebno ugraditi kondenzatorske baterije što ujedno poskupljuje kompletno postrojenje [14].

U slučaju manjih snaga MHE priključenje se izvodi direktno na mrežu i **transformator** nije potreban, u slučaju većih snaga tada se izvodi priključak na mrežu višeg napona.

MHE se pomoću **regulacijskih i zaštitnih dijelova** odvija ovisno na sustav na koji je priključen. Sustav koji je spojen na paralelni sustav, upravljanje, sinkronizacija, opterećenje i zaštita se odvija automatski. U slučaju da elektrana ima nekoliko vlastitih potrošača te ako radi neovisno o elektroenergetskom sustavu, regulator turbine automatski održava nazivnu frekvenciju napona što je uvjetovano o trenutnom stanju opterećenja u sustavu. Ovim načinom rada je potrebna prisutnost odgovarajuće stručne osobe koja prati razinu vode u zahvatu te treba uključiti generatorski prekidač nakon uspostavljanja nazivnog napona, pratiti stanje potrošača, opterećenje mreže i sl.



### 2.3. Proizvodnja električne energije iz MHE

Za proizvodnju električne ili mehaničke energije, hidroenergetski sustavi koriste vodu iz prirode odnosno tekuću vodu. Iako postoji nekoliko načina da se tekuća voda iskoristi za proizvodnju energije, protočni sustavi, koji ne zahtijevaju velike akumulacije, često se koriste za projekte malih hidroelektrana. Za projekte protočnih hidroelektrana, dio riječne vode preusmjerava se u kanal, cjevovod ili cjevovod pod tlakom koji ga isporučuje u vodeni kotač odnosno turbina. Gibanje osovine može se koristiti za mehanički procesi, kao što je crpljenje vode, ili se može koristiti za napajanje alternatora ili generatora za proizvodnju električne energije [14].

MHE se smatraju obnovljivim izvorima energije zbog svog minimalnog utjecaja na okoliš te korištenje prirodnih resursa. Trenutna studija usmjerena je na MHE koje imaju samo zanemariv skladišni kapacitet ili su u toku rijeke te njihova instalacija ne zahtijeva izgradnju brane i naknadno plavljenja okolnih područja. Takve MHE imaju ograničenu vodu skladišnog kapaciteta i ne oslanjaju se na uobičajeni rad rezervoara. Sukladno tome, proizvodnja energije u osnovi ovisi o količini protoka vode. Očito, ova karakteristika MHE je koristan za okoliš, ali i smanjuje fleksibilnost njihovog rada. Dakle, energija MHE proizvodnja je proporcionalna protoku rijeke i prati njegovu varijabilnost [15]. Projektirani kapacitet snage i snage kinetičke turbine izračunava se iz sljedećih formula (1) i (2):

Snaga potencijalne turbine:

$$P = \rho \times g \times Q \times H \times n_{tot} \quad [\text{W}] \quad (2)$$

Gdje su:

P – snaga hidroelektrane [W]

$n_{tot}$  – učinkovitost turbine

$\rho$  – gustoća vode [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

g – ubrzanje sile teže (gravitacijska sila) [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

Q – protok vode [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

H – hidraulička visina (visina vodenog stupca) [m]

Snaga kinetičke turbine:

$$P = \frac{\rho}{2} \times A \times v^3 \times n_{tot} \quad [\text{W}] \quad (3)$$

Gdje su:

$P$  – snaga hidroelektrane [W]

$n_{\text{tot}}$  – učinkovitost turbine

$\rho$  – gustoća vode [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v$  – srednja brzina tečenja vode u vodotoku [ $\text{m/s}^2$ ]

$A$  – ulazna površina [ $\text{m}^2$ ]

#### **2.4. Primjeri malih hidroelektrana u Hrvatskoj**

U Republici Hrvatskoj ima 31 MHE ukupne instalirane snage 33 MW, a ukupna proizvodnja električne energije u 2020. godini iz malih hidroelektrana iznosi 102,0 GWh [23]. Dva su industrijska postrojenja, u privatnom vlasništvu je devet postrojenja te preostala postrojenja su u vlasništvu HEP-a. Katastar malih vodotoka, 1985. godine, izdao je prvu procjenu mogućih lokacija hidroelektrana na 134 vodotoka, gdje je je 63 vodotoka ostvarilo pogodnu ocjenu za izgradnju hidroelektrane. Na ta 63 vodotoka određene su 699 lokacije te su postavljene četiri kategorije.

Ukupna instalirana snaga svih 699 lokacija elektrana bila je predviđena oko 177 MW, a tehnička iskoristiva godišnja proizvodnja 567,7 GWh [18]. Za velike investitore, prva kategorija je bila najprivlačnija no problem je što su te lokacije na područjima zaštićenog okoliša. Četvrta kategorija se mogla eliminirati iz mogućnosti korištenja hidroenergetskog potencijala iz razloga što je neto pad vrlo mali i posljedica toga je mala instalirana snaga što stvara malu količinu energije, a ujedno je pokazatelj kao loša investicija te zato su te lokacije isključene za izgradnju.

Izrada Katastra malih hidroelektrana bila je predviđeno u dvije faze. Prva faza je izradila nacрте za postrojenja na 13 vodotoka. Otkriveno je 50 mogućih lokacija, a 10 mogućih lokacija je detaljnije proučeno nudeći osnovne ciljeve za izgradnju hidroelektrane, smjernice za vrstu građevina, hidrostrojarske opreme, itd. Pilot program koji je započeo 1998. godine, gdje je pokriveno 50 lokacija iz prve faze Registra malih hidroelektrana i 17 lokacija iz druge faze. U drugoj fazi je trebalo na istom principu obraditi preostale vodotokove za koje su utvrđeni potezi korištenja. Prije završetka ove faze, donesen je tada novi Zakon o hrvatskoj elektroprivredi u kojem se fizičkim i pravnim osobama izvan HEP-a omogućava ulaganje u izgradnju malih hidroelektrana u Republici Hrvatskoj te bavljenje proizvodnjom i distribucijom električne energije svim korisnima [25]. Cilj je bio obuhvatiti cjelokupni postupak planiranja, projektiranja i izgradnje malih hidroelektrana te prikazati

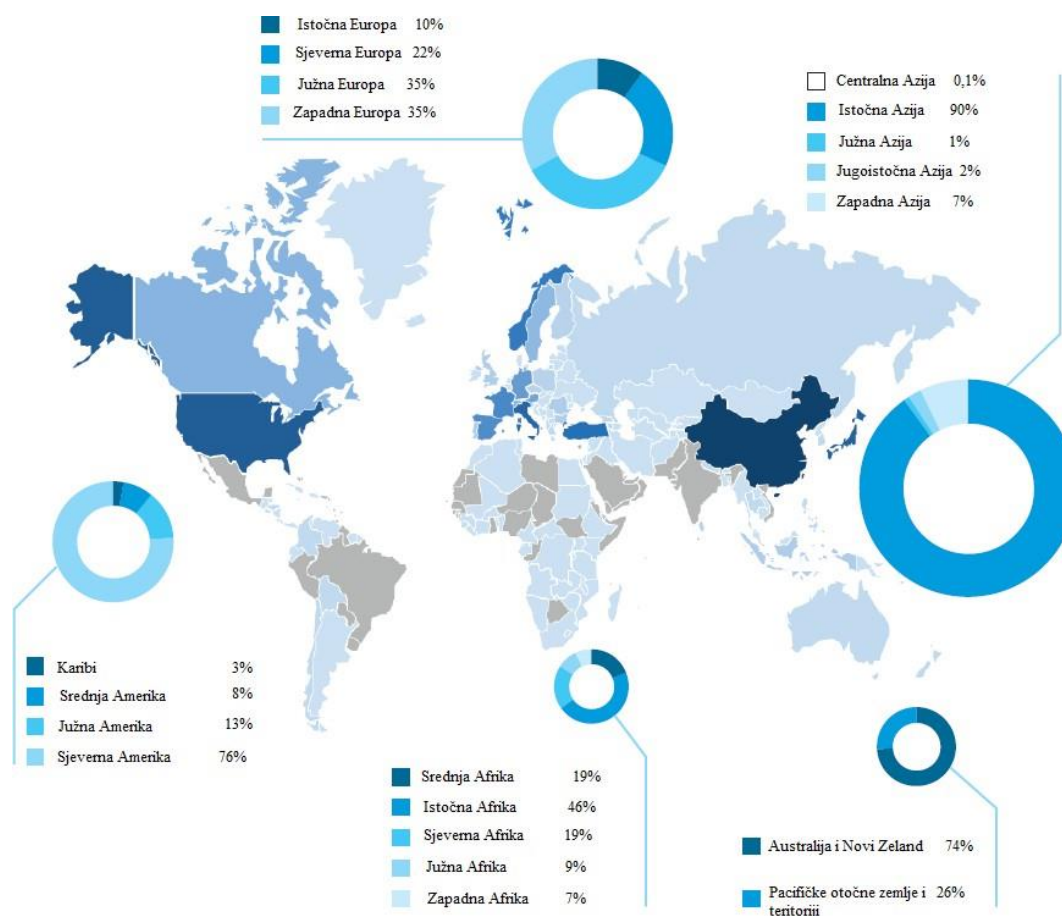
hrvatski potencijal malih hidroelektrana na najbolji mogući način. Zbog procesa prostornog planiranja te samog utjecaja zaštite okoliša i kulturne baštine na kraju je ostalo 30 lokacija u pilot programima. U tablici 2.2. je popis malih hidroelektrana u Republici Hrvatskoj.

Tablica 2.2. Popis MHE u Republici Hrvatskoj [27]

MALE HIDROELEKTRANE	RASPOLOŽIVA SNAGA (MW)	PROSJEČNA PROIZVODNJA (GWh)
MHE Jaruga	7,2	28,0
MHE Ozalj	5,5	23,0
MHE Golubić	7,5	21,0
MHE Zeleni Vir	1,7	7,7
MHE Roški Slap	1,764	7,5
MHE Dubrava	1,1	7,3
MHE Čakovec	1,1	6,8
CHE Fužine	4,6 MW/-4,8 MW	4,7
MHE Zavrelje	2	4,0
mHE Dubrava	0,68 MW = 2 x 0,34 MW	4,0
MHE Varaždin	0,58	3,8
MHE Tvornica cementa Majdan	1,2	3,5; ne radi trenutno
MHE Finvest	1	3,2
mHE Čakovec	0,34	2,2
MHE Pamučna industrija Duga Resa	1,1	2,0
mHE Krčić	0,375	2,0
mHE Pleternica	0,22	1,1?
RHE Lepenica	1,14/-1,25	0,5
μHE Bujan - Kupčina	0,03	0,1
μHE Finvest	0,03	0,1
μHE Mataković	0,015	0,1
μHE Urh - Čabranka	0,008	0,05

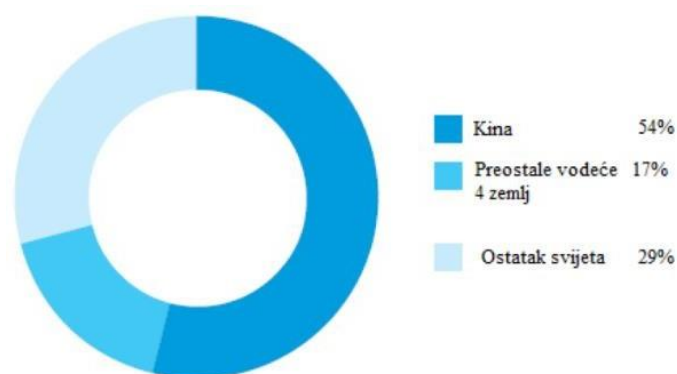
## 2.5. Primjeri malih hidroelektrana u svijetu

Geografski prikaz na slici 2.19 o ukupnom broju MHE u svijetu je odraz socioekonomskih uvjeta, različitih propisa i poticaja te različiti hidrološki potencijal svake države. Kina, kao glavni predvodnik s 54 % ukupnog svjetskog instaliranog kapaciteta uzimajući u obzir samo MHE ima više od četiri puta veći instalirani kapacitet od Sjedinjenih Američkih Država, Japana, Italije i Norveške zajedno [28].



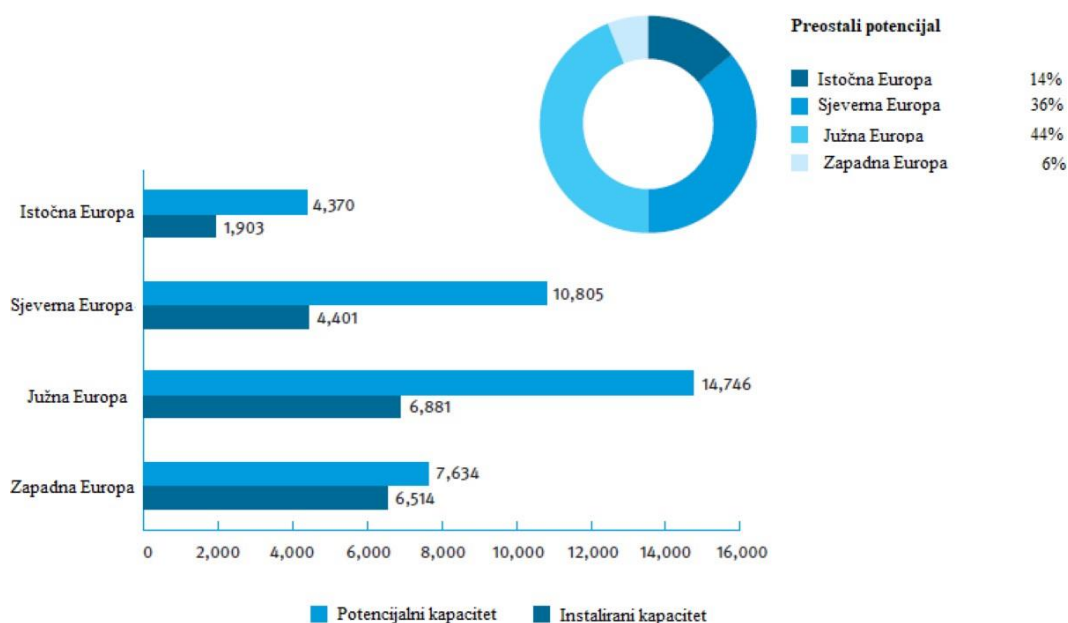
Slika 2.19. Instalirane MHE do 10 MW kapaciteta u svijetu [28]

Kina, SAD, Japan, Italija, Norveška i Turska čine 67 % ukupnih svjetskih instaliranih kapaciteta MHE. Na slici 2.20., vidljivo je da Kina prevladava ne samo s malim hidroelektranama u Aziji, nego i na svjetskoj razini te ima potporu Vlade i tehnološkoj zrelosti domaćeg hidroenergetskog sektora.



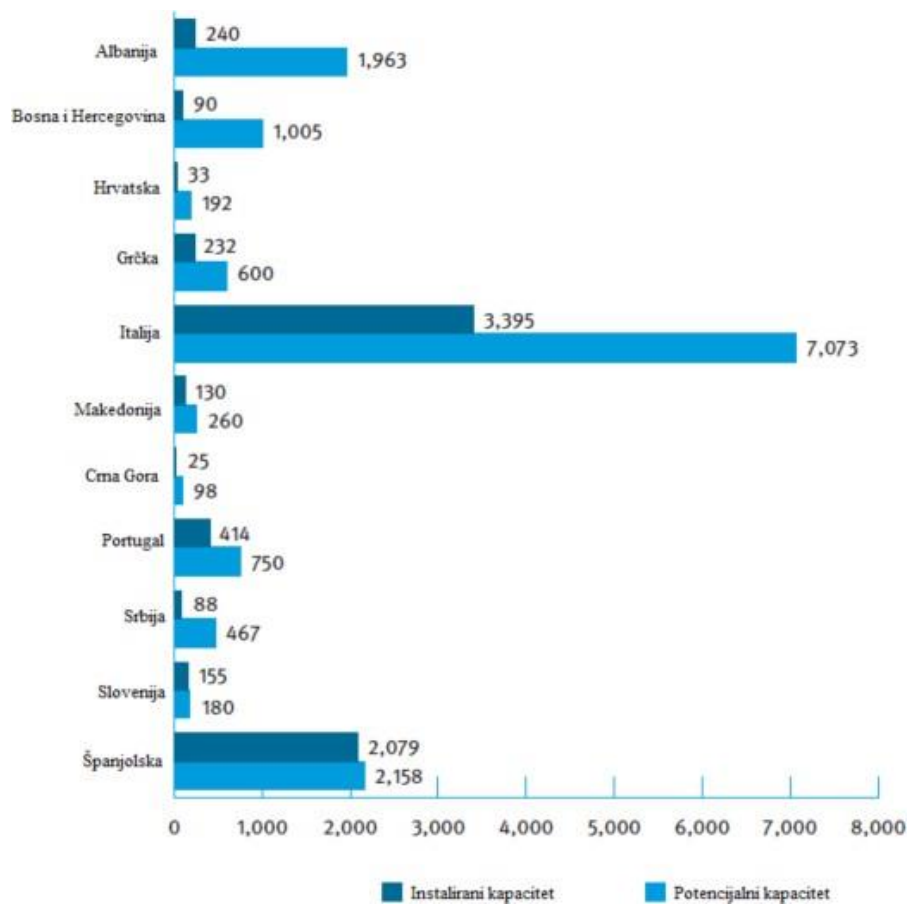
Slika 2.20. Udio ukupnih instaliranih kapaciteta MHE [28]

Europa ima povijest razvoja MHE, što je omogućilo da dosegne veliku razinu instaliranog kapaciteta. S obzirom na raznoliki krajolik i klime, potencijal izgradnje MHE varira u svakoj regiji. Neke se zemlje suočavaju s oštrim propisima i zakonima zaštite okoliša koji otežavaju povećanje i proširenju izgradnje MHE te je time i usporena njihova izgradnja. Na slici 2.21. je prikaz instaliranog i potencijalnog kapaciteta malih hidroelektrana po europskim regijama.



Slika 2.21. Instalirani i potencijalni kapaciteti MHE po europskim regijama [28]

Republika Hrvatska se nalazi u regiji Južne Europe te je u slici 2.22 prikazana usporedba s ostalim zemljama u regiji.



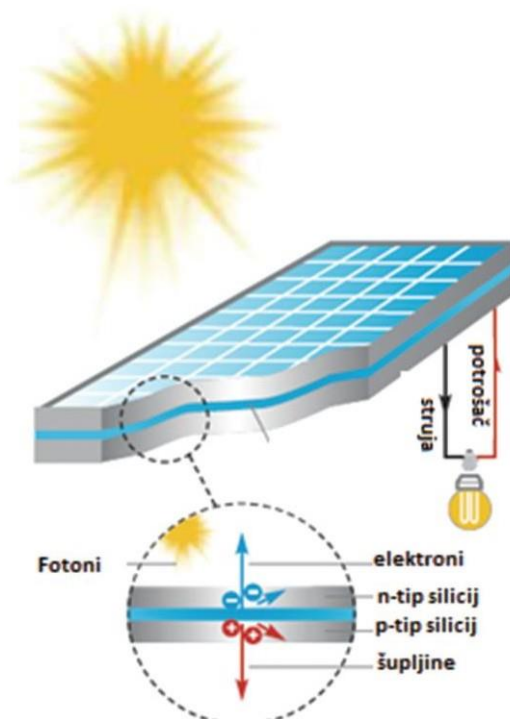
Slika 2.22. Instalirani i potencijalni kapaciteti MHE u regiji Južne Europe [28]

### 3. Princip proizvodnje električne energije iz solarnih fotonaponskih sustava

#### 3.1. Osnovne značajke solarnih fotonaponskih elektrana

Fotonaponska tehnologija koristi energiju Sunca kao besplatan i neograničen izvor energije te vrši direktnu pretvorbu svjetlosne energije u električnu energiju. Ukupna količina Sunčeve energije koja dođe do zemljine površine je oko 2000 puta veća nego ukupna potrošnja energije u cijelom svijetu [20]. Fotonaponsku proizvodnju istosmjernje električne struje u poluvodičkom materijalu otkrio je Becquerel 1893. godine te je time otkrivena osnovna metoda rada fotonaponskih sustava proizvodnje električne energije iz energije Sunčevog zračenja. Prvi fotonaponski modul je izgradio Bell Laboratories 1954. godine, a 1960. godine počelo je razvijanje svemirske industrije za osiguravanje električne energije na svemirskoj tehnologiji.

U idealnim uvjetima, oko Ekvatora, energija sunčevog zračenja proizvodi ekvivalent snage od 1 kW po m<sup>2</sup> ravne površine, odnosno više od 10 MW po ha [21]. Fotonaponske ćelije ne ispuštaju štetne čimbenike u okoliš i ne proizvode buku, izrađuju se modularno pri čemu specifična ulaganja po instaliranom kW ne ovise o veličini modula. Fotonaponske ćelije se grupiraju u međusobno spojene panele i mrežne panele te tako čine jedan fotonaponski modul.



Slika 3.1. Fotonaponski efekt [20]

Fotonaponske ćelije imaju funkciju pretvorbe Sunčeve svjetlosti u električnu energiju te mogu biti proizvedene od sljedećih materijala [4]:

- Monokristaličnog i polikristaličnog silicija
- Amornog silicija
- Kadmij-telurida ili bakar-indij-diselenida.

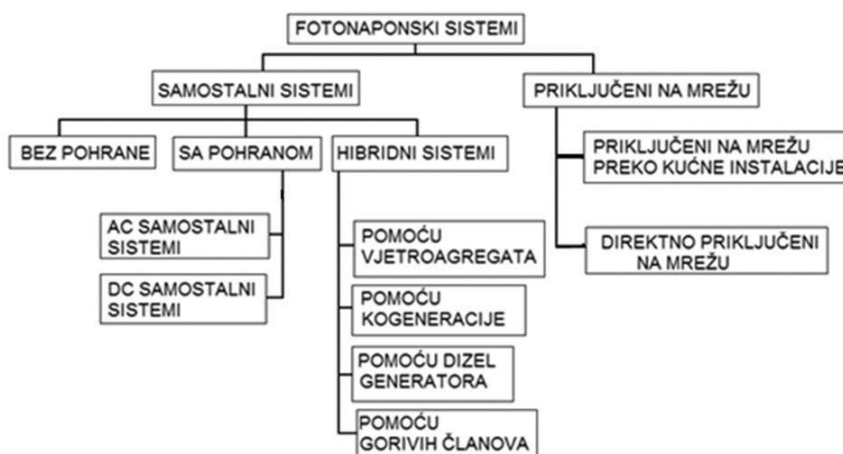
Fotonaponske ćelije se u današnje vrijeme najčešće proizvode iz monokristaličnog i polikristaličnog silicija s obzirom da je silicij prisutan na Zemlji u vrlo velikim količinama i prirodni je poluvodič (slika 3.1.).

### 3.2. Podjela fotonaponskih sustava

Fotonaponski sustavi predstavljaju integrirani skup fotonaponskih modula i drugih potrebnih komponenata te su projektirane kako bi apsorbirali Sunčevu energiju i direktno pretvarali u električnu energiju kojim bi se moglo osigurati rad određenog broja istosmjernih i/ili izmjeničnih potrošača samostalno ili sa rezervnim napajanjem [20].

Fotonaponski sustavi se mogu podijeliti u dvije osnovne grupe kako je prikazano na slici 3.2.:

- Fotonaponski sustavi koji nisu priključeni na elektroenergetsku mrežu (*engl. Off-grid*)
- Fotonaponski sustavi koji su priključeni na javnu elektroenergetsku mrežu (*engl. On-grid*)

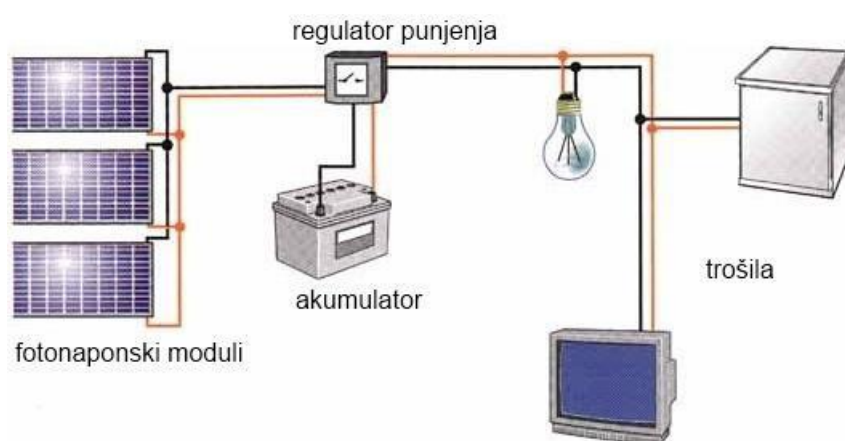


Slika 3.2. Osnovna podjela fotonaponskih sustava [20]



Samostalni fotonaponski sustavi su projektirani sustavi s ili bez pohrane energije te mogu biti hibridni sustavi. Glavni komponenti samostalnog fotonaponskog sustava su vidljivi na slici 3.3.:

- Fotonaponski moduli
- Regulator punjenja
- Akumulator
- Izmjenjivač
- Trošila



Slika 3.3. Glavni komponenti samostalnog fotonaponskog sustava [22]

**Fotonaponski moduli** uključujući i nosivu konstrukciju predstavljaju osnovni dio svakog fotonaponskog sustava. Postolja odnosno konstrukcija na kojoj se postavljaju fotonaponski moduli mogu biti fiksni ili fleksibilni. U slučaju manjeg sustava, do 1 kW vršnih, predlaže se fleksibilna montaža koja omogućava dnevno podešavanje azimuta i sezonsko podešavanje nagiba modula u odnosu na jug u razdoblju od studenog do ožujka. Podešavanje u različitim sezonama je također vrlo korisno u kao npr. u zimskom periodu u mjesecima prosinac, siječanj i veljača gdje nagib modula treba postavljen između  $60^\circ$  i  $80^\circ$ , u svibnju, lipnju i srpnju nagib je najpovoljniji između  $10^\circ$  i  $30^\circ$  kao optimalni nagibi, a u proljeće i na jesen potrebno je podesiti nagib modula od  $45^\circ$ . Sezonskim podešavanjem ostvarujemo efikasnost povećanja za otprilike 40% u odnosu na fiksni položaj. U slučaju naoblake i u dane smanjene vidljivosti, dnevno podešavanje azimuta nije potrebno jer su tada doprinosi direktnog Sunčevog zračenja posve zanemarivi [4].

**Regulatori punjenja** odnosno regulatori za praćenje izlazne snage modula i punjenja baterija u određenom intervalu izvode stalno podešavanja napona na modulima, na način

da površina ispod I-U karakteristika koja određuje snagu modula uvijek bude maksimalna te se tako na njima podešava potreban napon 12 V ili 24 V. Važna funkcija regulatora je automatski nadzor punjenja i pražnjenja baterija. U slučaju ako su baterije postigle donju granicu svog kapaciteta, isporuka električne energije trošilima se automatski prekida, čak i u slučaju ako je ispražnjenost na razini 20% svog kapaciteta. Projektant mora precizno utvrditi krivulju opterećenja sustava kako bi što bolje dimenzionirao potrebni kapacitet baterija za akumuliranje električne energije. U slučaju prevelikog dimenzioniranja veći su troškovi, a u suprotnom slučaju da ne dođe do značajnih gubitaka u vremenu kada su baterije pune, a potrošnja nije dovoljna [4].

**Akumulatori** se koriste kako bi mogli akumulirati električnu energiju za noćnu upotrebu te u dane kada je smanjenja insolacija.

Funkcija **invertera** je pretvaranje istosmjernog, 12 V ili 24 V, u sinusoidni izmjenični napon 230 V, koji omogućava korištenje svih standardnih električnih trošila u kućanstvu. Potrebno je obratiti pozornost na tehnologiju pretvorbe istosmjernog u izmjenični napon. Također je potrebno obratiti pozornost koliko inverter može izdržati preopterećenje kroz kraće vrijeme što je važan podatak u slučaju istovremenog pokretanja snažnih električnih uređaja. Veličinu invertera je potrebno ugraditi približno nazivnoj vršnoj snazi fotonaponskog modula. Razlog je kako gubici u inverteru rastu prilikom rada na manjim snagama od nazivne npr. u slučaju fotonaponskog sustava vršne snage 500 W, najpovoljnije je inverter nazivne snage između 500 W i 700 W, pri čemu gubici na inverteru u području ne iznose više od 10 % [4].

Za samostalne fotonaponske sustave, potrebno je dobro planirati i projektirati ovakve sustave s obzirom da nema sekundarnog izvora električne energije odnosno nema priključka na distribucijsku mrežu. Potrebno je pridržavati se energetskeg budžeta te su ovi sustavi često predimenzionirani. Pohrana energije je vrlo bitna kada je količina Sunčevog zračenja smanjena ili kad je iz nekih drugih razloga je količina električne energije potrebna više nego uobičajeno. U tom slučaju je jedna solucija korištenje hibridnih sustava.

Prosječna snaga solarnog fotonaponskog sustava može se izračunati na sljedeći način [29]:

$$P_s = A \times \eta_s \times 1000 \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Gdje su:

$A$  – površina fotonaponskih panela [ $m^2$ ]

$\eta_s$  – efikasnost fotonaponskog sustava

Dnevna proizvodnja električne energije se može izračunati na sljedeći način [29]:

$$E_s = I_s \times A \times \eta_s \quad [\text{kWh}] \quad (5)$$

Gdje je:

$I_s$  – dnevni intenzitet insolacije [ $\text{Wh}/m^2/\text{dan}$ ]

### **3.3. Proizvodnja električne energije iz fotonaponskih elektrana**

Sunčeva svjetlost se sastoji od fotona i kada se čestice fotona sudare s fotonaponskom ćelijom, neke od njih će apsorbirati poluvodič, pri čemu će izbaciti elektrone iz atoma tog materijala. Nakon što su izbačeni elektroni, negativni naboj putuje do površinskog dijela ćelije, neravnoteža između podloge i površine ćelije stvara naponski potencijal, poput onoga kod pozitivnog pola baterije. Kada se te dvije površine povežu na vanjsko trošilo, poteći će struja [1].

Kada fotonaponska ćelija zasvijetli, tj. apsorbira Sunčevo zračenje, na njegovim se krajevima fotonaponskim efektom javlja napon te tako postaje izvor električne struje. Kada spoj apsorbira svjetlost, energija apsorbiranih fotona prenosi se na sustav elektrona u materijalu, što rezultira stvaranjem nositelja naboja koji se odvajaju u samom spoju. Nabijeni nositelji mogu biti parovi elektrona i iona koji se nalaze u tekućem elektrolitu i parovi elektronskih šupljina koji se nalaze u čvrstom poluvodičkom materijalu. Nabijeni nositelji u spoju stvaraju gradijent potencijala, ubrzavaju se pod utjecajem električnog polja i cirkuliraju kao struja kroz vanjski krug. Dakle, korištenjem fotonaponskog efekta sunčeva energija se može izravno pretvoriti u električnu energiju u fotonaponskim ćelijama [20].

## 4. Hibridni energetska sustavi „Mala hidroelektrana - solarna fotonaponska elektrana“

Hibridni fotonaponski sustavi nastaju kombinacijom samostalnih, osobito većih sustava, s drugim alternativnim izvorima električne energije, kao što su vjetro turbine, **hidroelektrane**, pomoćni plinskih ili dizelskih agregata na način da se međusobno povezuju u jedan jedinstveni sustav proizvodnje energije. Na takav način je postignuta veća sigurnost i raspoloživost isporuke električne energije [4]. Hibridni energetska sustavi mogu iskoristiti postojeću energetska infrastrukturu i dodati komponente za smanjenje troškovi, utjecaji na okoliš i poremećaji sustava te je prioritet odabrati kombinaciju energetska tehnologija koja je najučinkovitija i pouzdan način za zadovoljenje potreba korisnika. Nemogućnost oslanjanja na povremene izvore energije je jedan od važnih problema jer nije ekonomično smanjivati ili povećati proizvodnju u velikim elektranama osnovnog opterećenja. Jedna od metoda za sigurniju proizvodnju energije iz OIE su mali i okretni hibridni energetska sustavi. Hibridni sustavi mogu se međusobno povezati u centralni mrežni sustav i funkcionirati kao male elektrane [24].

Prednosti korištenja hibridnih sustava:

- Hibridni sustavi potiču korištenje OIE i smanjuju emisiju CO<sub>2</sub>
- Zamjenjuju korištenja fosilnih goriva te dugoročno smanjuju troškove energije korištenje
- Postavljanje izoliranih mreža može pomoći u osiguravanju modernog pristupa energiji udaljenim područjima i na taj način izbjeći dodatnih troškova skupih prijenosnih i distribucijskih vodova iz središnje mreže
- U slučaju nedovoljnog kapaciteta obnovljivih izvora energije, jedan izvor energije može nadoknaditi količine drugog npr. solarna u ljetnom periodu kada je sušni period i više sunčanih sati, hidroenergija u proljetnom, jesenskom-zimskom periodu kada je veća količina oborina

Kod hibridnih sustava postiže se nekoliko prednosti u pogledu neovisnog rada solarnih i hidroelektrana. Općenito su hidroelektrane lako dostupne i već su priključene na mrežu, stoga postavljanje FN panela zahtijeva manje rada i infrastrukture. U takvom slučaju FN sustavi na branama ima značajne prednosti [24]:

- FN paneli mogu zaštititi dijelove hidroelektrane od sunčevog zračenja, npr. branu od direktnog utjecaj sunčevog zračenja te održavanjem stabilnosti same brane

- FN se postavljaju na postojeći konstrukciju i time se izbjegavaju dodatni troškovi gradnje
- Energija proizvedena FN sustavom može se koristiti za rad pumpe u crpno-akumulacijskim hidroelektranama, napajanje lokalne rasvjete oko MHE i sl.
- FN paneli se postavljaju na nagnuto područje, na minimalnu potrebnu udaljenost između dva panela u odnosu na analognu instalaciju na ravnom području, čime se povećava proizvodnja solarne energije

Primjer hibridnih sustava mogu biti plutajuće solarne elektrane i postojeće hidroelektrane [24]:

- Korištenje okolnog zemljišta je svedeno na minimum te su smanjeni troškovi izvođenja grubih građevinskih radova (iskopi, betoniranje i sl.)
- Učinak hlađenja koji pruža voda ispod panela povećava učinkovitost panela
- Sjena koje PV paneli pružaju na vodi smanjuje rast algi i isparavanje vode, poboljšavajući proizvodnju hidroenergije i kvalitetu vode
- Vodena površina pruža područja bez zasjenjenih objekata zajedno s većom refleksijom sunčeve svjetlosti, poboljšavajući fotonaponsko stvaranje te efikasniji rad solarnog sustava

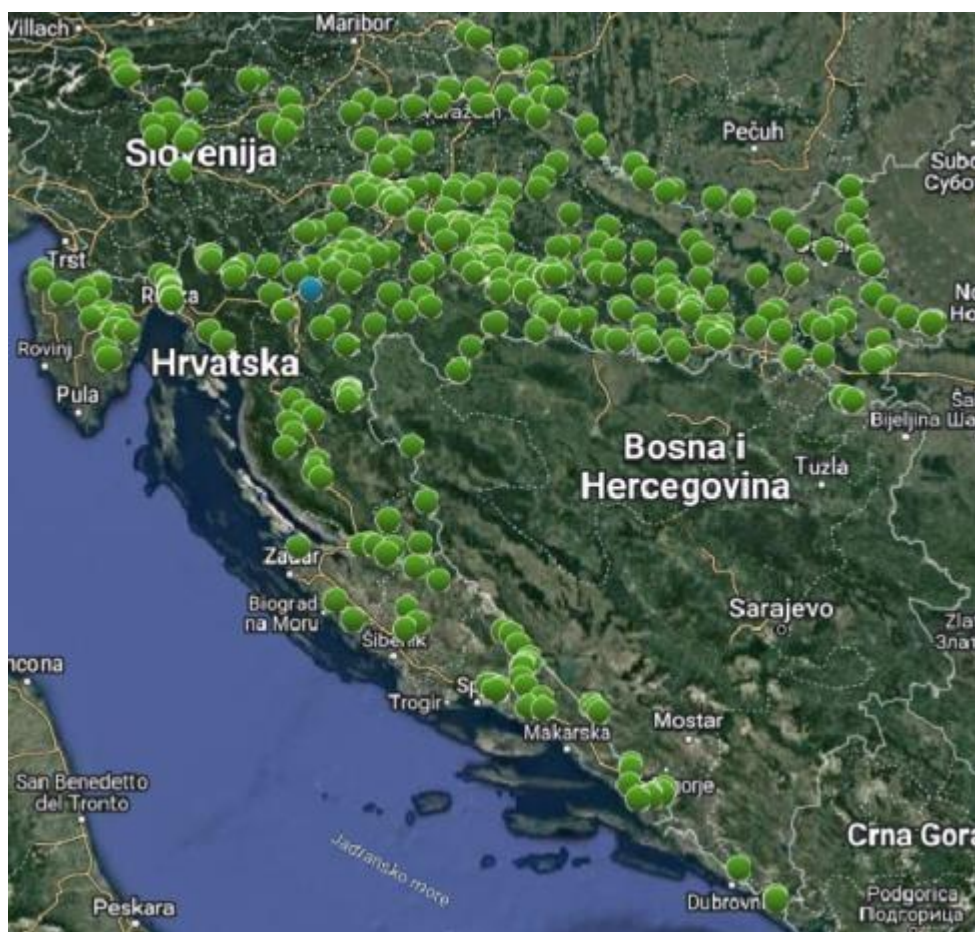
Plutajući paneli mogu povećati faktor kapaciteta hidroelektrane za 50% do 100%, pri čemu je faktor kapaciteta hidroelektrane omjer ukupne proizvedene energije prema maksimalnoj energiji koja se može proizvesti kada bi hidroelektrana uvijek radila na njegovu najveću instaliranu snagu. Plutajući paneli mogu dobiti 7% do 14% više energije od kopnene instalacije zbog smanjenja temperature. Naime, plutajući FN sustavi ima važno ograničenje, a to je da se ne može suprotstaviti jakim udarima vjetra, zbog čega je potreban vrlo velik broj sidrenih točaka kako bi ostao neoštećen [24].

U daljnjem radu će biti obrađena dva primjera moguće primjene hibridnih sustava mala hidroelektrana-solarna fotonaponska elektrana na lokacijama rijeke Česme u naselju Narta u Bjelovarsko-bilogorskoj županiji i rijeke Bednje u gradu Ludbreg u Varaždinskoj županiji s prikazom proizvodnih kapaciteta i proizvodnje električne energije.

## 5. Proizvodni kapaciteti i proizvodnja električne energije na lokacijama vodotoka Bednja i Česma

### 5.1. Općenito o rijeci Bednji i Česmi

Rijeka Česma je lijevi pritok rijeke Lonje i teče kroz Središnju Hrvatsku. Lepezasti sliv rijeke Česme stvaraju brojne tokove koji izvire na padinama Bilogore i Moslavačke gore. Rijeka Česma ima povećan protok tijekom većih oborinskih razdoblja, a smanjen protok tijekom ljetnog razdoblja kada je oborina znatno manje [26]. Rijeka Česma je izabrana za istraživanje proizvodnog kapaciteta područja Središnje Hrvatske. Na slici 5.1 je karta Republike Hrvatske sa prikazanim mjernim mjestima. Na slici 5.2 je kartografski prikaz mjerne postaje na rijeci Česmi kod naselja Narta, Bjelovarsko-bilogorska županija.



Slika 5.1. Kartografski prikaz Republike Hrvatske s prikazanim lokacijama postaja mjernih mjesta [31]



Slika 5.2. Mjerna postaja Česma kod naselja Narta, Bjelovarsko-bilogorska županija [31]

Rijeka Bednja teče cijelim svojim tokom kroz Sjeverozapadnu Hrvatsku. Izvire u Hrvatskom Zagorju kod naselja Trakošćan te se ulijeva u rijeku Dravu blizu grada Ludbrega u naselju Mali Bukovec. Zbog svoje veličine i potencijala za proizvodnju električne energije, odabrana je za istraživanje proizvodnog kapaciteta. Rijeka Bednja ima promjenjiv protok te je povećan tijekom većih oborinskih razdoblja, a smanjen tijekom ljetnog razdoblja. Na slici 5.3 je kartografski prikaz mjerne postaje na rijeci Bednja u gradu Ludbreg u Varaždinskoj županiji.



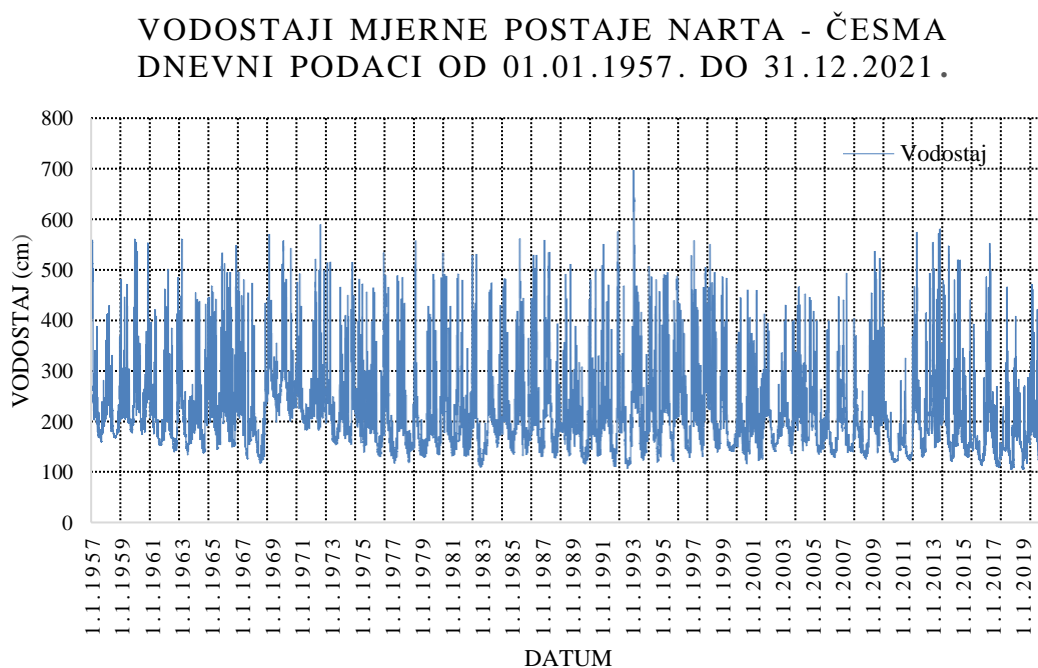
Slika 5.3. Mjerna postaja Bednja u gradu Ludbreg, Varaždinska županija [31]

Nakon što su odabrane lokacije za ispitivanje kapaciteta za proizvodnju električne energije pomoću hibridnih sustava, izvršena su hidrometrijska mjerenja na navedenim lokacijama.

## 5.2. Ulazni hidrološki podaci

Mjerne postaje na rijekama Česma i Bednja omogućavaju praćenje vodostaje kao važnog parametra za upravljanje vodama. Protok koji se proračunava i kombinacija s vodostajem dobiva se potpuna slika tečenja vodotoka i daje grafički prikazi koji se naziva krivulja protoka ili protočna krivulja. Na temelju tih vrijednosti provode se razne aktivnosti vezane uz korištenja vode a odnose se na energetiku, ekologiju, poljoprivredu te vodno gospodarstvo. Vrijednost vodostaja za mjerenu postaju Narta – Česma (slika 5.4.), protok (slika 5.5.) i karakteristični poprečni presjek korita (slika 5.6) i vrijednosti vodostaja za mjernu postaju Ludbreg – Bednja (Slika 5.7.), protok (slika 5.8.) i karakteristični poprečni presjek korita (slika 5.9.), dostupne su na službenoj internet stranici Državnog hidrometeorološkog zavoda.

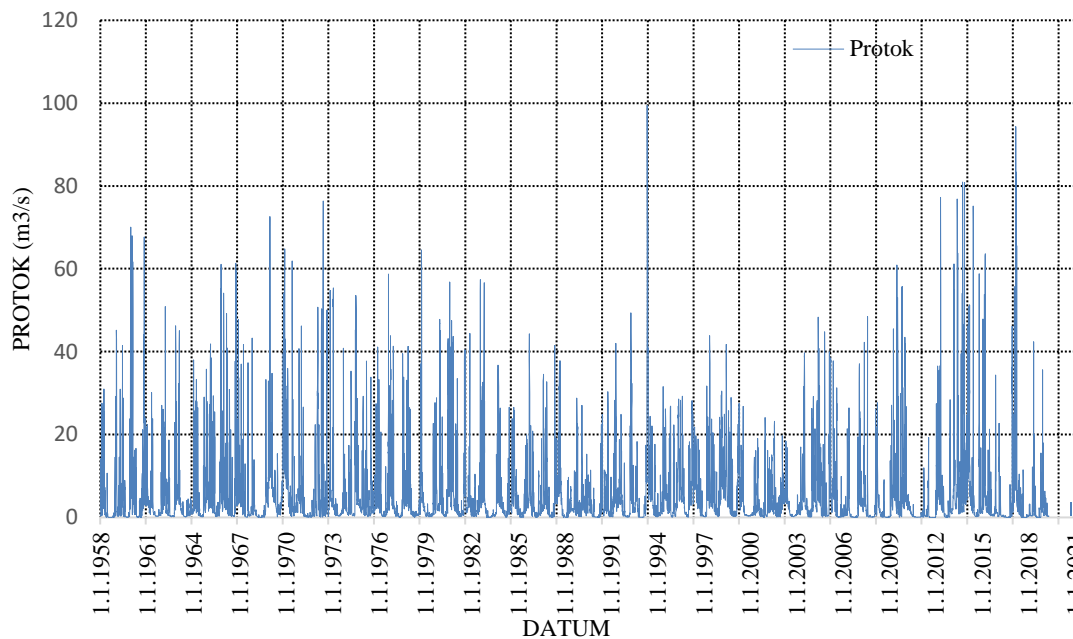
### 5.2.1. Ulazni hidrološki podaci za rijeku Česmu



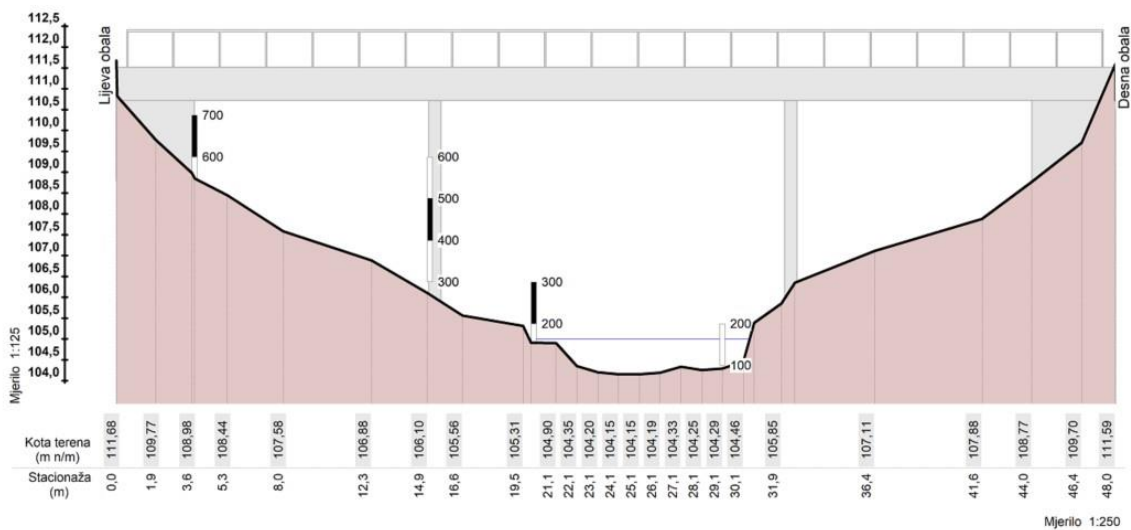
Slika 5.4. Vodostaji mjerne postaje Narta – Česma [34]



PROTOCI MJERNE POSTAJE NARTA - ČESMA  
DNEVNI PODACI OD 01.01.1958. DO 31.12.2022.



Slika 5.5. Protoci mjerne postaje Narta – Česma [34]

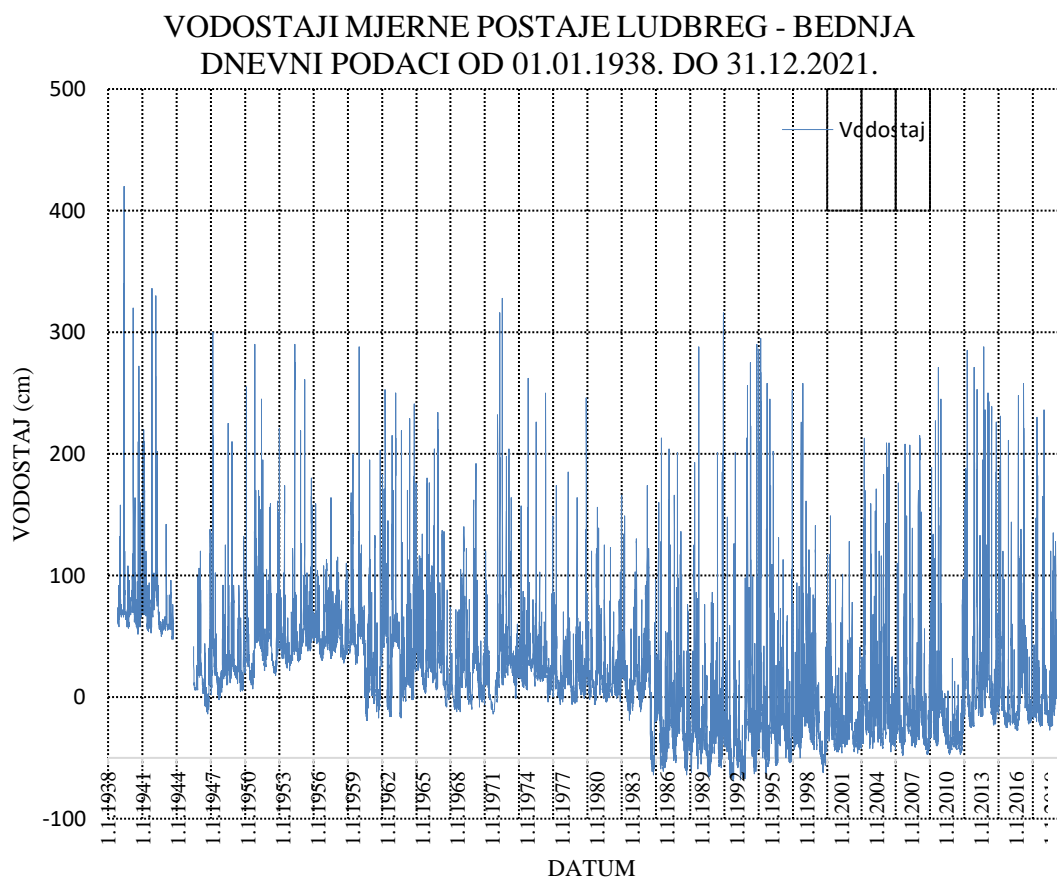


Slika 5.6. Karakteristični poprečni presjek korita Narta – Česma [34]

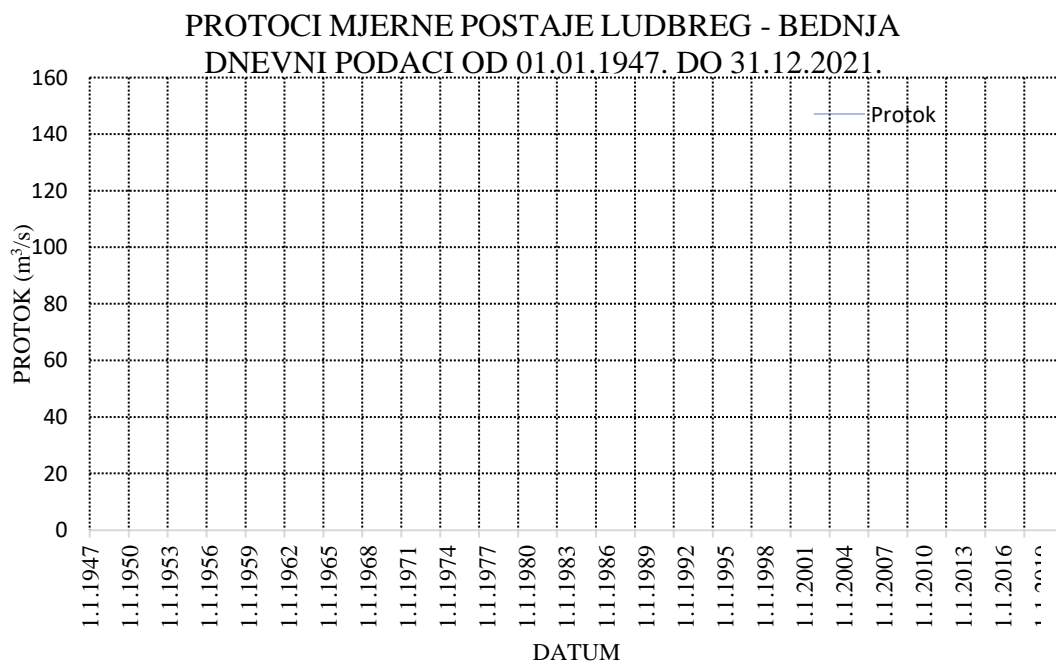
Prema slici 5.6., kota nula na mjernoj postaji Narta – Česma iznosi 103,625 m n/m. Podaci dobiveni mjerenjem su vrlo važni te ukazuje na ekstremne vrijednosti. Minimalni vodostaj za rijeku Česmu u naselju Narta je zabilježen 14.06.2020 i iznosio je 105 cm, a maksimalni vodostaj zabilježen je 17.12.1993. godine te je iznosio 696 cm (slika 5.4.), a ujedno je i tada bio zabilježen najveći protok (slika 5.5.) i iznosio je  $102 \text{ m}^3/\text{s}^3$ . Postoji značajan broj

datuma mjerenja u kojima nisu evidentirani podaci protoka i smatra se da je protok tada bio 0,00 m/s<sup>3</sup>, a razlog tome je nizak vodostaj rijeke na lokaciji mjerne postaje Narta – Česma.

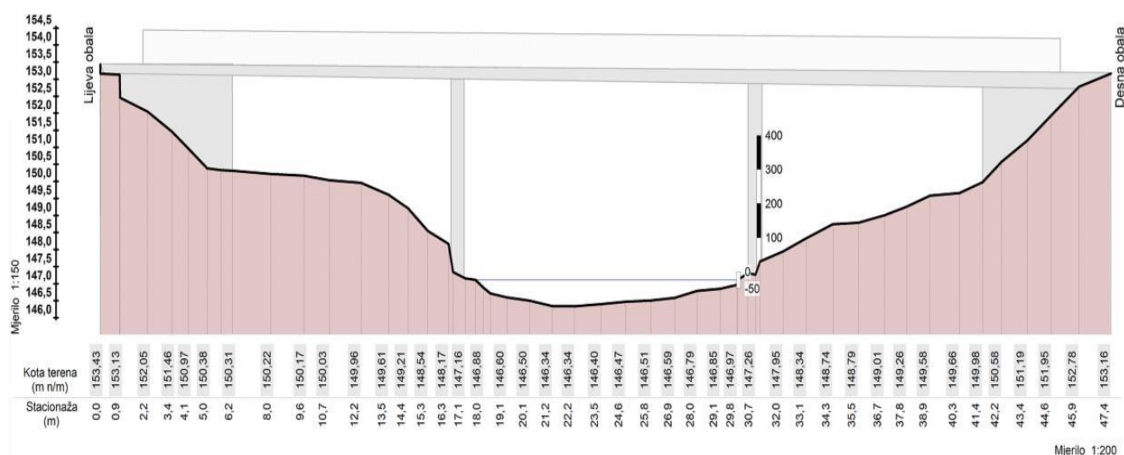
### 5.2.2. Ulazni hidrološki podaci za rijeku Bednju



Slika 5.7. Vodostaji mjerne postaje Ludbreg - Bednja [34]



Slika 5.8. Protoci mjerne postaje Ludbreg - Bednja [34]



Slika 5.9. Karakteristični poprečni presjek korita Ludbreg - Bednja [34]

Prema slici 5.9., kota nula na mjernoj postaji Ludbreg - Bednja iznosi 147,350 m n/m. Podaci dobiveni mjerenjem su vrlo važni te ukazuje na ekstremne vrijednosti. Minimalni vodostaj za rijeku Bednju u Ludbregu zabilježen je od 04.10.1992. iznosio je -69 cm, a maksimalni vodostaj zabilježen je 01.06.1939. godine te je iznosio 420 cm (slika 5.7.). Najveći protok zabilježen je 15.07.1972. i iznosio je 142 m<sup>3</sup>/s. Najniži protok zabilježen je 07.09.1947, 25.09.1947. i 28.09.1947. te je iznosio je 0,003 m<sup>3</sup>/s (slika 5.8.).

### 5.3. Hidrometrijska mjerenja

Hidrometrija je znanost koja se bavi mjernim metodama, tehnikama i instrumentarijem. Osnovni su zadatci hidrometrije određivanje elementa vodnog režima, mjerenje različitih karakteristika vezanih uz vodu (vodostaj, dubina, brzina strujanja, protok i dr.), obrada podataka mjerenja i organizacija hidrometrijskih postaja za dobivanje optimalnih informacija [30].

Hidrometrijsko mjerenje započeto je ulaskom u rijeku Česmu sa svrhom pregleda mjernog profila te kako bi se uklonilo eventualne zapreke na mjernom profilu (slika 5.10.).



Slika 5.10. Ulazak u rijeku Česmu u svrhu pregleda mjernog profila vodotoka

Određena je širina vodotoka na način da je razvučena mjerna traka s lijeve na desnu obalu vodotoka što okomitije na smjer tečenja vode (slika 5.11.).



Slika 5.11. Mjerenje širine vodotoka pomoću mjerne trake na lokaciji rijeke Česme

Koristio se uređaj za hidrometriju sa svim pripadajućim dijelovima za potpuno funkcioniranje i rad za određivanje ulaznih parametara za izračun i analizu (slika 5.12.).



Slika 5.12. Sastavljanje hidrometrijskog uređaja za mjerenje na lokaciji rijeke Česme

Profil vodotoka se podijelio na svakih 0,50 m i izvršilo se mjerenje na definiranim točkama, odnosno hidrometrija (slika 5.13., slika 5.14., slika 5.15. i slika 5.16.).



Slika 5.13. Hidrometrija na 0+002,50 m od lijeve obale rijeke Česme



Slika 5.14. Hidrometrija na 0+005,00 m od lijeve obale rijeke Česme



Slika 5.15. Hidrometrija na 0+007,50 m od lijeve obale rijeke Česme



Slika 5.16. Hidrometrija na 0+010,00 m od lijeve obale rijeke Česme

Na lokaciji rijeke Bednje u gradu Ludbregu proveden je isti postupak kao za lokaciju rijeke Česme kod naselja Narta. Profil vodotoka rijeke Bednje podijelio se na svakih 0,50 m i na definiranim točkama se izvršilo mjerenje, odnosno hidrometrija (slika 5.17. i slika 5.18.).



Slika 5.17. Sastavljanje hidrometrijskog uređaja na lokaciji rijeke Bednje

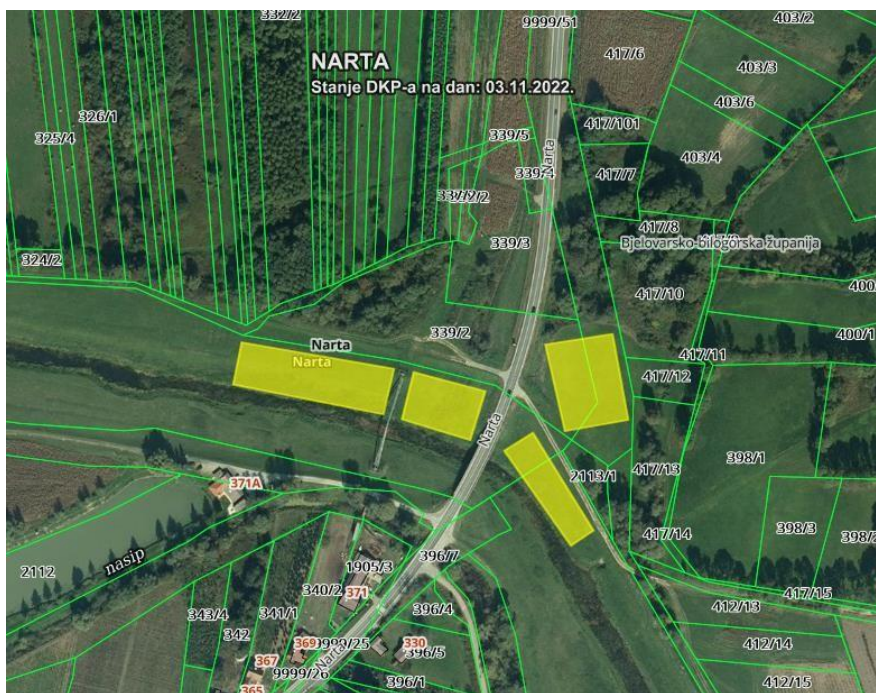


Slika 5.18. Hidrometrija u rijeci Bednji



## 5.4. Sunčevo zračenje na analiziranim lokacijama

Na lokacijama rijeke Česme u naselju Narta i rijeke Bednje u gradu Ludbregu prikazana je količina proizvedene energije iz Sunčevog zračenja na temelju zauzete površine solarnih elektrana. Svaka solarna elektrana zauzima površinu u iznosu od 7500 m<sup>2</sup> za proizvodnju električne energije (Slika 5.19. i Slika 5.20.).



Slika 5.19. Kartografski prikaz zauzete površine solarne elektrane na rijeci Česmi [32]



Slika 5.20. Kartografski prikaz zauzete površine solarne elektrane na rijeci Bednji [32]

Solarne elektrane bi bile postavljene na nadstrešnice orijentirane prema jugu zbog povoljnijeg korištenja sunčevog zračenja. Veličine solarne elektrane ovise o financijskim mogućnostima i raspoloživim sredstvima.

## **6. Dobiveni rezultati**

### **6.1. Brzine i protoci na mjernim profilima na Česmi i Bednji**

#### **6.1.1. Rezultati mjerenja na lokaciji rijeke Česme u naselju Narta**

Rezultati mjerenja na lokacijama rijeke Česme i rijeke Bednje dobiveni su na potpuno jednak način. Rezultati mjerenja na lokaciji rijeke Česme u naselju Narta prikazani su u sljedećim slikama. Na slici 6.1 prikazane su opće informacije o lokaciji te na samom početku ispisa rezultata nalaze se ime i broj mjerne postaje i ime osobe koja je provela mjerenje. Na lokaciji rijeke Česme izvršeno je mjerenje na 20 postaja, s prosječnim intervalom od 40 sekundi. Iznosi izmjerenih parametara prikazani su na slici 6.2. Na slici 6.3 prikazani su grafikoni sa izmjerenim rezultatima. Na prvom grafičkom prikazu je protok za svaku stacionažu na rijeci Česmi. Najveći iznos protoka i brzine nalazi se od sredine do desnog dijela obale rijeke dok je smanjenje uz obje obale. Na idućem grafičkom prikazu su iznosi brzine vode za svaku stacionažu te na trećem grafičkom prikazu su dubine na svakoj stacionaži.



## Discharge Measurement Summary

<b>Site name</b>	Narta
<b>Site number</b>	1
<b>Operator(s)</b>	Dalibor
<b>File name</b>	20220617-193957_Narta.ft
<b>Comment</b>	

<b>Start time</b>	17.6.2022. 18:15	<b>Sensor type</b>	Top Setting
<b>End time</b>	17.6.2022. 19:37	<b>Handheld serial number</b>	FT2H2025030
<b>Start location latitude</b>	45,839	<b>Probe serial number</b>	FT2P2024010
<b>Start location longitude</b>	16,822	<b>Probe firmware</b>	1.30
<b>Calculations engine</b>	FlowTracker2	<b>Handheld software</b>	1.7

<b># Stations</b>	<b>Avg interval (s)</b>	<b>Total discharge (m<sup>3</sup>/s)</b>
21	40	0,324

<b>Total width (m)</b>	<b>Total area (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Wetted Perimeter (m)</b>
10,000	7,160	10,283

<b>Mean SNR (dB)</b>	<b>Mean depth (m)</b>	<b>Mean velocity (m/s)</b>
32,541	0,716	0,045

<b>Mean temp (°C)</b>	<b>Max depth (m)</b>	<b>Max velocity (m/s)</b>
25,454	1,020	0,127

Discharge Uncertainty		
<b>Category</b>	<b>ISO</b>	<b>IVE</b>
<b>Accuracy</b>	1,0 %	
<b>Depth</b>	0,1 %	
<b>Velocity</b>	4,3 %	
<b>Width</b>	0,1 %	
<b>Method</b>	0,9 %	
<b># Stations</b>	2,4 %	
<b>Overall</b>	5,1 %	

<b>Discharge equation</b>	Mean Section
<b>Discharge uncertainty</b>	IVE
<b>Discharge reference</b>	Rated

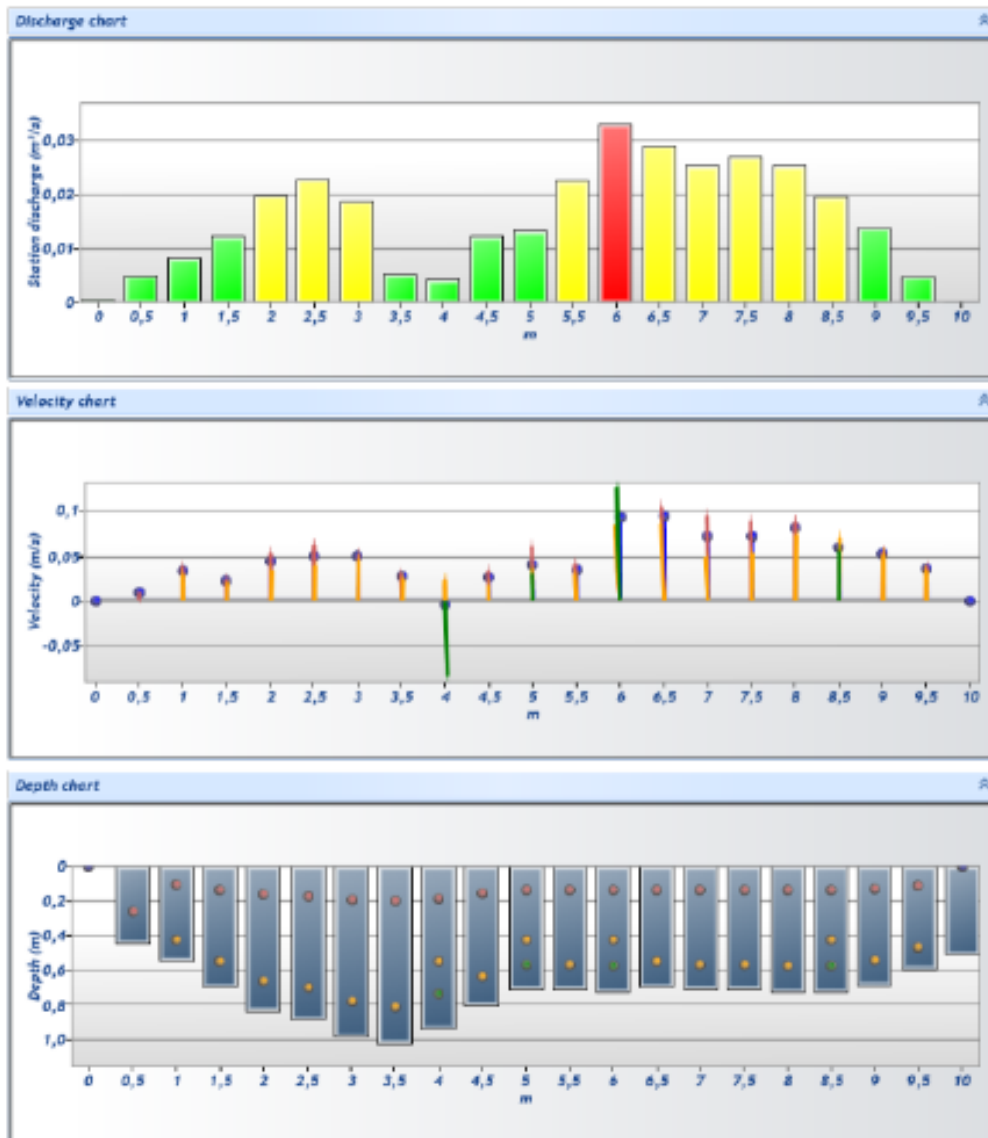
Data Collection Settings	
<b>Salinity</b>	0,000 PSS-78
<b>Temperature</b>	-
<b>Sound speed</b>	-
<b>Mounting correction</b>	0,000 %

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

Slika 6.1. Prikaz rezultata mjerenja u naselju Narta – opće informacije o lokaciji

<b>Site name</b>	Narta
<b>Site number</b>	1
<b>Operator(s)</b>	Dalibor
<b>File name</b>	20220617-193957_Narta.ft
<b>Comment</b>	

Station Warning Settings		
Station discharge OK	Station discharge < 5,000%	<span style="color: green;">■</span>
Station discharge caution	5,000% >= Station discharge < 10,000%	<span style="color: yellow;">■</span>
Station discharge warning	Station discharge >= 10,000%	<span style="color: red;">■</span>



Slika 6.2. Grafički prikazi rezultata mjerenja u naselju Narta – prikaz protoka, brzina i dubina na svakoj mjernoj stanici

Na slici 6.3. prikazani su rezultati mjerenja na mjernoj postaji Česma u naselju Narta. U prvom stupcu nalazi se redni broj mjerne postaje. U drugom stupcu prikazano je točno vrijeme početka mjerenja na svakoj postaji. U trećem stupcu nalazi se broj mjernih postaja odnosno raster mjerenja te za ovu lokaciju iznosi 0,50 m. U četvrtom stupcu prikazana je

metoda kojim su dobiveni rezultati. U slučaju da je mjerenje izvršeno metodom 0,6, tada se mjerenje vrši samo na jednoj dubini. U slučaju metode 0,2/0,8 mjerenje se vrši na dvije različite dubine, a u slučaju metode 0,2/0,6/0,8, mjerenje se vrši na tri različite dubine. U sedmom stupcu je dubina koja očitava instrument prilikom mjerenja na svakoj postaji. U preostalim stupcima prikazani su izmjereni iznosi brzine vode, površine i protoka.

<b>Site name</b>	Narta
<b>Site number</b>	1
<b>Operator(s)</b>	Dalibor
<b>File name</b>	20220617-193957_Narta.ft
<b>Comment</b>	

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 <sup>2</sup> )	Flow (m <sup>3</sup> /s)	%Q
0	18:15	0,000	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,004	0,110	0,000	0,151
1	18:16	0,500	0,6	0,440	0,600	0,264	80	0,009	1,000	0,021	0,245	0,005	1,583
2	18:19	1,000	0,2/0,8	0,540	0,200	0,108	80	0,037	1,000	0,027	0,308	0,008	2,578
2	18:19	1,000	0,2/0,8	0,540	0,800	0,432	80	0,028	1,000	0,027	0,308	0,008	2,578
3	18:22	1,500	0,2/0,8	0,690	0,200	0,138	80	0,023	1,000	0,032	0,380	0,012	3,792
3	18:22	1,500	0,2/0,8	0,690	0,800	0,552	80	0,020	1,000	0,032	0,380	0,012	3,792
4	18:26	2,000	0,2/0,8	0,830	0,200	0,166	80	0,053	1,000	0,047	0,428	0,020	6,146
4	18:26	2,000	0,2/0,8	0,830	0,800	0,664	80	0,033	1,000	0,047	0,428	0,020	6,146
5	18:31	2,500	0,2/0,8	0,880	0,200	0,176	80	0,061	1,000	0,049	0,465	0,023	7,071
5	18:31	2,500	0,2/0,8	0,880	0,800	0,704	80	0,038	1,000	0,049	0,465	0,023	7,071
6	18:36	3,000	0,2/0,8	0,980	0,200	0,196	80	0,051	1,000	0,038	0,500	0,019	5,826
6	18:36	3,000	0,2/0,8	0,980	0,800	0,784	80	0,046	1,000	0,038	0,500	0,019	5,826
7	18:39	3,500	0,2/0,8	1,020	0,200	0,204	80	0,029	1,000	0,011	0,488	0,005	1,609
7	18:39	3,500	0,2/0,8	1,020	0,800	0,816	80	0,024	1,000	0,011	0,488	0,005	1,609
8	18:45	4,000	0,2/0,6/0,8	0,930	0,200	0,186	80	0,017	1,000	0,010	0,433	0,004	1,318
8	18:45	4,000	0,2/0,6/0,8	0,930	0,600	0,558	80	0,022	1,000	0,010	0,433	0,004	1,318
8	18:45	4,000	0,2/0,6/0,8	0,930	0,800	0,744	80	-0,084	1,000	0,010	0,433	0,004	1,318
9	18:53	4,500	0,2/0,8	0,800	0,200	0,160	80	0,033	1,000	0,033	0,378	0,012	3,818
9	18:53	4,500	0,2/0,8	0,800	0,800	0,640	80	0,017	1,000	0,033	0,378	0,012	3,818
10	18:59	5,000	0,2/0,6/0,8	0,710	0,200	0,142	80	0,060	1,000	0,037	0,355	0,013	4,082
10	18:59	5,000	0,2/0,6/0,8	0,710	0,600	0,426	80	0,036	1,000	0,037	0,355	0,013	4,082
10	18:59	5,000	0,2/0,6/0,8	0,710	0,800	0,568	80	0,029	1,000	0,037	0,355	0,013	4,082
11	19:03	5,500	0,2/0,8	0,710	0,200	0,142	80	0,040	1,000	0,063	0,358	0,023	7,001
11	19:03	5,500	0,2/0,8	0,710	0,800	0,568	80	0,028	1,000	0,063	0,358	0,023	7,001
12	19:07	6,000	0,2/0,6/0,8	0,720	0,200	0,144	80	0,074	1,000	0,094	0,353	0,033	10,217
12	19:07	6,000	0,2/0,6/0,8	0,720	0,600	0,432	80	0,085	1,000	0,094	0,353	0,033	10,217
12	19:07	6,000	0,2/0,6/0,8	0,720	0,800	0,576	80	0,127	1,000	0,094	0,353	0,033	10,217
13	19:12	6,500	0,2/0,8	0,690	0,200	0,138	80	0,104	1,000	0,083	0,350	0,029	8,992
13	19:12	6,500	0,2/0,8	0,690	0,800	0,552	80	0,086	1,000	0,083	0,350	0,029	8,992
14	19:16	7,000	0,2/0,8	0,710	0,200	0,142	80	0,094	1,000	0,071	0,355	0,025	7,813
14	19:16	7,000	0,2/0,8	0,710	0,800	0,568	79	0,048	1,000	0,071	0,355	0,025	7,813
15	19:19	7,500	0,2/0,8	0,710	0,200	0,142	80	0,089	1,000	0,076	0,358	0,027	8,378
15	19:19	7,500	0,2/0,8	0,710	0,800	0,568	80	0,053	1,000	0,076	0,358	0,027	8,378
16	19:22	8,000	0,2/0,8	0,720	0,200	0,144	80	0,087	1,000	0,070	0,360	0,025	7,820
16	19:22	8,000	0,2/0,8	0,720	0,800	0,576	80	0,074	1,000	0,070	0,360	0,025	7,820
17	19:28	8,500	0,2/0,6/0,8	0,720	0,200	0,144	80	0,044	1,000	0,056	0,350	0,020	6,058
17	19:28	8,500	0,2/0,6/0,8	0,720	0,600	0,432	80	0,071	1,000	0,056	0,350	0,020	6,058
17	19:28	8,500	0,2/0,6/0,8	0,720	0,800	0,576	80	0,055	1,000	0,056	0,350	0,020	6,058
18	19:31	9,000	0,2/0,8	0,680	0,200	0,136	80	0,054	1,000	0,044	0,318	0,014	4,270
18	19:31	9,000	0,2/0,8	0,680	0,800	0,544	80	0,050	1,000	0,044	0,318	0,014	4,270
19	19:34	9,500	0,2/0,8	0,590	0,200	0,118	80	0,037	1,000	0,018	0,273	0,005	1,478
19	19:34	9,500	0,2/0,8	0,590	0,800	0,472	80	0,033	1,000	0,018	0,273	0,005	1,478
20	19:37	10,000	None	0,500	0,000	0,000	0	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000

Slika 6.3. Prikaz rezultata mjerenja u naselju Narta – broj mjernih postaja, vrijeme, lokacija, metoda mjerenja, dubina, brzina, površina i protok

Na slici 6.4 prikazane su postavke provjere kvalitete i upozorenja koja su se javljala tijekom mjerenja.

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

Quality control warnings							
St#	Time	Location (m)	Method	Depth (m)	%Depth	Measured Depth (m)	Warnings
4	18:26	2,000	0,2/0,8	0,830	0,200	0,166	Large SNR Variation
4	18:26	2,000	0,2/0,8	0,830	0,800	0,664	Large SNR Variation
5	18:31	2,500	0,2/0,8	0,880	0,200	0,176	Approaching Low SNR, Beam SNRs Not Similar, SNR Threshold Variation
5	18:31	2,500	0,2/0,8	0,880	0,800	0,704	Approaching Low SNR, Beam SNRs Not Similar, SNR Threshold Variation
7	18:39	3,500	0,2/0,8	1,020	0,200	0,204	Velocity Angle > QC
7	18:39	3,500	0,2/0,8	1,020	0,800	0,816	Velocity Angle > QC
8	18:45	4,000	0,2/0,6/0,8	0,930	0,200	0,186	Low SNR, SNR Threshold Variation, Standard Error > QC, High % Spikes, Velocity Angle > QC
8	18:45	4,000	0,2/0,6/0,8	0,930	0,600	0,558	Low SNR, SNR Threshold Variation, Standard Error > QC, High % Spikes, Velocity Angle > QC
8	18:45	4,000	0,2/0,6/0,8	0,930	0,800	0,744	Low SNR, SNR Threshold Variation, Standard Error > QC, High % Spikes, Velocity Angle > QC
11	19:03	5,500	0,2/0,8	0,710	0,200	0,142	Velocity Angle > QC
11	19:03	5,500	0,2/0,8	0,710	0,800	0,568	Velocity Angle > QC
12	19:07	6,000	0,2/0,6/0,8	0,720	0,200	0,144	Beam SNRs Not Similar, Large SNR Variation, SNR Threshold Variation, Velocity Angle > QC, High Stn % Discharge
12	19:07	6,000	0,2/0,6/0,8	0,720	0,600	0,432	Beam SNRs Not Similar, Large SNR Variation, SNR Threshold Variation, Velocity Angle > QC, High Stn % Discharge
12	19:07	6,000	0,2/0,6/0,8	0,720	0,800	0,576	Beam SNRs Not Similar, Large SNR Variation, SNR Threshold Variation, Velocity Angle > QC, High Stn % Discharge
13	19:12	6,500	0,2/0,8	0,690	0,200	0,138	Velocity Angle > QC
13	19:12	6,500	0,2/0,8	0,690	0,800	0,552	Velocity Angle > QC
14	19:16	7,000	0,2/0,8	0,710	0,200	0,142	Velocity Angle > QC
14	19:16	7,000	0,2/0,8	0,710	0,800	0,568	Velocity Angle > QC

Slika 6.4. Prikaz postavke provjere kvalitete i upozorenja tijekom mjerenja u naselju Narta

### 6.1.2. Rezultati mjerenja na lokaciji rijeke Bednje u Ludbregu

Rezultati mjerenja za lokaciju u Ludbregu na rijeci Bednja, prikazani su na sljedećim slikama. Na ovoj lokaciji mjerenje je rađeno na 14 postaja, s prosječnim intervalom mjerenja od 40 sekundi. Iznosi izmjerenih parametara prikazani su na slici 6.5. Na slici 6.6 prikazani su grafikoni sa izmjerenim rezultatima. Na prvom grafikonu prikazan je protok za svaku stacionažu na rijeci Bednji u Ludbregu. Na drugom grafikonu prikazani su iznosi brzine vode za svaku stacionažu te su na trećem grafikonu su prikazane dubine na svakoj stacionaži.

<b>Site name</b>	Bednja lbg
<b>Site number</b>	1
<b>Operator(s)</b>	Lucija
<b>File name</b>	20220617-145423_Bednja lbg.ft
<b>Comment</b>	

<b>Start time</b>	17.6.2022. 14:03	<b>Sensor type</b>	Top Setting
<b>End time</b>	17.6.2022. 14:51	<b>Handheld serial number</b>	FT2H2025030
<b>Start location latitude</b>	46,248	<b>Probe serial number</b>	FT2P2024010
<b>Start location longitude</b>	16,620	<b>Probe firmware</b>	1.30
<b>Calculations engine</b>	FlowTracker2	<b>Handheld software</b>	1.7

<b># Stations</b>	<b>Avg interval (s)</b>	<b>Total discharge (m<sup>3</sup>/s)</b>
14	40	1,284

<b>Total width (m)</b>	<b>Total area (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Wetted Perimeter (m)</b>
12,700	6,464	12,839

<b>Mean SNR (dB)</b>	<b>Mean depth (m)</b>	<b>Mean velocity (m/s)</b>
32,273	0,509	0,199

<b>Mean temp (°C)</b>	<b>Max depth (m)</b>	<b>Max velocity (m/s)</b>
23,573	0,740	0,269

Discharge Uncertainty		
<b>Category</b>	<b>ISO</b>	<b>IVE</b>
Accuracy	1,0 %	
Depth	0,2 %	
Velocity	0,3 %	
Width	0,2 %	
Method	1,2 %	
# Stations	3,6 %	
<b>Overall</b>	<b>3,9 %</b>	

<b>Discharge equation</b>	Mean Section
<b>Discharge uncertainty</b>	IVE
<b>Discharge reference</b>	Rated

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

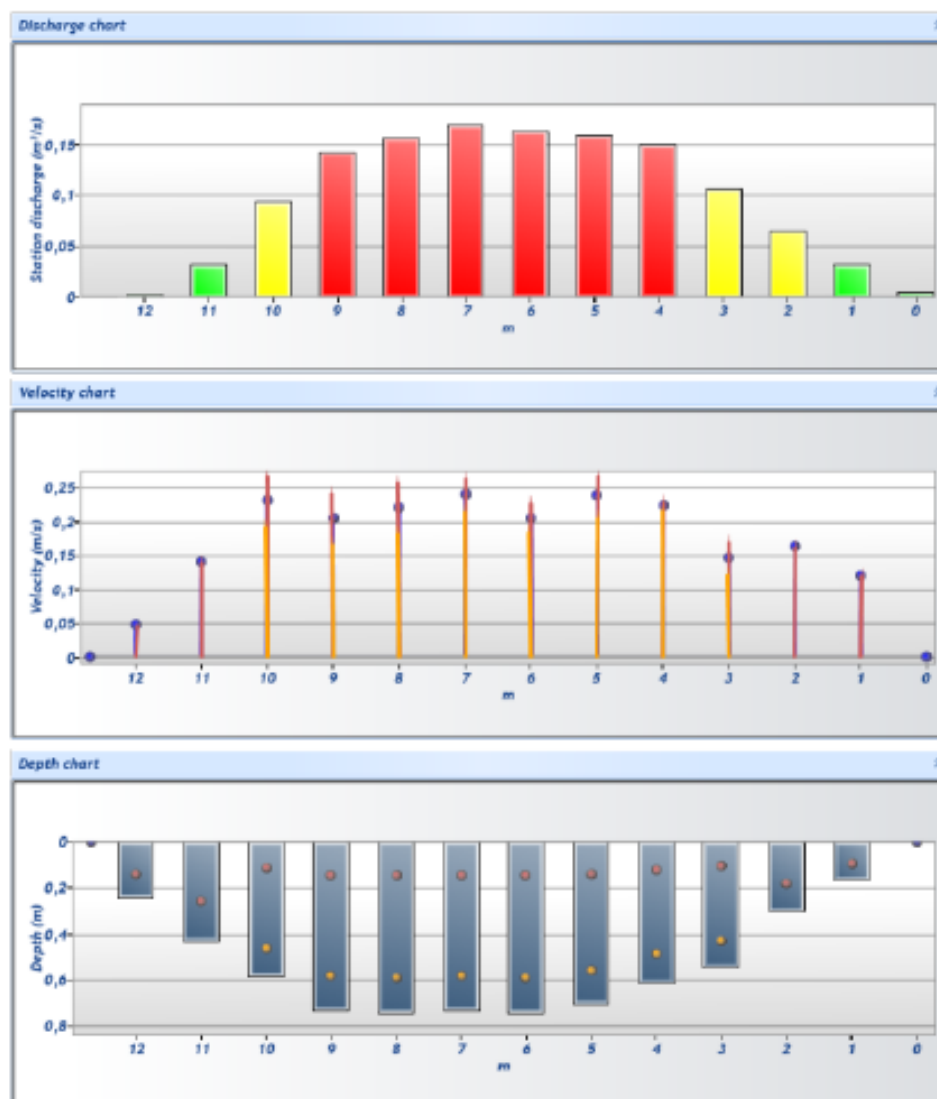
Summary overview
No changes were made to this file
Quality control warnings

Slika 6.5. Prikaz rezultata mjerenja u Ludbregu – opće informacije o lokaciji



<b>Site name</b>	Bednja lbg
<b>Site number</b>	1
<b>Operator(s)</b>	Lucija
<b>File name</b>	20220617-145423_Bednja lbg.ft
<b>Comment</b>	

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 6.6. Grafički prikazi rezultata mjerenja u Ludbregu – prikaz protoka, brzina i dubina na svakoj mjernoj stanici

Na slici 6.7. prikazani su rezultati mjerenja na svim stacionažama na rijeci Bednji u Ludbregu.

<b>Site name</b>	Bednja lbg
<b>Site number</b>	1
<b>Operator(s)</b>	Lucija
<b>File name</b>	20220617-145423_Bednja lbg.ft
<b>Comment</b>	

St#	Time	Location (m)	Method	Depth (m)	%Depth	Measured Depth (m)	Samples	Velocity (m/s)	Correction	Mean Velocity (m/s)	Area (m <sup>2</sup> )	Flow (m <sup>3</sup> /s)	%Q	
0	14:03	0,000	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,061	0,000	0,005	0,379	✓
1	14:04	1,000	0,6	0,160	0,600	0,096	80	0,122	1,000	0,143	0,230	0,033	2,556	✓
2	14:09	2,000	0,6	0,300	0,600	0,180	80	0,164	1,000	0,156	0,420	0,065	5,085	✓
3	14:12	3,000	0,2/0,8	0,540	0,200	0,108	80	0,171	1,000	0,186	0,575	0,107	8,306	✓
3	14:12	3,000	0,2/0,8	0,540	0,800	0,432	80	0,123	1,000	0,186	0,575	0,107	8,306	✓
4	14:17	4,000	0,2/0,8	0,610	0,200	0,122	80	0,230	1,000	0,231	0,655	0,151	11,785	✓
4	14:17	4,000	0,2/0,8	0,610	0,800	0,488	80	0,217	1,000	0,231	0,655	0,151	11,785	✓
5	14:20	5,000	0,2/0,8	0,700	0,200	0,140	80	0,269	1,000	0,223	0,720	0,160	12,484	✓
5	14:20	5,000	0,2/0,8	0,700	0,800	0,560	80	0,207	1,000	0,223	0,720	0,160	12,484	✓
6	14:25	6,000	0,2/0,8	0,740	0,200	0,148	80	0,228	1,000	0,224	0,735	0,165	12,810	✓
6	14:25	6,000	0,2/0,8	0,740	0,800	0,592	80	0,186	1,000	0,224	0,735	0,165	12,810	✓
7	14:28	7,000	0,2/0,8	0,730	0,200	0,146	80	0,265	1,000	0,231	0,735	0,170	13,242	✓
7	14:28	7,000	0,2/0,8	0,730	0,800	0,584	80	0,216	1,000	0,231	0,735	0,170	13,242	✓
8	14:32	8,000	0,2/0,8	0,740	0,200	0,148	80	0,260	1,000	0,214	0,735	0,157	12,247	✓
8	14:32	8,000	0,2/0,8	0,740	0,800	0,592	80	0,184	1,000	0,214	0,735	0,157	12,247	✓
9	14:37	9,000	0,2/0,8	0,730	0,200	0,146	80	0,243	1,000	0,219	0,655	0,143	11,146	✓
9	14:37	9,000	0,2/0,8	0,730	0,800	0,584	80	0,168	1,000	0,219	0,655	0,143	11,146	✓
10	14:41	10,000	0,2/0,8	0,580	0,200	0,116	80	0,269	1,000	0,186	0,505	0,094	7,323	✓
10	14:41	10,000	0,2/0,8	0,580	0,800	0,464	80	0,193	1,000	0,186	0,505	0,094	7,323	✓
11	14:45	11,000	0,6	0,430	0,600	0,258	80	0,141	1,000	0,095	0,335	0,032	2,478	✓
12	14:47	12,000	0,6	0,240	0,600	0,144	80	0,049	1,000	0,024	0,084	0,002	0,160	✓
13	14:51	12,700	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	✓

Slika 6.7. Prikaz rezultata mjerenja u gradu Ludbreg – broj mjernih postaja, vrijeme, lokacija, metoda mjerenja, dubina, brzina, površina i protok

Na slici 6.8. je prikaz postavke provjere kvalitete i upozorenja koja su se javljala tijekom mjerenja.

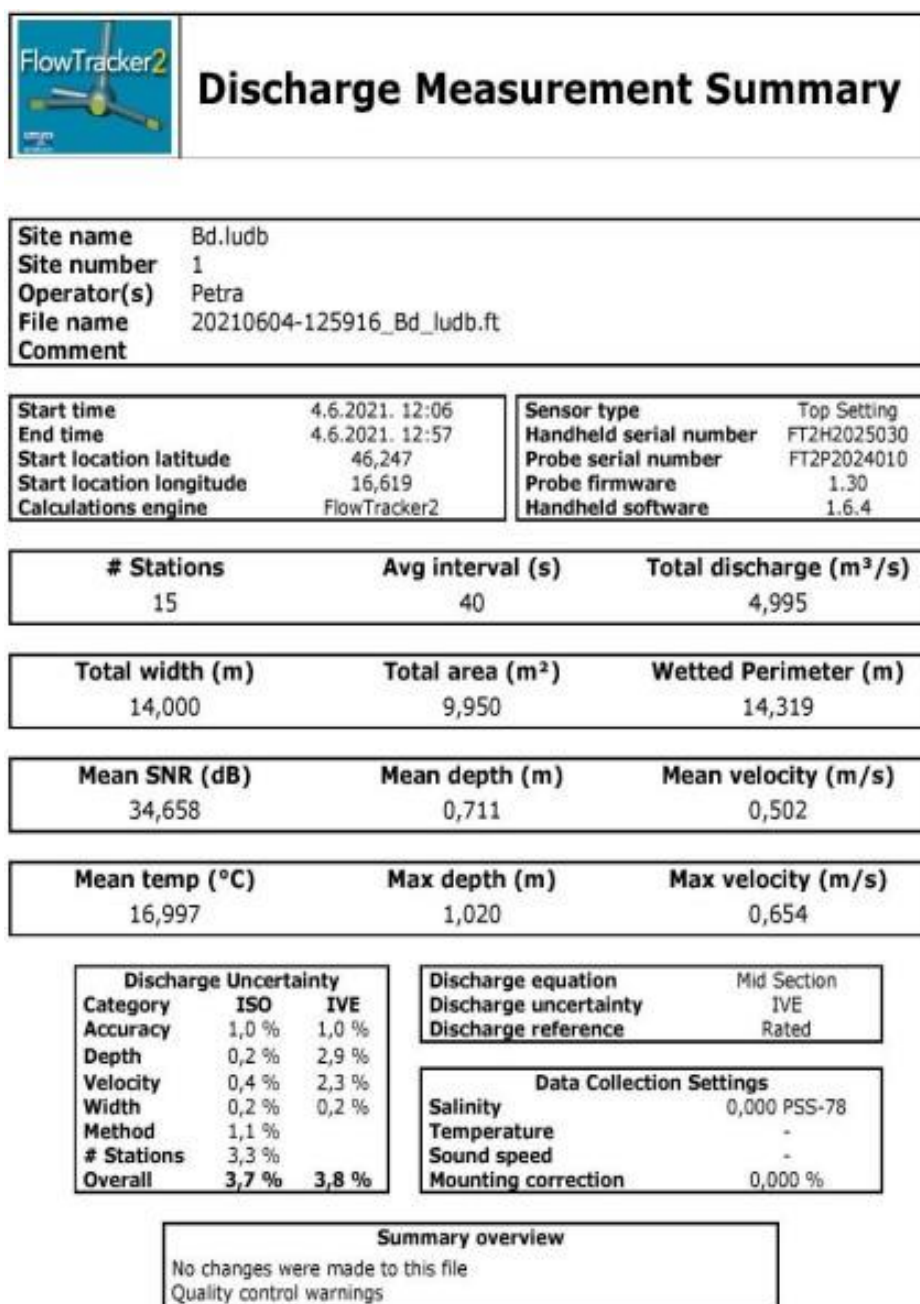
Quality Control Settings	
Maximum depth change	50,000%
Maximum spacing change	100,000%
SNR threshold	10,000 dB
Standard error threshold	0,010 m/s
Spike threshold	10,000%
Maximum velocity angle	20,000 deg
Maximum tilt angle	5,000 deg

St#	Time	Location (m)	Method	Depth (m)	%Depth	Measured Depth (m)	Warnings
4	14:17	4,000	0,2/0,8	0,610	0,200	0,122	High Stn % Discharge
4	14:17	4,000	0,2/0,8	0,610	0,800	0,488	High Stn % Discharge
5	14:20	5,000	0,2/0,8	0,700	0,200	0,140	High Stn % Discharge
5	14:20	5,000	0,2/0,8	0,700	0,800	0,560	High Stn % Discharge
6	14:25	6,000	0,2/0,8	0,740	0,200	0,148	High Stn % Discharge
6	14:25	6,000	0,2/0,8	0,740	0,800	0,592	High Stn % Discharge
7	14:28	7,000	0,2/0,8	0,730	0,200	0,146	High Stn % Discharge
7	14:28	7,000	0,2/0,8	0,730	0,800	0,584	High Stn % Discharge
8	14:32	8,000	0,2/0,8	0,740	0,200	0,148	High Stn % Discharge
8	14:32	8,000	0,2/0,8	0,740	0,800	0,592	High Stn % Discharge
9	14:37	9,000	0,2/0,8	0,730	0,200	0,146	High Stn % Discharge
9	14:37	9,000	0,2/0,8	0,730	0,800	0,584	High Stn % Discharge
12	14:47	12,000	0,6	0,240	0,600	0,144	Velocity Angle > QC
13	14:51	12,700	None	0,000	0,000	0,000	Water Depth > QC

Slika 6.8. Prikaz postavke provjere kvalitete i upozorenja tijekom mjerenja u Ludbregu

### 6.1.3. Rezultati prebačenog mjerenja na lokaciji rijeke Bednje u Ludbregu

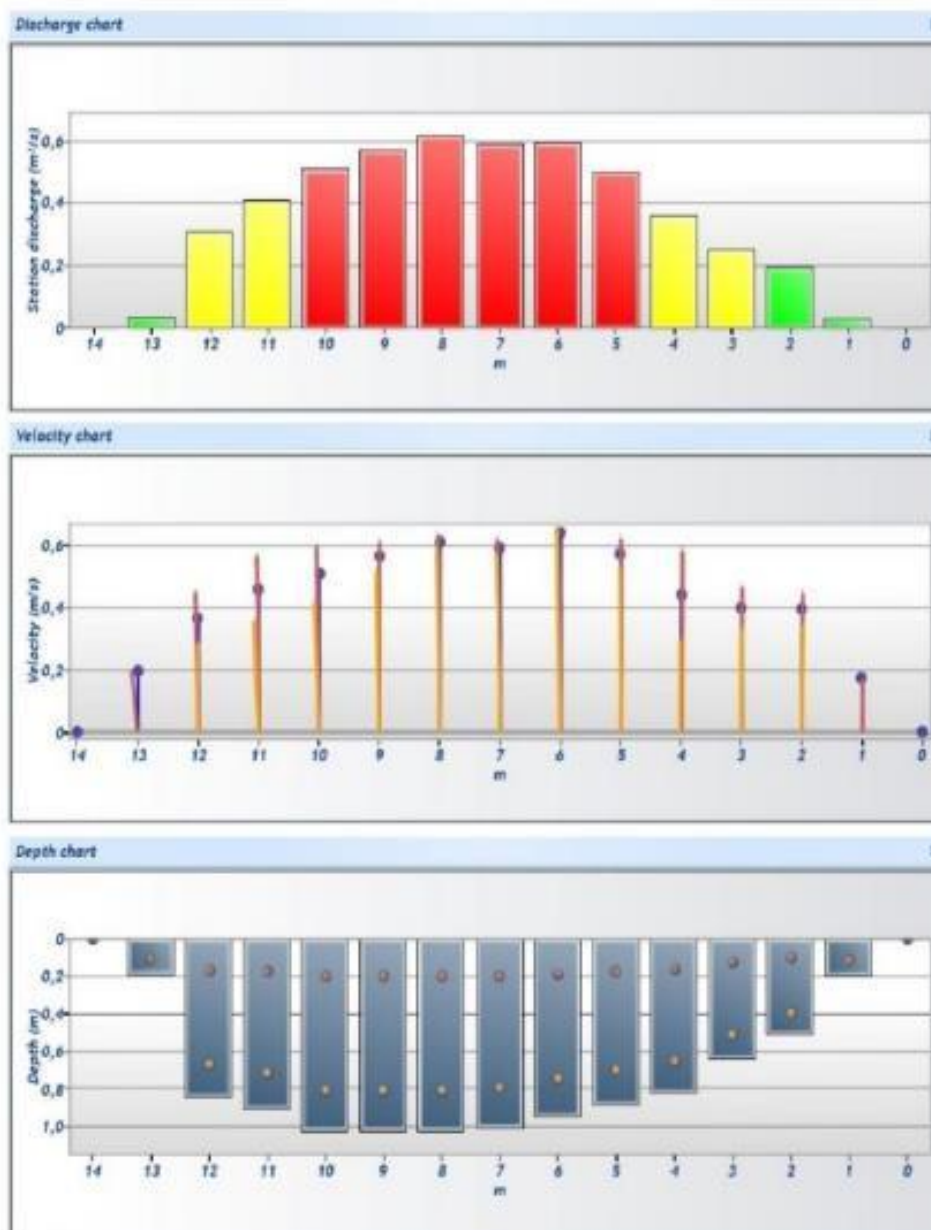
Rezultati prebačenog mjerenja za lokaciju u Ludbregu na rijeci Bednja, prikazani su na sljedećim slikama. Na ovoj lokaciji mjerenje je rađeno na 14 postaja, s prosječnim intervalom mjerenja od 40 sekundi. Iznosi izmjerenih parametara prikazani su na slici 6.9. Na slici 6.10. prikazani su grafikoni sa izmjerenim rezultatima. Na prvom grafikonu prikazan je protok za svaku stacionažu na rijeci Bednji u Ludbregu. Na drugom grafikonu prikazani su iznosi brzine vode za svaku stacionažu te su na trećem grafikonu su prikazane dubine na svakoj stacionaži.



Slika 6.9. Prikaz rezultata prebačenog mjerenja u Ludbregu – opće informacije o lokaciji

Site name	Bd.ludb
Site number	1
Operator(s)	Pelra
File name	20210604-125916_Bd_ludb.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 6.10. Grafički prikazi rezultata prebačenog mjerenja u Ludbregu – prikaz protoka, brzina i dubina na svakoj mjernoj stanici

Na slici 6.11. prikazani su rezultati prebačenog mjerenja na svim stacionažama na rijeci Bednji u Ludbregu.

<b>Site name</b>	Bd.ludb
<b>Site number</b>	1
<b>Operator(s)</b>	Petra
<b>File name</b>	20210604-125916_Bd_ludb.ft
<b>Comment</b>	

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 <sup>2</sup> )	Flow (m <sup>3</sup> /s)	%Q
0	12:06	0,000	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,172	0,000	0,000	0,000
1	12:08	1,000	0,6	0,190	0,600	0,114	80	0,172	1,000	0,172	0,190	0,033	0,653
2	12:12	2,000	0,2/0,8	0,500	0,200	0,100	80	0,445	1,000	0,392	0,500	0,196	3,925
2	12:12	2,000	0,2/0,8	0,500	0,800	0,400	80	0,339	1,000	0,392	0,500	0,196	3,925
3	12:17	3,000	0,2/0,8	0,640	0,200	0,128	80	0,465	1,000	0,398	0,640	0,255	5,105
3	12:17	3,000	0,2/0,8	0,640	0,800	0,512	80	0,332	1,000	0,398	0,640	0,255	5,105
4	12:22	4,000	0,2/0,8	0,820	0,200	0,164	80	0,580	1,000	0,438	0,820	0,359	7,195
4	12:22	4,000	0,2/0,8	0,820	0,800	0,656	80	0,296	1,000	0,438	0,820	0,359	7,195
5	12:26	5,000	0,2/0,8	0,880	0,200	0,176	80	0,619	1,000	0,571	0,880	0,503	10,061
5	12:26	5,000	0,2/0,8	0,880	0,800	0,704	80	0,524	1,000	0,571	0,880	0,503	10,061
6	12:29	6,000	0,2/0,8	0,940	0,200	0,188	80	0,615	1,000	0,634	0,940	0,596	11,933
6	12:29	6,000	0,2/0,8	0,940	0,800	0,752	80	0,654	1,000	0,634	0,940	0,596	11,933
7	12:33	7,000	0,2/0,8	1,000	0,200	0,200	80	0,618	1,000	0,590	1,000	0,590	11,822
7	12:33	7,000	0,2/0,8	1,000	0,800	0,800	80	0,563	1,000	0,590	1,000	0,590	11,822
8	12:37	8,000	0,2/0,8	1,020	0,200	0,204	80	0,632	1,000	0,606	1,020	0,618	12,376
8	12:37	8,000	0,2/0,8	1,020	0,800	0,816	80	0,580	1,000	0,606	1,020	0,618	12,376
9	12:41	9,000	0,2/0,8	1,020	0,200	0,204	80	0,609	1,000	0,563	1,020	0,574	11,488
9	12:41	9,000	0,2/0,8	1,020	0,800	0,816	80	0,516	1,000	0,563	1,020	0,574	11,488
10	12:45	10,000	0,2/0,8	1,020	0,200	0,204	80	0,593	1,000	0,503	1,020	0,513	10,280
10	12:45	10,000	0,2/0,8	1,020	0,800	0,816	80	0,413	1,000	0,503	1,020	0,513	10,280
11	12:47	11,000	0,2/0,8	0,900	0,200	0,180	80	0,564	1,000	0,460	0,900	0,414	8,295
11	12:47	11,000	0,2/0,8	0,900	0,800	0,720	80	0,357	1,000	0,460	0,900	0,414	8,295
12	12:51	12,000	0,2/0,8	0,840	0,200	0,168	80	0,448	1,000	0,366	0,840	0,308	6,162
12	12:51	12,000	0,2/0,8	0,840	0,800	0,672	80	0,285	1,000	0,366	0,840	0,308	6,162
13	12:54	13,000	0,6	0,180	0,600	0,108	80	0,196	1,000	0,196	0,180	0,035	0,706
14	12:57	14,000	None	0,000	0,000	0,000	0	0,000		0,196	0,000	0,000	0,000

Slika 6.11. Prikaz rezultata prebačenog mjerenja u gradu Ludbreg – broj mjernih postaja, vrijeme, lokacija, metoda mjerenja, dubina, brzina, površina i protok

Na slici 6.12 je prikaz postavke provjere kvalitete i upozorenja koja su se javljala tijekom prebačenog mjerenja.

<b>Site name</b>	Bd.ludb
<b>Site number</b>	1
<b>Operator(s)</b>	Petra
<b>File name</b>	20210604-125916_Bd_ludb.ft
<b>Comment</b>	

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

Quality control warnings							
St#	Time	Location (m)	Method	Depth (m)	%Depth	Measured Depth (m)	Warnings
4	12:22	4,000	0,2/0,8	0,820	0,200	0,164	Standard Error > QC
4	12:22	4,000	0,2/0,8	0,820	0,800	0,656	Standard Error > QC
5	12:26	5,000	0,2/0,8	0,880	0,200	0,176	Standard Error > QC,High Stn % Discharge
5	12:26	5,000	0,2/0,8	0,880	0,800	0,704	Standard Error > QC,High Stn % Discharge
6	12:29	6,000	0,2/0,8	0,940	0,200	0,188	High Stn % Discharge
6	12:29	6,000	0,2/0,8	0,940	0,800	0,752	High Stn % Discharge
7	12:33	7,000	0,2/0,8	1,000	0,200	0,200	Standard Error > QC,High Stn % Discharge
7	12:33	7,000	0,2/0,8	1,000	0,800	0,800	Standard Error > QC,High Stn % Discharge
8	12:37	8,000	0,2/0,8	1,020	0,200	0,204	High Stn % Discharge
8	12:37	8,000	0,2/0,8	1,020	0,800	0,816	High Stn % Discharge
9	12:41	9,000	0,2/0,8	1,020	0,200	0,204	Standard Error > QC,High Stn % Discharge
9	12:41	9,000	0,2/0,8	1,020	0,800	0,816	Standard Error > QC,High Stn % Discharge
10	12:45	10,000	0,2/0,8	1,020	0,200	0,204	High Stn % Discharge
10	12:45	10,000	0,2/0,8	1,020	0,800	0,816	High Stn % Discharge
12	12:51	12,000	0,2/0,8	0,840	0,200	0,168	Water Depth > QC,Standard Error > QC
12	12:51	12,000	0,2/0,8	0,840	0,800	0,672	Water Depth > QC,Standard Error > QC
13	12:54	13,000	0,6	0,180	0,600	0,108	Water Depth > QC,Velocity Angle > QC

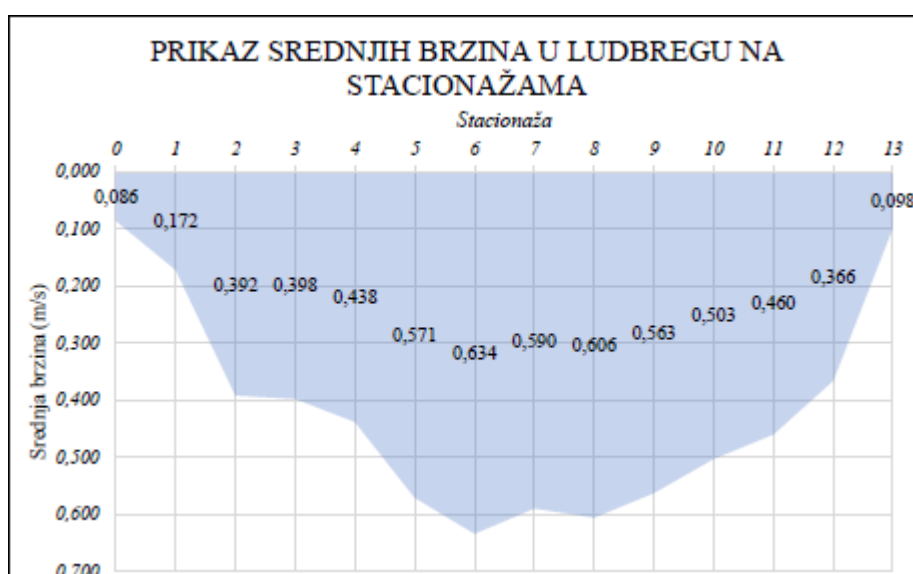
Slika 6.12. Prikaz postavke provjere kvalitete i upozorenja tijekom prebačenog mjerenja u Ludbregu

## 6.2. Proračunate snage hidroelektrane i solarne fotonaponske hidroelektrane

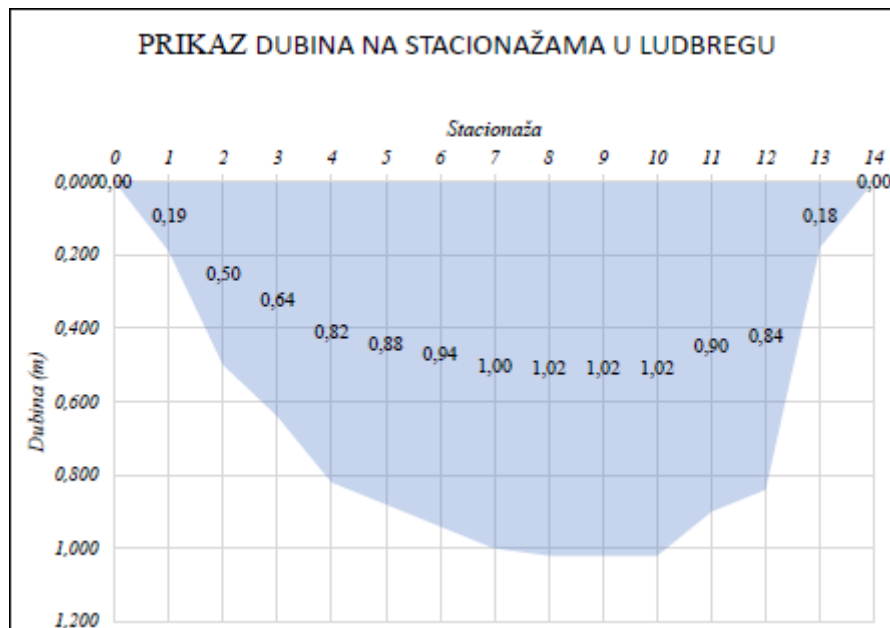
Proračun potrebne snage turbine se provodi pomoći formule (3). Uvrštavanjem mjernih vrijednosti u navedenu formulu dobivaju se rezultati prikazani u tablici 6.1. [35]. Na slici 6.13. grafički su prikazane brzine vode na svakoj stacionaži te na slici 6.14. prikazane su dubine na svakoj stacionaži [35].

Tablica 6.1. Rezultati proračuna za lokaciju Ludbreg [35]

Stacionaža	Razmak između stacionaža (m)	Površina poprečnog presjeka (m <sup>2</sup> )	Srednja brzina (m/s)	Snaga (W)
0-1	1	0,095	0,086	0,01
1-2	1	0,190	0,172	0,15
2-3	1	0,500	0,392	4,52
3-4	1	0,640	0,398	6,05
4-5	1	0,820	0,438	10,34
5-6	1	0,880	0,571	24,57
6-7	1	0,940	0,634	35,93
7-8	1	1,000	0,590	30,81
8-9	1	1,020	0,606	34,05
9-10	1	1,020	0,563	27,30
10-11	1	1,020	0,503	19,47
11-12	1	0,900	0,460	13,14
12-13	1	0,840	0,366	6,18
13-14	1	0,090	0,098	0,01



Slika 6.13. Grafički prikaz srednjih brzina vode na svakoj stacionaži u Ludbregu [35]



Slika 6.14. Grafički prikaz dubina na stacionažama u Ludbregu [35]

Najveća srednja brzina vode nalazi se na stacionaži 6 i iznosi 0,634 m/s. U idućem proračunu u obzir se uzima jedan metar lijevo i jedan metar desno od najvećeg iznosa srednje brzine vode te se u tom slučaju srednja brzina dobije preko aritmetičke sredine, odnosno preko formule [35]:

$$v_{sr} = \frac{0,571 + 0,634 + 0,590}{3} = 0,598 \text{ m/s}$$

Površina se u ovom slučaju dobiva zbrajanjem površina između stacionaže 5 i 6 te stacionaže 6 i 7 [35].

$$P = 0,94 \text{ m}^2 + 1,00 \text{ m}^2 = 1,94 \text{ m}^2$$

Prema formuli (3), snaga iznosi [35]:

$$P_{teor} = \frac{1}{2} \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 1,94 \text{ m}^2 \times (0,598 \text{ m/s})^3 \times 0,3 = 62,23 \text{ W}$$

Ako se uzme u obzir dva metra lijevo i desno od mjesta najvećeg iznosa srednje brzine, dobivamo sljedeće [35]:



$$v_{sr} = \frac{0,438 + 0,571 + 0,634 + 0,590 + 0,606}{5} = 0,57 \text{ m/s}$$

$$P = 0,88 \text{ m}^2 + 0,94 \text{ m}^2 + 1,00 \text{ m}^2 + 1,02 \text{ m}^2 = 3,84 \text{ m}^2$$

$$P_{\text{teor}} = \frac{1}{2} \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 3,84 \text{ m}^2 \times (0,57 \text{ m/s})^3 \times 0,3 = 106,67 \text{ W}$$

Iz dobivenih rezultata vidljivo je kako se snaga povećava sa povećanjem zahvatne odnosno ulazne površine ali je kinetička energija malog iznosa. Iz podataka mjerenja za preostale lokacije na rijeci Česma i Bednji, vidljivo je da su podaci brzine manji od izračunatog primjera te se kinetička energija zbog malog iznosa može zanemariti.

Prema hidrološkim podacima vodostaja (slika 5.4., slika 5.5.) i protoka (slika 5.7. i slika 5.8.) vršilo se očitavanje podataka na grafičkim prikazima te se računala potencijalna energija prema navedenoj formuli (2). Za svaku lokaciju uzimala se visina pregrade 2,00 m te učinkovitost turbine 80%. Za izračun su se izvršile četiri iteracije na svakih 0,50 m u odnosu na najniže kote vodostaja, odnosno vodomjerne letve. Početna kota vodostaja za rijeku Česmu kreće od 100 cm, a Bednja na -50 cm.

Česma 1:

$$P\check{C}1 = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,372 \times 0,50 \times 0,80 = 1.459,73 \text{ W}$$

$$P\check{C}1 = 1,46 \text{ kW}$$

Česma 2:

$$P\check{C}2 = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 1,495 \times 1,00 \times 0,80 = 11.732,76 \text{ W}$$

$$P\check{C}2 = 11,73 \text{ kW}$$

Česma 3:

$$P = \rho \times g \times Q \times H \times \eta_{\text{tot}}$$

$$P\check{C}3 = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 4,581 \times 1,50 \times 0,80 = 53.927,53 \text{ W}$$

$$P\check{C}1 = 53,93 \text{ kW}$$

Česma 4:

$$P\check{C}3 = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 10,81 \times 2,00 \times 0,80 = 169.673,763 \text{ W}$$

$$P\check{C}1 = 169,67 \text{ kW}$$

Bednja 1:

$$PB1 = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,50 \times 4,105 \times 0,80 = 16.108,02 \text{ W}$$

$$PB1 = 16,11 \text{ kW}$$

Bednja 2:

$$PB2 = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 1,00 \times 16,68 \times 0,80 = 130.904,64 \text{ W}$$

$$PB2 = 130,90 \text{ kW}$$

Bednja 3:

$$PB3 = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 1,50 \times 29,98 \times 0,80 = 352.924,56 \text{ W}$$

$$PB3 = 352,92 \text{ kW}$$

Bednja 4:

$$PB4 = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 2,00 \times 46,01 \times 0,80 = 722.172,96 \text{ W}$$

$$PB4 = 722,17 \text{ kW}$$

Iz dobivenih rezultata vidljivo je kako se snaga povećava sa povećanjem vodostaja, odnosno povećanjem protoka te se shodno tome povećava i potencijalna energija.

Pomoću programa za proračun količine dobivene energije „*Photovoltaic Geographical Information System*“ (PVGIS), odrede se lokacije na kojoj se planiraju izgraditi solarne elektrane, zatim se izaberu kristalno silicijski solarne panele s gubitkom energije u iznosu od 14%, optimalni nagib panela u iznosu od 37° te nagib azimuta u iznosu od 0° zbog orijentacije solarnih panela prema jugu [33]. Prema formuli (4) računa se snaga fotonaponske elektrane za odabrane lokacije:

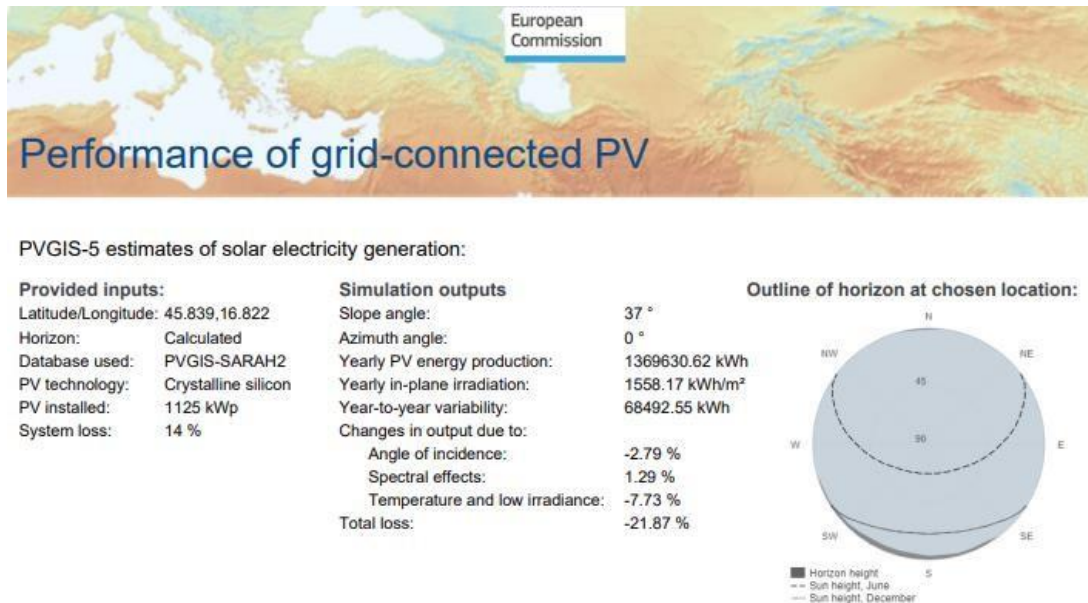
Rijeka Česma :

$$Ps\check{C} = 7500 \text{ m}^2 \cdot \frac{15}{100} \cdot 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 1.125.000 \text{ W} = 1125 \text{ kWp} = 1,125 \text{ MWp}$$

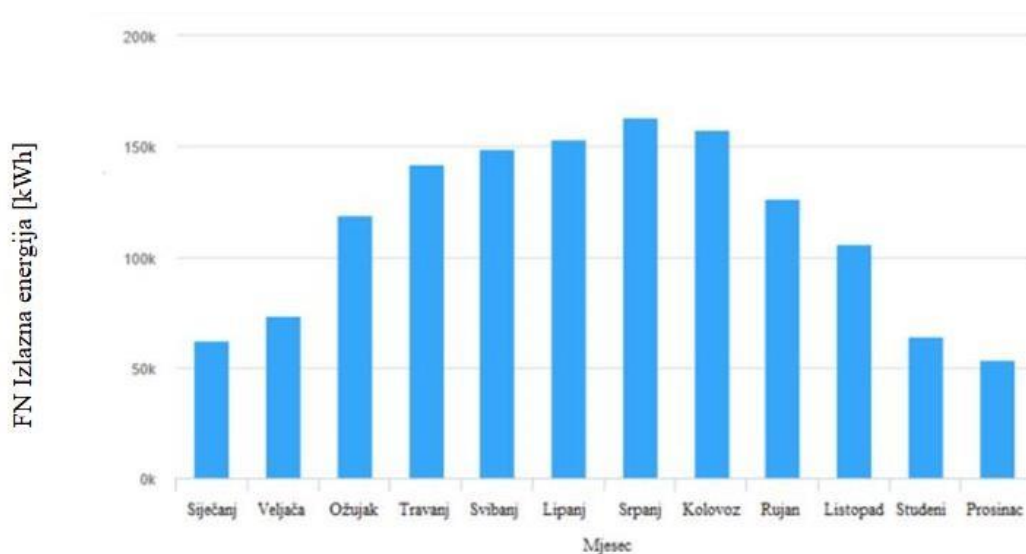
Rijeka Bednja:

$$PsB = 7500 \text{ m}^2 \cdot \frac{15}{100} \cdot 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 1.125.000 \text{ W} = 1125 \text{ kWp} = 1,125 \text{ MWp}$$

Nakon što su uneseni svi parametri u program za promatranu lokaciju kod rijeke Česme (Slika 6.15.) i za promatranu lokaciju kod rijeke Bednje (Slika 6.17.), dobije se iskaz količina proizvedene energije u solarnim elektranama za svaki mjesec u godini za lokaciju rijeke Česme kod naselja Narta (Slika 6.16.) i rijeke Bednje u gradu Ludbreg (Slika 6.18.).



Slika 6.15. Odabrani ulazni parametri za izračun snage solarne elektrane na rijeci Česmi korištenjem programa Photovoltaic Geographical Information System [33]



Slika 6.16. Mjesečne vrijednosti izlazne energije iz solarnog fotonaponskog sustava, dobivene korištenjem aplikacije Photovoltaic Geographical Information System [33]

Mjesečna proizvedena električna energija u naselju Narta uz rijeku Česmu može se vidjeti u tablici 6.2. te za grad Ludbreg uz rijeku Bednju u tablici 6.3.

Tablica 6.2. Brojčani prikaz mjesečnih vrijednosti izlazne energije iz solarnog fotonaponskog sustava na rijeci Česmi [33]

Mjeseci	Izlazna energija
Siječanj	62.327 kWh
Veljača	73.433 kWh
Ožujak	118.962 kWh
Travanj	141.957 kWh
Svibanj	148.900 kWh
Lipanj	153.089 kWh
Srpanj	163.106 kWh
Kolovoz	157.560 kWh
Rujan	126.674 kWh
Listopad	105.655 kWh
Studeni	64.322 kWh
Prosinac	53.645 kWh



PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

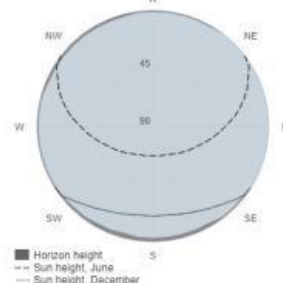
**Provided inputs:**

Latitude/Longitude: 46.248, 16.620  
 Horizon: Calculated  
 Database used: PVGIS-SARAH2  
 PV technology: Crystalline silicon  
 PV installed: 1125 kWp  
 System loss: 14 %

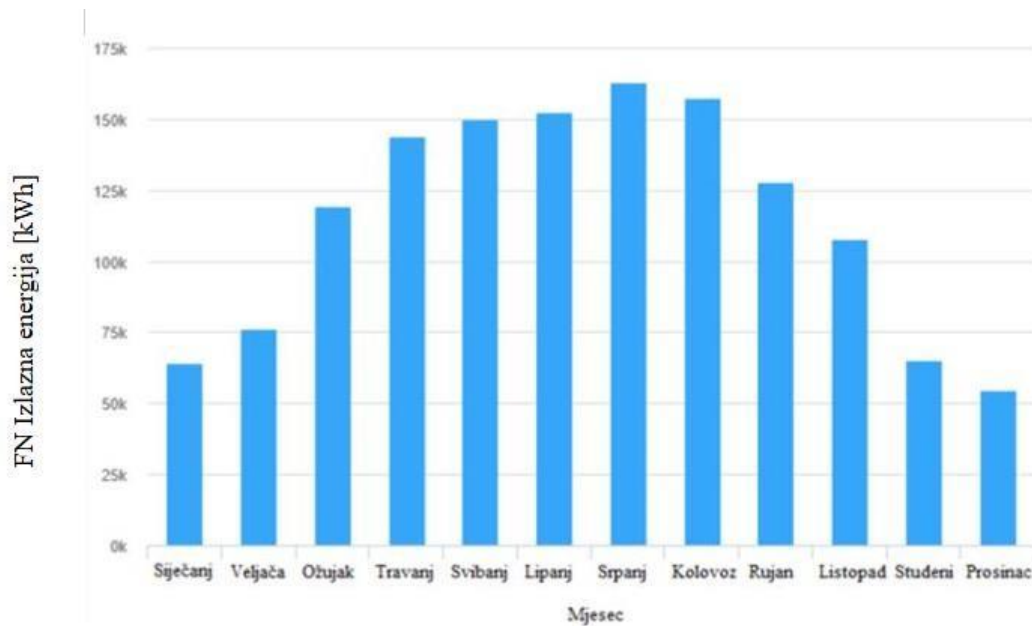
**Simulation outputs**

Slope angle: 37 °  
 Azimuth angle: 0 °  
 Yearly PV energy production: 1380899.63 kWh  
 Yearly in-plane irradiation: 1562.59 kWh/m<sup>2</sup>  
 Year-to-year variability: 73238.65 kWh  
 Changes in output due to:  
 Angle of incidence: -2.8 %  
 Spectral effects: 1.35 %  
 Temperature and low irradiance: -7.28 %  
 Total loss: -21.45 %

**Outline of horizon at chosen location:**



Slika 6.17. Odabrani ulazni parametri za izračun snage solarne elektrane na rijeci Bednji korištenjem programa Photovoltaic Geographical Information System [33]



Slika 6.18. Mjesečne vrijednosti izlazne energije iz solarnog fotonaponskog sustava, dobivene korištenjem aplikacije Photovoltaic Geographical Information System [33]

Tablica 6.3. Brojčani prikaz mjesečnih vrijednosti izlazne energije iz solarnog fotonaponskog sustava na rijeci Bednji [33]

Mjeseci	Izlazna energija
Siječanj	64.056 kWh
Veljača	75.973 kWh
Ožujak	119.545 kWh
Travanj	143.742 kWh
Svibanj	149.736 kWh
Lipanj	152.284 kWh
Srpanj	163.084 kWh
Kolovoz	157.316 kWh
Rujan	127.744 kWh
Listopad	107.786 kWh
Studeni	64.941 kWh
Prosinac	54.692 kWh

Na temelju dobivenih rezultata prikazanih u tablicama 6.2. i 6.3., vidljivo je da je za predmetne lokacije najveća količina električne energije proizvedena u srpnju. Za rijeku Česmu kod naselja Narta iznosi 163.106 kWh, dok za rijeku Bednju u gradu Ludbreg iznosi

163.084 kWh, stoga možemo zaključiti da je količina proizvedene električne energije približno jednaka.

Godišnja proizvodnja električne energije iz solarnih elektrana za odabranu lokaciju rijeke Česme kod Narte iznosi 1.369.630 kWh, a za lokaciju rijeke Bednje u gradu Ludbregu iznosi 1.380.900 kWh. S obzirom da su podaci za obje lokacije približno jednaki i ukoliko se uzme u obzir podatak da je prosječna potrošnja električne energije po kućanstvu 4.000 kWh godišnje, solarne elektrane bi smanjile proizvodnju količine stakleničkih plinova koju bi proizvelo 345 kućanstava.

## **6.3. Ekonomska analiza**

### **6.3.1. Ekonomska analiza proizvodnje električne energije iz solarnih elektrana**

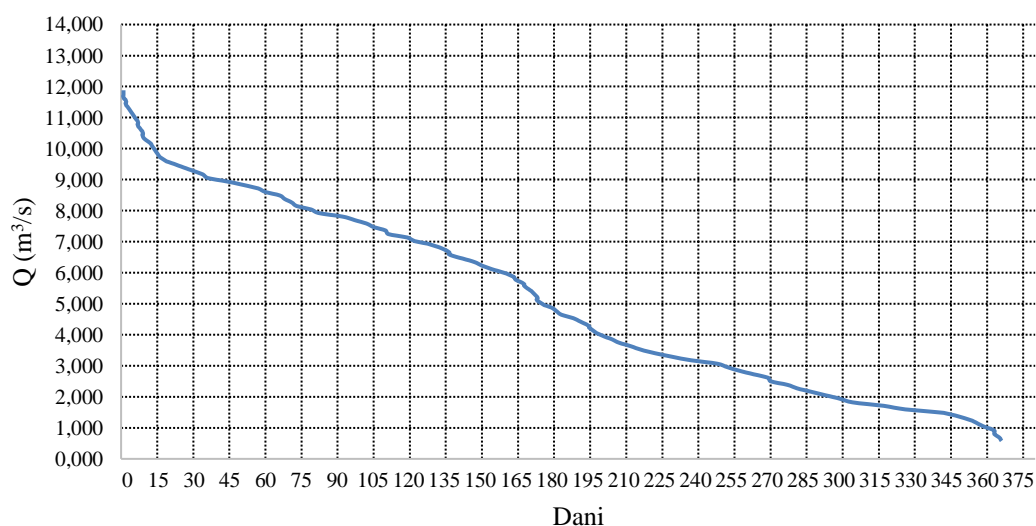
S obzirom da je sirovina za proizvodnju električne energije iz konvencionalnih izvora sve manje te da bi se do 2035. godine potrošnja električne energije mogla udvostručiti, važnosti u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora energije ima veliki značaj i rast [36].

Ukupna godišnja proizvodnja električne energije iz solarne elektrane za lokaciju rijeke Česme kod Narte iznosila bi 1.369.630 kWh, a za lokaciju rijeke Bednje u gradu Ludbregu iznosila bi 1.380.900 kWh. Tarifa po kojoj HEP otkupljuje 1 kWh, uključujući PDV iznosi 0,60 kn, što je 0,08 € [37] te za lokaciju Česma iznosi 821.778 kn, što je 109.068,68 €, a za Bednju iznosila bi 828.540 kn, što je 109.966,16 €. Mjesečna opskrbna naknada uključujući PDV iznosi 8,36 kn, što je 1,11 € [37]. Cijena solarne elektrane se kreće između 1 do 1,50 američkih dolara za 1 W instalirane snage, tako da se za analizu može uzeti srednji iznos od 1,25 američkih dolara [38], s uključenim PDV-om. S obzirom da su snage fotonaponskih elektrana za obje lokacije iste i iznose 1.125 kW, odnosno 1.125.000 W, kapitalni troškovi za obje lokacije iznosile bi 1.406.250 američkih dolara, odnosno 10.131.578,44 kn, što je 1.344.691,54 € [38].

### 6.3.2. Ekonomska analiza proizvodnje električne energije iz malih hidroelektrana

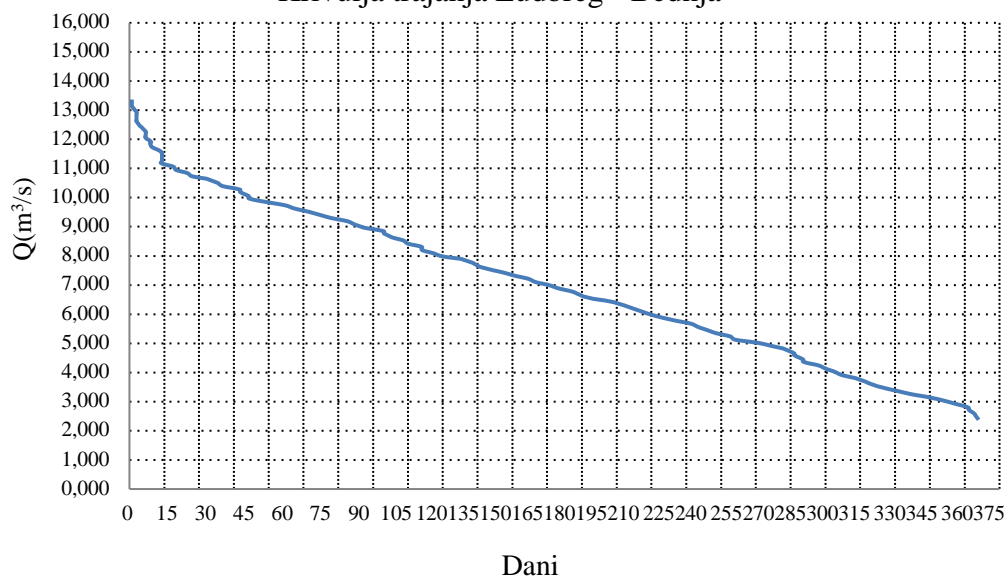
U svrhu predviđanja, odnosno projekcije količine proizvedene električne energije korištene su krivulje trajanja s obzirom na srednje dnevne protoke za rijeku Česmu (slika 6.19.) i za rijeku Bednju (slika 6.20.), za usrednjeni niz od 64 godine za rijeku Česmu i 75 godina za rijeku Bednju. S obzirom na vodostaje i zadane visine pregrade, rekonstruirali su se pripadni protoci i dobiveni su najpovoljniji uvjeti za proizvodnju energije.

Krivulja trajanja Narta - Česma



Slika 6.19. Krivulja trajanja Narta – Česma

Krivulja trajanja Ludbreg - Bednja



Slika 6.20. Krivulja trajanja Ludbreg - Bednja

Za izračun količine proizvodnje električne energije potrebno je pomnožiti snagu hidroelektrane sa podatkom očitanim iz krivulje trajanja, tj. sa trajanjem određenog protoka. Za svaki protok korišten za izračun snage hidroelektrane, određuje se mjerodavno trajanje iz krivulja trajanja.

Za rijeku Česmu slijedi:

$$P\check{C}1 = 1,46 \text{ kW} ; Q = 0,372 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow \text{očitano: 365 dana}$$

$$1,46\text{kW} \times 365 = 532,90 \text{ kWd} \times 24 \text{ h} = \mathbf{12.789,6 \text{ kWh}}$$

$$P\check{C}2 = 11,73 \text{ kW} ; Q = 1,495 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow \text{očitano: 342 dana}$$

$$11,73 \times 342 = 4.011,66 \text{ kWd} \times 24 \text{ h} = \mathbf{96.279,84 \text{ kWh}}$$

$$P\check{C}3 = 53,93 \text{ kW} ; Q = 4,581 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow \text{očitano: 188 dana}$$

$$53,93 \times 188 = 10.138,84 \text{ kWd} \times 24 \text{ h} = \mathbf{243.332,16 \text{ kWh}}$$

$$P\check{C}4 = 169,67 \text{ kW} ; Q = 10,81 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow \text{očitano: 7 dana}$$

$$169,67 \times 7 = 1.187,69 \text{ kWd} \times 24 \text{ h} = \mathbf{28.504,56 \text{ kWh}}$$

Za rijeku Bednju slijedi:

$$PB1 = 16,11 \text{ kW} ; Q = 4,105 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow \text{očitano: 300 dana}$$

$$16,11 \times 300 = 4.833,00 \text{ kWd} \times 24 \text{ h} = \mathbf{115.992,00 \text{ kWh}}$$

$$PB2 = 130,90 \text{ kW} ; Q = 16,68 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow \text{očitano: 0 dana}$$

$$130,90 \times 0 = 0,00 \text{ kWd} \times 24 \text{ h} = \mathbf{0,00 \text{ kWh}}$$

$$PB3 = 352,92 \text{ kW} ; Q = 29,98 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow \text{očitano: 0 dana}$$

$$352,92 \times 0 = 0,00 \text{ kWd} \times 24 \text{ h} = \mathbf{0,00 \text{ kWh}}$$



$P\check{C}4 = 722,17 \text{ kW} ; Q = 46,01 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow \text{o}\check{\text{c}}\text{itano: } 0 \text{ dana}$

$722,17 \times 0 = 0,00 \text{ kWd} \times 24 \text{ h} = \mathbf{0,00 \text{ kWh}}$

Iz rezultata vidljivo je da najveća ukupna godišnja proizvodnja električne energije za lokaciju rijeke Česme kod naselja Narta iznosi 243.332,16 kWh u trajanju od 188 dana za visinu pregrade od 1,00 m. Za lokaciju rijeke Bednje u gradu Ludbreg, najveća ukupna godišnja proizvodnja električne energije iznosi 115.992,00 kWh, visina pregrade 0,50 m. Poticajna cijena sukladno Hrvatskog operatora tržišta energije (HROTE) za 1 kWh iznosi 1,07 kn/kWh, što je 0,14 €/kWh [37] te za lokaciju Česma kod naselja Narta iznosi 260.365,41 kn, što je 34.556,43 €, a za lokaciju rijeke Bednje u gradu Ludbreg iznosi 124.111,44 kn, što je 16.472,42 €. Prosječna cijena male hidroelektrane kapaciteta 0-50 MW iznosi 1.634 američkih dolara za 1 kW [39]. Snaga male hidroelektrane za lokaciju rijeke Česme kod naselja Narta iznosi 53,93 kW, odnosno rijeke Bednje u gradu Ludbreg iznosi 16,11 kW. Kapitalni troškovi za lokaciju rijeke Česme kod naselja Narta iznosili bi 88.121,62 američkih dolara, odnosno 634.887,90 kn, što je 84.264,11 €, a za rijeku Bednju u gradu Ludbreg bi iznosili 26.323,74 američkih dolara, odnosno 189.654,07 kn, što je 25.171,42 €.

### **6.3.3. Ekonomska analiza proizvodnje električne energije iz hibridnih sustava mala hidroelektrana – solarna elektrana**

Za obje lokacije solarne fotonaponske elektrane imaju snagu od 1.125 kW, odnosno 1,125 MW. Iz dobivenih rezultata vidljivo je za lokaciju rijeke Česme kod naselja Narta da je prihvatljiva snaga male hidroelektrane snaga od 53,93 kW koja ima optimalno trajanje rada od 188 dana. Količina energije koja bi se proizvela iz hibridnih sustava ove lokacije iznosila bi 1.612.962,16 kWh te bi kapitalni troškovi iznosili 10.766.466,34 kn, odnosno 1.428.955,65 €. Za lokaciju rijeke Bednje u gradu Ludbreg prihvatljiva je snaga male hidroelektrane od 16,11 kW, koja ima optimalno trajanje rada od 300 dana. Količina energije koja bi se proizvela iz hibridnih sustava ove lokacije iznosila bi 1.496.892,00 kWh te bi kapitalni troškovi iznosili 10.321.232,51 kn, odnosno 1.369.862,97 €.

### 6.3.4. Određivanje vremenskog perioda povrata investicije

Prema prethodnim izračunima u tablici 6.4. je prikazana rekapitulacija kapitalnih troškova za obje lokacije, odnosno za lokaciju rijeke Česme kod naselja Narta i rijeke Bednje u gradu Ludbreg.

Tablica 6.4. Rekapitulacija kapitalnih troškova solarnih elektrana i malih hidroelektrana za obje lokacije

POSTROJENJE	PRODAJNA CIJENA(€/kW)	PROIZVEDENA ELEKTRIČNA ENERGIJA (kWh)	KAPITALNI TROŠKOVI (€)
SE Česma	0,08	1.369.630	1.344.691,54
SE Bednja	0,08	1.380.900	1.344.691,54
MHE Česma	0,14	243.332,16	84.264,11
MHE Bednja	0,14	115.992,00	25.171,42

Na temelju prethodnih izračuna i analiza, možemo izračunati vrijeme povrata pojedine investicije za obje lokacije, s time da otkupitelj (HEP d.d.) plaća PDV, stoga on neće biti uzet u proračun. U izračun je uzet u obzir i gruba procjena projektne dokumentacije pojedinog postrojenja sa uključenim PDV-om.

#### SE Česma:

1.344.691,54 € - kapitalni trošak investicije

30.000,00 € - trošak projektne dokumentacije

109.068,68 € - godišnji iznos otkupa električne energije

$1.374.691,54 \text{ €} / 109.068,68 \text{ €} = 12,60 \rightarrow 13,00$  godina povratni period investicije

#### SE Bednja:

1.344.691,54 € - kapitalni trošak investicije

30.000,00 € - trošak projektne dokumentacije

109.966,16 € - godišnji iznos otkupa električne energije

$1.374.691,54 \text{ €} / 109.966,16 \text{ €} = 12,50 \rightarrow 13,00$  godina povratni period investicije

MHE Česma:

84.264,11 € - kapitalni trošak investicije

40.000,00 € - trošak projektne dokumentacije

34.556,43 € - godišnji iznos otkupa električne energije

$124.264,11 \text{ €} / 34.556,43 \text{ €} = 3,60 \rightarrow 4,00$  godina povratni period investicije

MHE Bednja:

25.171,42 € - kapitalni trošak investicije

40.000,00 € - trošak projektne dokumentacije

16.472,42 € - godišnji iznos otkupa električne energije

$65.171,42 \text{ €} / 16.472,42 \text{ €} = 3,96 \rightarrow 4,00$  godina povratni period investicije

Kombinacija SE Česma i MHE Česma:

1.428.955,65 € - kapitalni trošak investicije

70.000,00 € - trošak projektne dokumentacije

143.625,11 € - godišnji iznos otkupa električne energije

$1.498.955,65 \text{ €} / 143.625,11 \text{ €} = 10,43 \rightarrow 10,50$  godina povratni period investicije

Kombinacija SE Bednja i MHE Bednja:

1.369.862,96 € - kapitalni trošak investicije

70.000,00 € - trošak projektne dokumentacije

126.438,58 € - godišnji iznos otkupa električne energije

$1.439.862,96 \text{ €} / 126.438,58 \text{ €} = 11,39 \rightarrow 11,50$  godina povratni period investicije

## 7. Zaključak

Za hibridne sustave rijeke Česme i rijeke Bednje određene su njihove veličine i ekonomske značajke. Radilo se o potencijalnim lokacijama na rijeci Česmi kod naselja Narta u Bjelovarsko-bilogorskoj županiji te na rijeci Bednji u gradu Ludbreg u Varaždinskoj županiji. Utvrđeno je da solarne fotonaponske elektrane imaju najveći potencijal, uz male hidroelektrane koje koriste potencijalnu energiju vode. Veličina sustava, lokacija, vodostaj, protok i visina pregrade bitno utječu na povratni period investicije. Također, utvrđeno je da kinetičke turbine nemaju potencijal na ovakvim vodotocima.

Preporuča se korištenje OIE te je kombinacija solarnih elektrana i hidroelektrana obećavajuća jer postoji inverzni način rada. U periodu najvećih sunčanih sati, npr. u ljetnom periodu i kada je vodostaj najniži, a broj sunčanih sati tijekom godine izraženiji, najveći potencijal proizvodnje električne energije imaju solarne fotonaponske elektrane, dok u periodu većih oborina i manjih sunčanih sati, hidroelektrane imaju najveći potencijal za proizvodnju električne energije te se može zaključiti da su oba sustava održiva i proizvodnja električne energije kontinuirana. Potrebno je u obzir uzeti i problem kod projekcije prodajnih tj. otkupnih cijena električne energije, budući da su poticajne cijene podložne čestim promjenama, pri čemu je dosadašnja praksa promjena cijena skoro svake godine. Komplicirani zakonsko-administrativni okvir također doprinosi skeptičnosti fizičkih i pravnih osoba prema investiciji u ovakve energetske sustave.

## 8. Literatura

- [1] Hamilton, M., Analiza energetske politike, Pojmovni okvir, Zagreb, ožujak 2018.
- [2] Hydropower Status Report, International Hydropower Association, 2022. godina.
- [3] Energetski institut Hrvoje Požar: Republika Hrvatska, Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, Analiza i podloge za izradu Strategije energetskeg razvoja Republike Hrvatske, Bijela knjiga, Zagreb, svibanj 2019.
- [4] Labudović, B., Obnovljivi izvori energije, Zagreb, svibanj 2002.
- [5] HEP proizvodnja, raspoloživo na: <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/1528> (pristupljeno 09. kolovoza 2022.)
- [6] GlobalData.com, raspoloživo na: <https://www.globaldata.com/store/report/solar-pv-market-analysis/> (pristupljeno 09. kolovoza 2022.)
- [7] Renewable Electricity in Croatia and Slovenia from the Aspect of the EU Energy and Climate Targets for 2020, Dario Maradin, Ljerka Cerović, Nina Ponikvar
- [8] Energyencyclopedia, raspoloživo na: <https://www.energyencyclopedia.com/en/renewable-energy-sources/water-energy/types-of-hydroelectric-power-plants> (pristupljeno 10. kolovoza 2022.)
- [9] Wikipedija, Hidroelektrane u Hrvatskoj, raspoloživo na: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrane\\_u\\_Hrvatskoj](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrane_u_Hrvatskoj) (pristupljeno 10. kolovoza 2022.)
- [10] HEP proizvodnja, raspoloživo na: <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-jug/he-peruca/1551> (pristupljeno 10. kolovoza 2022.)
- [11] Mapio, raspoloživo na <https://mapio.net/pic/p-42574395/> (pristupljeno 10. kolovoza 2022.)
- [12] Wikipedija, Hidroelektrana, raspoloživo na: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana\\_Zaku%C4%8Dac](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Zaku%C4%8Dac) (pristupljeno 10. kolovoza 2022.)
- [13] Hydropower, raspoloživo na: <https://www.hydropower.org/iha/discover-types-of-hydropower> (pristupljeno 10. kolovoza 2022.)
- [14] Energy Efficiency and Renewable Energy, Small Hydropower Systems, DOE/GO-102001-1173, FS217, July 2001.
- [15] Kougiyas, I.; Szabo, S.; Monforti-Ferrario, F.; Huld, T.; Bodis, K., A methodology for optimization of the complementarity between small-hydropower plants and solar PV systems, 21. October, 2015.

- [16] Sites, Moja učionica, raspoloživo na:  
<https://sites.google.com/site/tehskolamojaucionica/home/obnovljivi-izvori-energije/turbine-kod-hidroelektrana> (pristupljeno 10. kolovoza 2022.)
- [17] Energy education, raspoloživo na:  
[https://energyeducation.ca/encyclopedia/Main\\_Page](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Main_Page) (pristupljeno 10. kolovoza 2022.)
- [18] Janić, Z., Small Hydro Power Plants in Croatia, ožujak 2004.
- [19] Couto, B.A.T.; Olden, D. J., Global proliferation of small hydropower plants – science and policy, *Front Ecol Environ* 2018; 16(2): 91-100, doi: 10.1002/fee.1746
- [20] Lešić, M.; Konjić, T., Fotonaponski sistemi u distributivnoj mreži, 7. prosinac, 2013.
- [21] Tanasković, M.; Bojković, T.; Perić, D., Distribucija električne energije, Beograd, ožujak 2007.
- [22] Flamtron d.o.o., raspoloživo na: <http://flamtron.hr/solar/index.php/hr/fotonaponski-sustavi/autonomni-ili-samostalni-fotonaponski-sustavi> (pristupljeno 11. kolovoza 2022.)
- [23] Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, Energetski Institut Hrvoje Požar, Energija u Hrvatskoj 2020, Godišnji energetski pregled – str. 185, tablica 8.2.1
- [24] Low Carbon Green Growth Roadmap for Asia and the Pacific: Fact Sheet - Hybrid energy system;chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.unescap.org/sites/default/files/35.%20FS-Hybrid-energy-system.pdf (pristupljeno 20. kolovoza 2022.)
- [25] Maradin, D.; Cerovic, Lj., Male hidroelektrane u proizvodnji energije Republike Hrvatske, srpanj, 2022.
- [26] Wikipedija, raspoloživo na: [https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cesma\\_\(rijeka\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cesma_(rijeka))
- [27] Enciklopedija fandom, raspoloživo na:  
[https://enciklopedija.fandom.com/hr/wiki/Hidroelektrane\\_u\\_Hrvatskoj](https://enciklopedija.fandom.com/hr/wiki/Hidroelektrane_u_Hrvatskoj) (pristupljeno 10. rujna 2022.)
- [28] UNIDO - United Nations Industrial Development Organization, raspoloživo na:  
<https://www.unido.org/> - World Small Hydropower Development Report 2019, United Nations Industrial Development Organization and the International Center on Small Hydro Power (pristupljeno 10. rujna 2022.)
- [29] Đurin, B.; Kranjčić, N.; Muhar, A.: Smart hydro-energy hybrid system potential in Croatia—Bednja River case study, *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*, 2020, 20, pp. 39-50
- [30] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021. Pristupljeno 5. listopada. 2022. <<http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=25426>>

- [31] Hrvatske vode, raspoloživo na: <http://vodostaji.voda.hr/> (pristupljeno 02. studenog 2022.)
- [32] Geoportal DGU, raspoloživo na: <https://geoportal.dgu.hr/> (pristupljeno 03. studenog 2022.)
- [33] Photovoltaic geographical information system (PVGIS), raspoloživo na: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/) (pristupljeno 03. studenog 2022.)
- [34] Državni hidrometeorološki zavod, <https://hidro.dhz.hr/> (pristupljeno 13. studenog 2022.)
- [35] Bigor, P. Potencijal rijeke Bednje za korištenje hidrokinetičkih turbina, Diplomski rad, Varaždin, srpanj 2021.
- [36] Nekić, J. Određivanje optimalnog nagiba i orijentacija fotonaponskih modula, Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek, 2017.
- [37] Hrvatski operator tržišta energije, raspoloživo na: <https://www.hrote.hr/> (pristupljeno 27. studenog 2022.)
- [38] Solar.com, Solar panel cost, raspoloživo na: <https://www.solar.com/learn/solar-panel-cost/> (pristupljeno 27. studenog 2022.)
- [39] IRENA: International Renewable Energy Agency, Renewable Power Generation Costs in 2021., raspoloživo na: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021#:~:text=The%20global%20weighted%20average%20levelised,%25%20to%20USD%200.075%2FkWh.> – str. 144, tablica 6.2. (pristupljeno 08. veljače 2023.)

## 9. Popis slika

Slika 2.1. Shema niskotlačne male hidroelektrane

Slika 2.2. Shema srednjotlačne odnosno visokotlačne male hidroelektrane

Slika 2.3. Hidroelektrana Gojak

Slika 2.4. Hidroelektrana Peruća

Slika 2.5. Shema strojarnice i zahvata pribranske MHE

Slika 2.6. Hidroelektrana Sklope

Slika 2.7. Shema strojarnice derivacijske MHE

Slika 2.8. Hidroelektrana Zakušac

Slika 2.9. Shema sustava male hidroelektrane

Slika 2.10. Shema čvrste brane za male hidroelektrane

Slika 2.11. Shema nekoliko izvedbi pomičnih brana za MHE

Slika 2.12. Shema kombinirane brane za MHE

Slika 2.13. Shema bočnog zahvata – Tlocrt

Slika 2.14. Sheme bočnog zahvata – Presjek 1-1

Slika 2.15. Shema tirolskog zahvata – Tlocrt, Presjek 1-1 i Presjek 2-2

Slika 2.16. Shema zatvorenog i otvorenog betonskog derivacijskog kanala i polimernog tlačnog cjevovoda

Slika 2.17. Shematski prikaz rada turbina: a) Reakcijska b) Impulsna

Slika 2.18. Grafički prikaz tipova turbina

Slika 2.19. Instalirane MHE do 10 MW kapaciteta u svijetu

Slika 2.20. Udio ukupnih instaliranih kapaciteta MHE

Slika 2.21. Instalirani i potencijalni kapaciteti MHE po europskim regijama

Slika 2.22. Instalirani i potencijalni kapaciteti MHE u regiji Južne Europe

Slika 3.1. Fotonaponski efekt

Slika 3.2. Osnovna podjela fotonaponskih sustava

Slika 3.3. Glavni komponenti samostalnog fotonaponskog sustava

Slika 5.1. Kartografski prikaz Republike Hrvatske sa prikazanim lokacijama postaja mjernih mjesta

Slika 5.2. Mjerna postaja Česma kod naselja Narta, Bjelovarsko-bilogorska županija

Slika 5.3. Mjerna postaja Bednja u gradu Ludbreg, Varaždinska županija

Slika 5.4. Vodostaji mjerne postaje Narta – Česma

Slika 5.5. Protoci mjerne postaje Narta – Česma

Slika 5.6. Karakteristični poprečni presjek korita Narta – Česma



Slika 5.7. Vodostaji mjerne postaje Ludbreg - Bednja

Slika 5.8. Protoci mjerne postaje Ludbreg - Bednja

Slika 5.9. Karakteristični poprečni presjek korita Ludbreg - Bednja

Slika 5.10. Ulazak u rijeku Česmu u svrhu pregleda mjernog profila vodotoka

Slika 5.11. Mjerenje širine vodotoka pomoću mjerne trake na lokaciji rijeke Česme

Slika 5.12. Sastavljanje hidrometrijskog uređaja za mjerenje na lokaciji rijeke Česme

Slika 5.13. Hidrometrija na 0+002,50 m od lijeve obale rijeke Česme

Slika 5.14. Hidrometrija na 0+005,00 m od lijeve obale rijeke Česme

Slika 5.15. Hidrometrija na 0+007,50 m od lijeve obale rijeke Česme

Slika 5.16. Hidrometrija na 0+010,00 m od lijeve obale rijeke Česme

Slika 5.17. Sastavljanje hidrometrijskog uređaja na lokaciji rijeke Bednje

Slika 5.18. Hidrometrija u rijeci Bednji

Slika 5.19. Kartografski prikaz zauzete površine solarne elektrane na rijeci Česmi

Slika 5.20. Kartografski prikaz zauzete površine solarne elektrane na rijeci Bednji

Slika 6.1. Prikaz rezultata mjerenja u naselju Narta – opće informacije o lokaciji

Slika 6.2. Grafički prikazi rezultata mjerenja u naselju Narta – prikaz protoka, brzina i dubina na svakoj mjernoj stanici

Slika 6.3. Prikaz rezultata mjerenja u naselju Narta – broj mjernih postaja, vrijeme, lokacija, metoda mjerenja, dubina, brzina, površina i protok

Slika 6.4. Prikaz postavke provjere kvalitete i upozorenja tijekom mjerenja u naselju Narta

Slika 6.5. Prikaz rezultata mjerenja u Ludbregu – opće informacije o lokaciji

Slika 6.6. Grafički prikazi rezultata mjerenja u Ludbregu – prikaz protoka, brzina i dubina na svakoj mjernoj stanici

Slika 6.7. Prikaz rezultata mjerenja u gradu Ludbreg – broj mjernih postaja, vrijeme, lokacija, metoda mjerenja, dubina, brzina, površina i protok

Slika 6.8. Prikaz postavke provjere kvalitete i upozorenja tijekom mjerenja u Ludbregu

Slika 6.9. Prikaz rezultata prebačenog mjerenja u Ludbregu – opće informacije o lokaciji

Slika 6.10. Grafički prikazi rezultata prebačenog mjerenja u Ludbregu – prikaz protoka, brzina i dubina na svakoj mjernoj stanici

Slika 6.11. Prikaz rezultata prebačenog mjerenja u gradu Ludbreg – broj mjernih postaja, vrijeme, lokacija, metoda mjerenja, dubina, brzina, površina i protok

Slika 6.12. Prikaz postavke provjere kvalitete i upozorenja tijekom prebačenog mjerenja u Ludbregu

Slika 6.13. Grafički prikaz srednjih brzina vode na svakoj stacionaži u Ludbregu

Slika 6.14. Grafički prikaz dubina na stacionažama u Ludbregu

Slika 6.15. Odabrani ulazni parametri za izračun snage solarne elektrane na rijeci Česmi korištenjem programa Photovoltaic Geographical Information System

Slika 6.16. Mjesečne vrijednosti izlazne energije iz solarnog fotonaponskog sustava, dobivene korištenjem aplikacije Photovoltaic Geographical Information System

Slika 6.17. Odabrani ulazni parametri za izračun snage solarne elektrane na rijeci Bednji korištenjem programa Photovoltaic Geographical Information System

Slika 6.18. Mjesečne vrijednosti izlazne energije iz solarnog fotonaponskog sustava, dobivene korištenjem aplikacije Photovoltaic Geographical Information System

Slika 6.19. Krivulja trajanja Narta – Česma

Slika 6.20. Krivulja trajanja Ludbreg - Bednja

## **10. Popis tablica**

Tablica 2.1. Specifične brzine pojedinih izvedbi turbine

Tablica 2.2. Popis MHE u Republici Hrvatskoj

Tablica 6.1. Rezultati proračuna za lokaciju Ludbreg

Tablica 6.2. Brojčani prikaz mjesečnih vrijednosti izlazne energije iz solarnog fotonaponskog sustava na rijeci Česmi

Tablica 6.3. Brojčani prikaz mjesečnih vrijednosti izlazne energije iz solarnog fotonaponskog sustava na rijeci Bednji

Tablica 6.4. Rekapitulacija kapitalnih troškova solarnih elektrana i malih hidroelektrana za obje lokacije