

Hidrauličko oblikovanje ulazne građevine male hidroelektrane

Barbarić, Marin

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:240227>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-28**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Marin Barbarić

**HIDRAULIČKO OBLIKOVANJE ULAZNE
GRAĐEVINE MALE HIDROELEKTRANE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Marin Barbarić

**HIDRAULIČKO OBLIKOVANJE ULAZNE
GRAĐEVINE MALE HIDROELEKTRANE**

DIPLOMSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Eva Ocvirk

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Marin Barbarić

Hydraulic design of the intake structure of a small hydropower plant

MASTER THESIS

Supervisor: prof. dr. sc. Eva Ocvirk

Zagreb, 2024



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

Marin Barbarić 0035193204

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

HIDRAULIČKO OBLIKOVANJE ULAZNE GRAĐEVINE MALE HIDROELEKTRANE

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

18.09.2024

Potpis:



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

Marin Barbarić 23541858889

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

HIDRAULIČKO OBLIKOVANJE ULAZNE GRAĐEVINE MALE HIDROELEKTRANE

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

prof. dr. sc. Eva Ocvirk

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

26.09.2024

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

18.09.2024

Potpis:

Marin Barbarić

Sažetak

U ovom radu prikazani su osnovni elementi ulaznih građevina male hidroelektrane, uz poseban fokus na optimizaciju protoka. Analizirana je mala hidroelektrana na rijeci Mrežnici, u blizini kampa Mrežnica, uz već postojeću vodnu stepenicu u blizini grada Karlovca. Cilj rada je odabrati optimalni oblik ulazne građevine i mogućih pripadnih zahvata koji će osigurati ravnomjerno polje tečenja u dovodnom kanalu neposredno prije turbinskog trakta, minimizirajući gubitke u dovodnom kanalu. Razmatraju se različite varijante modela, uključujući varijante bez modifikacija, s usmjerivačem toka te sa zidom na lijevoj obali. Svaka varijanta modela uključuje prilagođeni element dizajniran za optimizaciju hidrauličkih uvjeta. Numeričke simulacije tečenja pružaju hidrauličke parametre, a rezultati analize uspoređuju doprinose pojedinih varijanti modela na strujnu sliku u dovodnom kanalu.

Ključne riječi: ulazna građevina, usmjerivač toka

Summary

This thesis presents the fundamental elements of the intake structures of a small hydroelectric power plant, with a particular focus on optimizing flow in the intake channel. The research is dedicated to analyzing the design of a small hydroelectric plant on the Mrežnica River, near the Mrežnica campsite, adjacent to an existing water step in Karlovac. The aim of the study is to identify the optimal shape of the intake structure that will ensure a uniform flow field in the intake channel just before the turbine section, minimizing losses in the intake channel. Various model variants are considered, including versions without modifications, with a flow guide, and with a wall on the left bank. Each model variant includes a customized element designed to optimize hydraulic conditions. Numerical flow simulations provide hydraulic parameters, and the analysis results compare the contributions of individual model variants to the flow pattern in the intake channel, particularly the upper and lower water velocity parameters in relation to the flow.

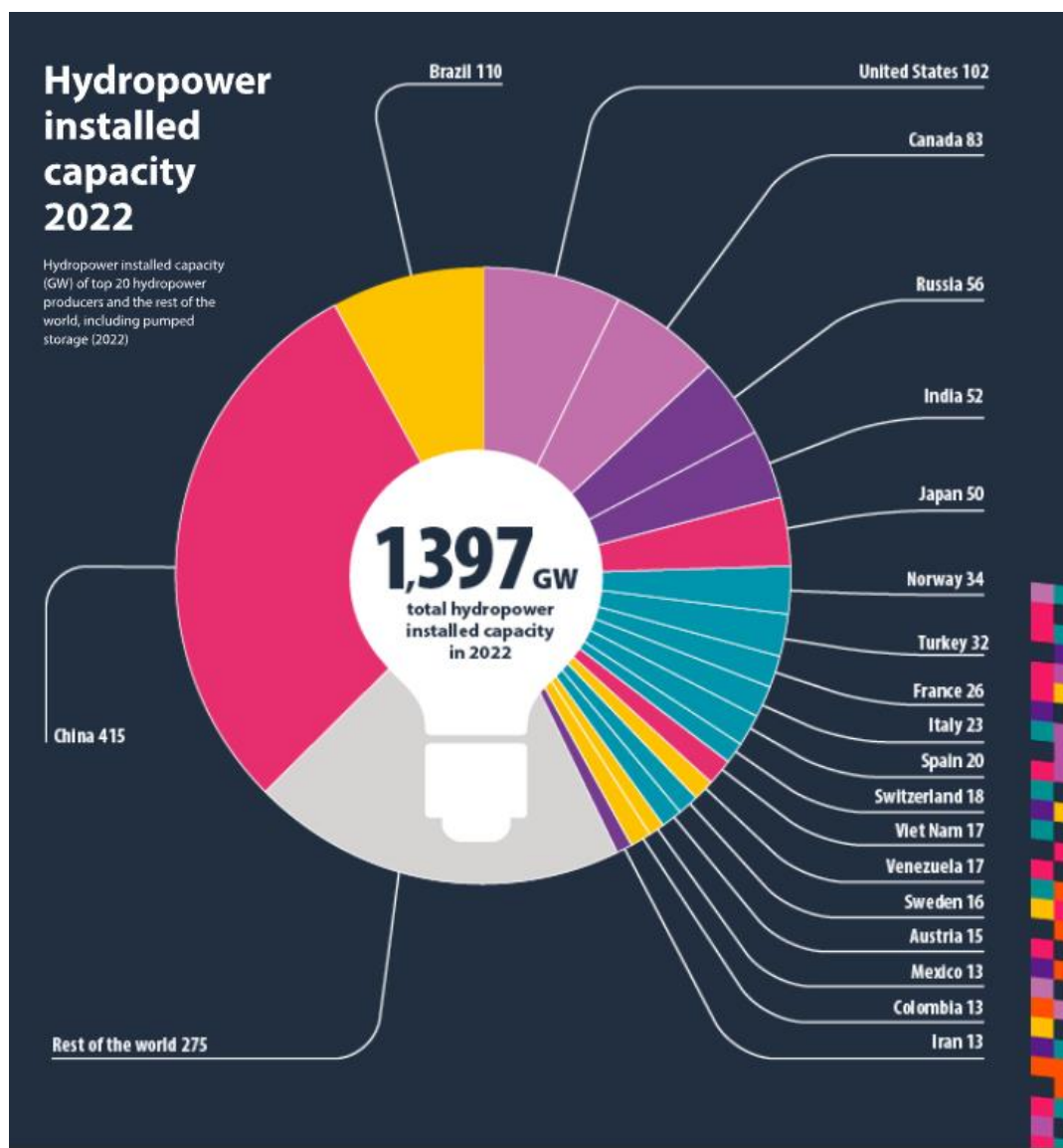
Keywords: intake structure, flow guide

Sadržaj

Sažetak	i
Summary	ii
1. Uvod	1
1.1. Ulazna građevina – općenito	1
1.2. Usmjerivači toka – općenito	3
2. Podloge	8
2.1. Predmetna lokacija -mHE	8
2.2. Tehnički opis	10
2.3. Hidrološke podloge	15
3. Cilj rada	20
4. Metodologija	23
4.1. Hidraulički proračun	23
4.2. Određivanje polja brzina	28
5. Rezultati i diskusija	30
5.1. Varijanta 1	30
5.2. Varijanta 2	34
5.3. Varijanta 3	38
5.4. Usporedba rezultata	41
6. Zaključak	44
Literatura	45
Popis slika	47
Popis tablica	49

1. Uvod

Hidroelektrane predstavljaju energetska postrojenja koja iskorištavaju energiju vode za proizvodnju električne energije. Trenutno, hidroelektrane igraju značajnu ulogu u globalnom energetske sektoru, pokrivajući približno 16% ukupne svjetske potrošnje električne energije, s ukupno instaliranom snagom od 1397 GW. U Hrvatskoj, hidroelektrane čine ključni dio energetskeg sustava, s ukupnom instaliranom snagom od 2.2 GW, što predstavlja približno polovicu ukupne proizvodnje električne energije u zemlji. [1][2].

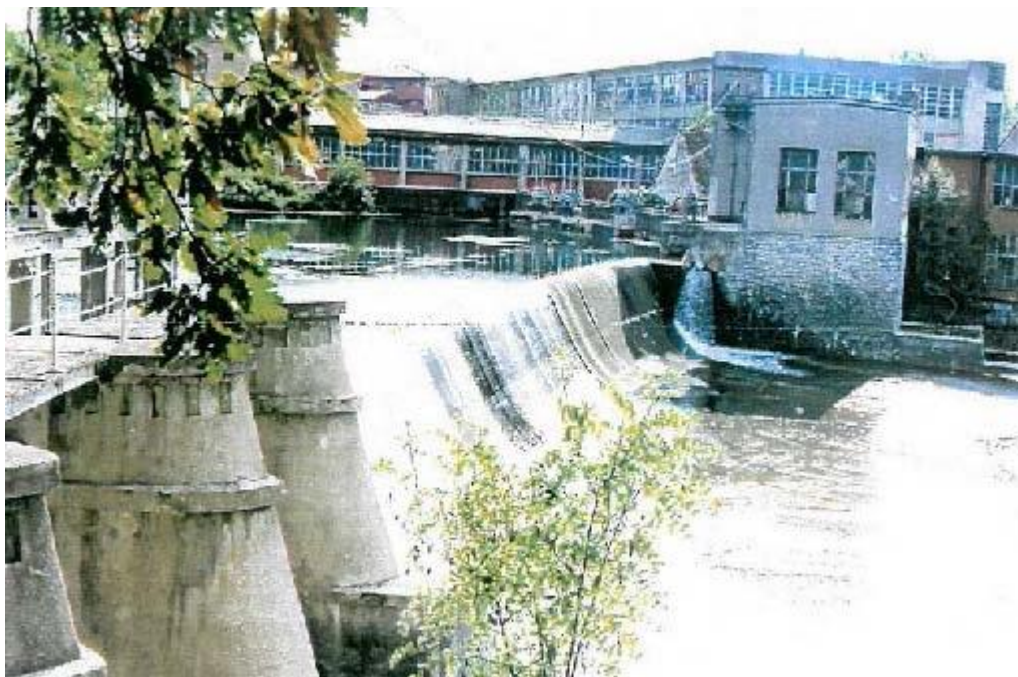


Slika 1 Instalirana snaga hidroelektrana u svijetu (2022. godine, godišnji izvještaj IHA - International Hydropower Association) [2]

Hrvatska elektroprivreda je vlasnik većine malih hidroelektrana u Hrvatskoj s ukupnim instaliranim kapacitetom od 28,7 MW. Međutim, postoje i manje hidroelektrane koje su u vlasništvu privatnih poduzetnika, a njihov ukupni instalirani kapacitet procjenjuje se na 4,9 MW [3].

Unatoč tome što je izgradnja hidroelektrana u Hrvatskoj započela davne 1895. godine, značajniji razvoj malih hidroelektrana (skraćeno: mHE) bilježi se tek od 1980. godine. U skladu s hrvatskim zakonima i propisima, male hidroelektrane definiraju se kao hidroelektrane s instaliranom snagom koja ne prelazi 10 MW. Trenutačno na području Hrvatske aktivno djeluje 17 velikih hidroelektrana, dok se broj malih hidroelektrana procjenjuje na otprilike 20 [4].

Zanimljivo je napomenuti da je prva mHE na hrvatskom teritoriju bila mHE Duga Resa na rijeci Mrežnici, koja je sagrađena još 1884. godine. No, važno je napomenuti da ova hidroelektrana nije bila javna, već je služila za opskrbu energijom Pamučne industrije (Slika 2).



Slika 2 MHE Duga Resa na Mrežnici 1884. godine služila za proizvodnju struje u pamučnoj industriji

U sklopu mjera paketa EU-a za 2030. godinu, planirano je povećanje udjela obnovljivih izvora energije, uključujući i hidroelektrane. Hrvatska je postigla cilj s udjelom od 34,2%, što ukazuje na potrebu daljnjeg razvoja i investiranja u ove izvore energije.

Nakon pristupanja Hrvatske Europskoj uniji, preuzeli smo obvezu provođenja reforme energetskega sektora kako bismo ga uskladili s ciljevima EU, s naglaskom na integraciju obnovljivih izvora energije. Prema "Strategiji energetskega razvoja Republike Hrvatske" iz 2009. godine, bilo je planirano izgraditi najmanje 100 MW malih hidroelektrana do 2020. godine. Međutim, provedba projekata malih hidroelektrana financijski je zahtjevna i može znatno varirati ovisno o geomorfološkim karakteristikama, raspoloživosti vode, pravnim odnosima vezanim uz zemljište, zaštitnim mjerama prirode te udaljenosti od elektroenergetske mreže [1].

Prvi put je procjena tehnički iskoristivog potencijala za izgradnju malih hidroelektrana (mHE) u Hrvatskoj provedena 1985. godine u studiji nazvanoj "Katastar malih vodnih snaga u Hrvatskoj". Prema toj studiji, procijenjen je ukupni potencijal snage od 177 MW. U okviru studije analizirano je 130 vodotoka, pri čemu je na polovici od njih utvrđen broj potencijalnih lokacija za izgradnju mHE snage do 5 MW [4].

Tablica 1 Prikaz potencijala mHE u ovisnosti raspona instalirane snage [5]

Instalirana Snaga	Broj poteza	Broj poteza(%)	Instal.snaga (MW)	Instal snaga (%)
5-1.5	20	3	50	29
1.5-1.0	17	2	22	12
1.0-0.5	42	6	29	16
0.5-0.1	296	42	56	31
Manje od 0.1	324	47	21	12
Ukupno	699	100	177	100

Prema prethodnoj procjeni, vodotoci na kojima nisu definirane potencijalne lokacije smatrani su financijski neisplativima zbog pretpostavke da imaju premalu specifičnu snagu. Međutim, s razvojem novih tipova turbina, ti vodotoci postaju zanimljivi jer omogućavaju iskorištavanje energije vode na malim padovima, a takvi vodotoci su široko rasprostranjeni u Hrvatskoj. Međutim, problem s prethodnom procjenom potencijala mHE je da se temeljila na starijoj metodologiji, što dovodi u pitanje pouzdanost podataka. Ta procjena je općenito ocjenjivala pojedine vodotoke, ne uzimajući u obzir specifične razlike između pojedinih lokacija, kao što su ekološka ograničenja i prostorno-planske restrikcije. Prema najnovijim podacima, koji će se sigurno nadopunjavati u budućnosti, trenutni tehnički potencijal malih hidroelektrana u Hrvatskoj, bez uzimanja u obzir ekoloških ograničenja, iznosi oko 350 MW, dok se realno ostvariv potencijal procjenjuje na oko 100 MW. [6]

1.1. Ulazna građevina – općenito

Prilikom projektiranja ulazne građevine, izuzetna pažnja posvećuje se hidrauličkom i geometrijskom oblikovanju kako bi se smanjili gubici i postigla energetska učinkovitost. Istovremeno se vodi briga o zaštiti okoliša i ekosustava rijeke Mrežnice, minimizirajući negativan utjecaj na prirodni svijet u tom području. Pravilno oblikovana ulazna građevina sprječava pojavu nepoželjnih vrtloga i vibracija te osigurava ravnomjernu raspodjelu brzina protoka vode, što predstavlja izazov u praksi.

Pri projektiranju ulazne građevine, neophodno je osigurati njezinu funkcionalnost i sigurnost tijekom eksploatacije. Hidromehanička oprema ulazne građevine varira ovisno o vrsti građevine i karakteristikama hidrotehničkog objekta. Promjene u poprečnom presjeku utječu na raspodjelu brzina i mogu rezultirati varijacijama tlaka na prijelazima između proticajnih površina. Gubici pritiska također se pojavljuju na različitim uređajima poput rešetki, zatvarača, ustava, taložnika itd. Brzine protoka vode kroz rešetku obično su ograničene na otprilike 1 m/s, a ta ograničenja proizlaze iz gubitaka pritiska, potencijalnih vibracija, mogućnosti ulaska lebdećeg materijala između šipki rešetke te potrebe za brtvljenjem rešetke.

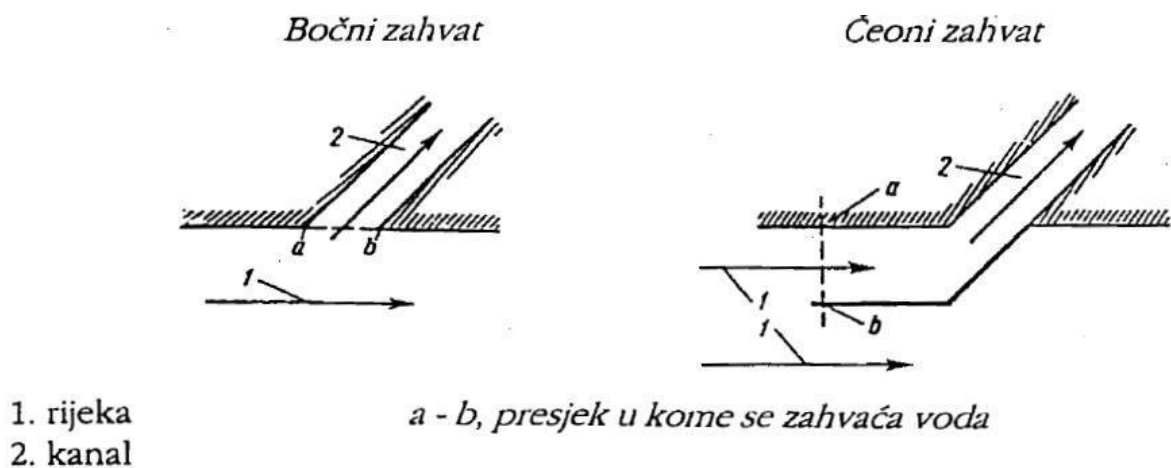
Kada govorimo o ulaznim građevinama, one se mogu klasificirati prema zahtjevima tečenja u dvije osnovne kategorije: ulazne građevine sa zahvatom pod tlakom i ulazne građevine sa slobodnim vodnim licem. Zahvat pod tlakom koristi se kada postoji prepreka poput brane koju treba zaobići, a ulaz se obično pozicionira bliže dnu korita iznad područja za taloženje sedimenata. Specifičnost ovog tipa ulazne građevine leži u prisutnosti zračnih cijevi koje omogućuju ispuštanje zraka u sustav ako slučajno uđe unutra.

Ovaj pristup osigurava siguran i učinkovit rad ulazne građevine, bez obzira na eventualne prepreke i nepredviđene situacije koje se mogu pojaviti tijekom eksploatacije.

S druge strane, zahvat sa slobodnim vodnim licem oblikuje se kao produžetak postojećeg vodotoka ili akumulacije i usko je povezan s hidraulikom riječnih korita. Oba tipa ulaznih građevina zahtijevaju pažljivo hidrauličko i inženjersko oblikovanje kako bi se osigurala učinkovita i sigurna opskrba vodom za proizvodnju električne energije.

Promatranjem prirodnog toka rijeke, primjećuje se da se u zavojima rijeke glavni tok približava konkavnoj obali, što rezultira većim brzinama toka. Nestabilne obale i korita mogu dovesti do odnošenja materijala. S druge strane, na konveksnoj obali dolazi do taloženja materijala i formiranja sprudova. Stoga je poželjno postavljati ulazne građevine na konkavnoj obali, gdje postoji tendencija odnošenja materijala, umjesto na konveksnoj obali koja je podložna taloženju. Ovo može zahtijevati posebnu zaštitu obala uzvodno i nizvodno od ulazne građevine.

Ulazne građevine, prema položaju njihovog zahvata vode, mogu se podijeliti na dvije glavne kategorije: bočne i čeone ulazne građevine (Slika 3). Bočne ulazne građevine koriste se kada je potrebno usmjeriti vodu tako da skreće poprečno u odnosu na glavni tok rijeke. S druge strane, čeone ulazne građevine imaju usmjerivač koji usmjerava vodu prema dovodnom kanalu. Oba ova tipa ulaznih građevina su opremljena pragom koji služi kako bi spriječio ulazak vučenih materijala u samu građevinu. Također, često se koristi čelična rešetka kako bi se zaštitio dovodni kanal od plutajućih objekata i nepoželjnih naslaga. Važno je napomenuti da različiti položaji zahvata vode imaju značajan utjecaj na hidrauličke karakteristike ulaznih građevina, što zahtijeva prilagođen pristup njihovom inženjeringu i izgradnji.



Slika 3 Podjela ulaznih građevina po položaju zahvata, bočni zahvat (lijevo), čeoni (desno) [7])

1.2. Usmjerivači toka – općenito

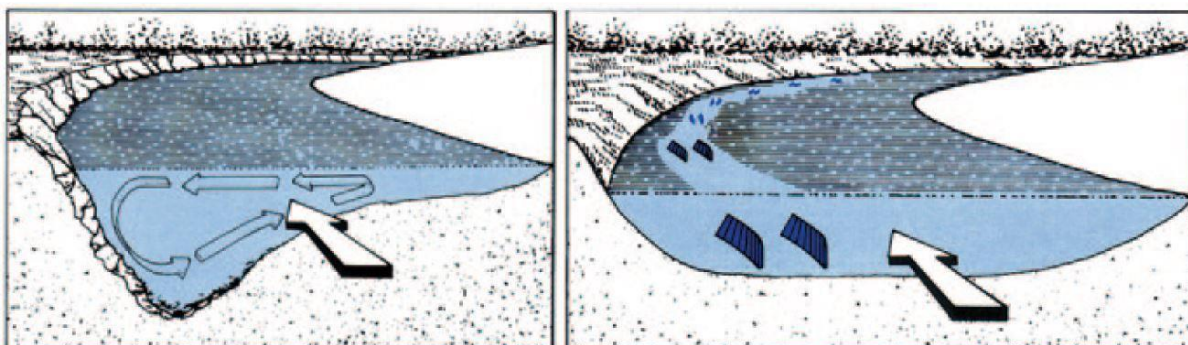
Hidrauličkom i geometrijskom oblikovanju ulazne građevine pridaje se posebna pažnja kako bi se minimalizirali energetske gubici, povećala efikasnost, reducirali troškovi održavanja i eliminirali neželjeni fenomeni poput vrtloga i vibracija.

Za postizanje optimalnih hidrauličkih uvjeta pred turbinom, istraživanje i analiza tuđih iskustava s usmjerivačima toka i sličnim objektima može biti od velike koristi. U knjizi "Advances in Water Resources Engineering" obrađuje se tema dinamike sedimenta i procesa u rijekama, nudeći uvide u moguće pristupe. Jedan primjer, koji je prezentiran od strane J. Odgaarda, uključuje primjenu usmjerivača toka i sustava potopljenih krila (Slika 4) (Slika 5) za poboljšanje strujne slike u prirodnim riječnim koritima. Cilj ovog pristupa jest postići dugoročnu stabilnost u skladu s promjenjivim vodnim režimom i nanosima u rijeci, što može pružiti korisne smjernice za projektiranje ulazne građevine.

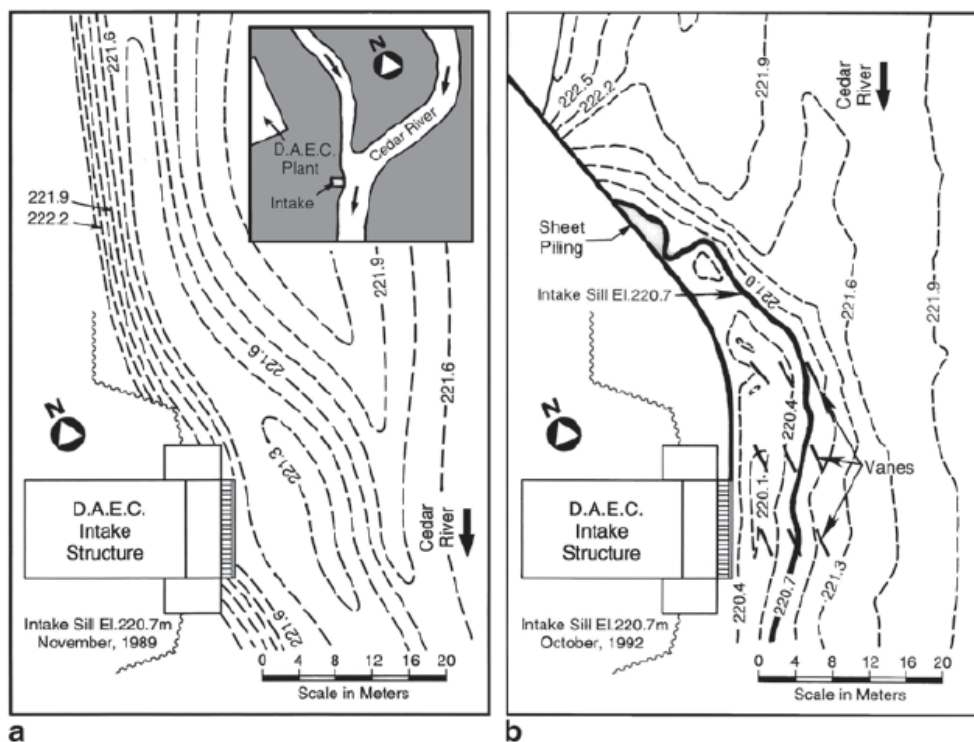
Jedan zanimljiv primjer analize zahvata rashladne vode iz rijeke Cedar za potrebe nuklearne elektrane DAEC može poslužiti kao ilustracija. Ovaj projekt suočavao se s izazovom stabilnosti obale, često povezane s problemima ulazanja vode u ulaznu građevinu pod pravim kutem u odnosu na smjer toka, što je upravo ovdje bio slučaj. U tom scenariju, rijeka je počela erozirati obalu od kritičnog mjesta, tj. spoja obale s čvrstim dijelovima ulazne građevine. Otežavajuća okolnost projekta DAEC bila je i prisutnost turbulentnog i vrtložnog toka te nepovoljna konfiguracija korita rijeke, budući da se ulazna građevina nalazila odmah nakon ušća rijeke.

Tijekom vremena, dolazi do taloženja nanosa na ulazu u dovodni kanal, što značajno sužava protočni profil, dok se u sredini kanala korito produbljuje, smanjujući dotok vode u sam dovodni kanal. S ciljem rješavanja ovog problem, inženjeri su poduzeli niz mjera. Prvo, obala uz zahvat je ojačana i utvrđena uzvodno od ulazne građevine, čime se povećala stabilnost obale. Također, izgrađen je sustav koji se sastoji od devet potopljenih krila, svako s malim nagibom u odnosu na glavni tok rijeke (prikazano na slici 9). Glavna uloga ovih krila bila je stabilizirati dno korita uzvodno od ulazne građevine, sprječavajući taloženje nanosa ispred same građevine te preusmjeriti te nanose nizvodno kako bi se osigurao ravnomjeran protok vode.

Ovaj primjer ilustrira kako inženjerska rješenja, poput sustava potopljenih krila, mogu učinkovito rješavati izazove vezane uz stabilnost obala i protok vode u ulaznim građevinama hidroelektrana.



Slika 4 Prirodna pojava rotacijskog tečenja (lijevo), potopljena krila za usmjeravanje toka i sprječavanja pojave erodiranja dna rotacijskim tečenjem (desno) [8]

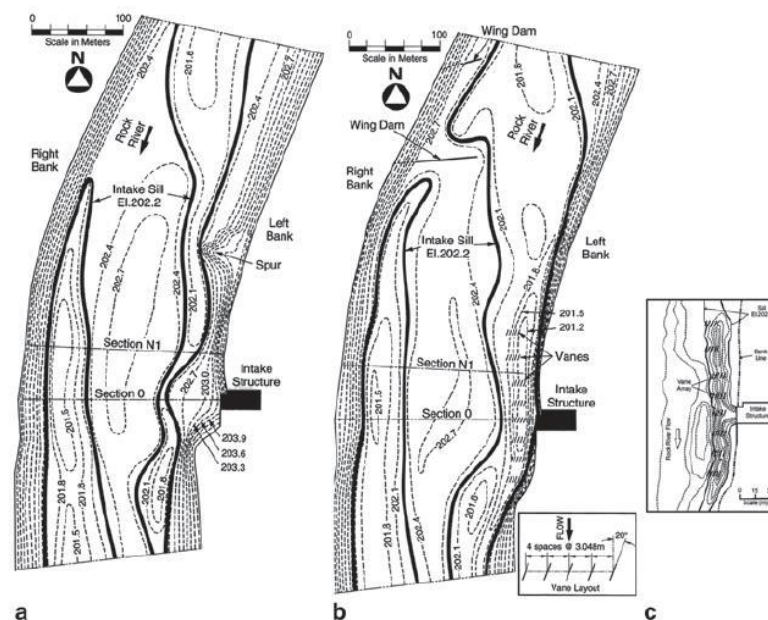


Slika 5 Batimetrija rijeke Cedar na mjestu zahvata za DAEC postrojenje, a) u 1989. godini, i b) u 1992. godini [8]

U gradu Goldsboro u sjevernoj Karolini, postojao je problem zahvata vode iz rijeke Neuse, gdje su se često javljali problemi začepjenja ulaza zbog nakupljanja sedimenata. Ovi problemi rezultirali su nedovoljnom dubinom vode, posebno tijekom razdoblja nižih vodostaja. Da bi se riješio ovaj problem, inženjeri su primijenili određene inovativne tehnike.

Jedno od rješenja uključivalo je instalaciju sustava potopljenih krila i jednog usmjerivača toka kako bi se optimizirao protok vode i spriječilo taloženje nanosa u samu ulaznu građevinu. Krila su igrala ključnu ulogu u sprječavanju nakupljanja nanosa, jer su ih prikupljala i preusmjeravala nizvodno. Za simulaciju i modeliranje ove promjene koristio se softver HEC-RAS, koji je omogućio precizno predviđanje kako će se novi sustav ponašati u stvarnim uvjetima na dionici rijeke Neuse u Goldsboru.

Cilj ove intervencije bio je osigurati kontinuirani pad energetske linije kako bi se postigao ravnomjeran protok nanosa. Trenutni rezultati ove inovacije zadovoljavaju očekivanja i pridonose poboljšanju protoka vode i funkcionalnosti ulazne građevine.



Slika 6 Batimetrija rijeke Rock na mjestu zahvata za postrojenje Byron, a) stanje u 1990. godini, b) u 1994. godini i c) u 2007. godini [8]

U trećem primjeru, istražuje se problem nuklearne elektrane Byron u državi Illinois, koja koristi vodu iz rijeke Rock za hlađenje svojih postrojenja. Ovaj zahvat vode smješten je na unutarnjoj strani riječnog zavoja, što često rezultira prirodnim taloženjem sedimenata u toj regiji. Da bi se prevladali ti izazovi, inženjeri su razvili inovativna rješenja.

Ključna intervencija u ovom slučaju bila je instalacija dva usmjerivača toka na vanjskoj strani riječnog zavoja, čime se preusmjerio tok vode prema unutarnjoj strani zavoja. Prije samog zahvata, izgrađen je sustav potopljenih krila s otklonom od 20° u odnosu na glavni tok. Ovaj sustav sastojao se od 8 redova, svaki s 5 krila razmaknutih 3 metra jedno od drugog. Osim

što su spriječila taloženje sedimenata, krila su poboljšala dubinu u dovodnom kanalu, smanjivši rizik od uvlačenja zraka u sustav. Također su umirila vrtložni tok i usmjerila vodu prema turbinama [10].

Ovaj primjer pokazuje kako se inovativna inženjering rješenja mogu primijeniti kako bi se optimizirala funkcionalnost i učinkovitost infrastrukturnih objekata poput nuklearnih elektrana ili hidroelektrana.

U članku "The use of baffle columns to mitigate undesired hydraulic conditions at river intake structures" autori A.H. Khater i M. Ashraf predstavljaju zaštitu ulazne građevine od nepovoljnih hidrauličkih uvjeta pomoću niza stupova. Kroz primjer South Helwan hidroelektrane u Kairu, istraživali su četiri varijante ulazne građevine na fizičkom modelu: niz stupova ispred ulazne građevine paralelno s obalom, uzvodno od ulaza (okomito na obalu), kombinacija prethodna dva slučaja i slučaj bez niza stupova (kao referentni slučaj). Rezultati istraživanja pokazali su da je niz stupova efikasno djelovao u postizanju homogenijeg profila brzina. Iako su u prva dva slučaja primijećene pozitivne promjene, najbolji rezultati postignuti su u kombinaciji oba slučaja, odnosno korištenjem niza stupova paralelno s obalom i uzvodno od ulaza. Slučaj bez niza stupova pokazao se nepovoljnim u praksi, što je potvrđeno simulacijom i usporedbom s ostalim varijantama.

Ovi rezultati ukazuju na mogućnost primjene niza stupova kao sredstva za poboljšanje hidrauličkih uvjeta kod ulaznih građevina na rijekama. Kombinacija različitih pristupa može pružiti najbolje rezultate u postizanju željenog profila brzina i poboljšanju performansi ulazne građevine. H. Benigni i M. Mosshammer proučavali su iskustva vezana uz oblik ulazne geometrije i njegov utjecaj na proizvodnju energije kod dviju istih Bulb turbina u Austriji. Primijetili su značajne razlike u proizvodnji između tih turbina. Nakon analize, zaključili su da su gubici koji se javljaju na jednoj od turbina rezultat nepovoljnog oblika ulazne geometrije. Nepovoljan oblik ulazne geometrije potiče zahvaćanje zraka, odvajanje protoka i pojavu vrtloga. Ovi faktori negativno utječu na hidrauličke performanse turbine i smanjuju njezinu efikasnost u pretvaranju energije vode u električnu energiju.

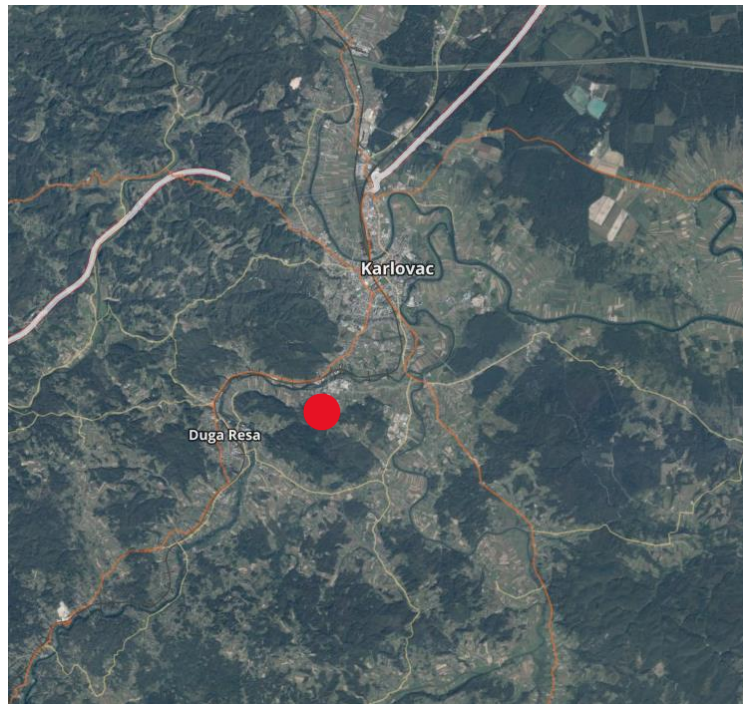
Ovo istraživanje naglašava važnost optimizacije oblika ulazne geometrije kod hidroelektrana kako bi se minimizirali gubici i poboljšale hidrauličke performanse turbina. Pravilno oblikovana ulazna geometrija može smanjiti zahvaćanje zraka, smanjiti odvajanje protoka i smanjiti pojavu vrtloga, što rezultira poboljšanom učinkovitošću i povećanom proizvodnjom energije. Stečeno iskustvo pruža važan uvid u dizajn i optimizaciju ulazne

geometrije kod hidroelektrana kako bi se postigla maksimalna energetska učinkovitost i smanjili gubici uzrokovani nepovoljnim hidrauličkim uvjetima. [10]

2. Podloge

2.1. Predmetna lokacija -mHE

U ovom radu promatra se lokacija mHE, smještena na rijeci Mrežnici kod Karlovca. Točna lokacija označena je crvenim kružićem na Slici 7.



Slika 7 Prikaz makrolokacije mHE

Planirani zahvat nalazi se na desnoj obali Mrežnice, na području koje je trenutno obuhvaćeno šumom koja se koristi za kampiranje. U neposrednoj blizini nalazi se prag koji zahtijeva sanaciju. Također, industrijska zona grada Karlovca nalazi se u neposrednoj blizini, što izaziva veliki interes za izgradnjom mHE. Predloženo rješenje uključuje sanaciju postojeće građevine. Mala Hidroelektrana bila bi pozicionirana između četiri katastarske općine: Mala Švarča, Zagrad, Mrzlo Polje i Karlovac II. Pregledom katastarskih karata utvrđeno je da se površina zahvata nalazi na k.č. 1. k.o. Mala Švarča, koja iznosi ukupno 7375 m², s mogućnošću proširenja na k.č. 5. i 6. k.o. Mala Švarča, što bi rezultiralo ukupnom površinom od 9606 m² (Slika 8).



Slika 8 Prikaz katastarskih čestica lokacije zahvata

Izgradnjom postrojenja mHE na rijeci Mrežnici, koje ima instalirani protok od $20 \text{ m}^3/\text{s}$ i bruto pad visine od 4 m, te ugradnjom jedne Dive turbine instalirane snage 620 kW, očekuje se godišnja proizvodnja električne energije od 2158 MWh koja će biti isporučena u elektroenergetsku mrežu.

2.2. 2.2. Tehnički opis

Pristupni putevi na lokaciju su u potpunosti izgrađeni s obje strane obale te je omogućen dovoz i skladištenje materijala. Teren je pretežito ravan i nalazi se na 115-116 m.n.m.

Mala hidroelektrana sastoji se od više hidrotehničkih elemenata. Na odabranoj lokaciji nalazi se postojeći prag koji će se sanirati i povisiti. Kota projektiranog praga je na 114 m.n.m, a postojećeg na 113 m.n.m. Obale korita će se učvrstiti betonskim zidom C(25/30) s dodatkom za vodonepropusnost, ukupna duljina betonskih obala je ovisna o odabranoj varijanti i varira između 20-80 m.

Slapište će se urediti cijelom širinom praga kako ne bi došlo do erozije korita rijeke Mrežnice. Prag je dugačak 70 m kao i slapište. Visina zidova slapišta nalazi se na 116 m.n.m., a duljina slapišta iznosi 6 m. Kota dna slapišta je na 109,5 m.n.m. te je potrebno zaštititi dno betonskom oblogom kvalitete C(25/30).

Predviđene dimenzije dovodnog kanala neposredno prije ulaza u turbine je 2,8 m širine, s dubinom kanala od 6,2 m. Kota dna kanala je postavljena na 109,5 m nadmorske visine, dok je kota krune praga na 116 m nadmorske visine. Na ulazu u dovodni kanal predviđena je instalacija grube rešetke, postavljene okomito na dno kanala i kosim položajem prema slapu, ukupne širine od 3,5 m i dubine od 2,5 m. Uzdužni presjek kroz ulaznu građevinu i turbine prikazan je na Slika 7. Neposredno prije ulaza u turbinsku komoru planira se ugradnja fine rešetke pod kutom od 75° u odnosu na horizontalu. Na izlazu iz turbine nalazi se horizontalni difuzor. Nakon prolaska kroz difuzor, voda će se izlaznim kanalom preusmjeriti natrag u rijeku Mrežnicu.

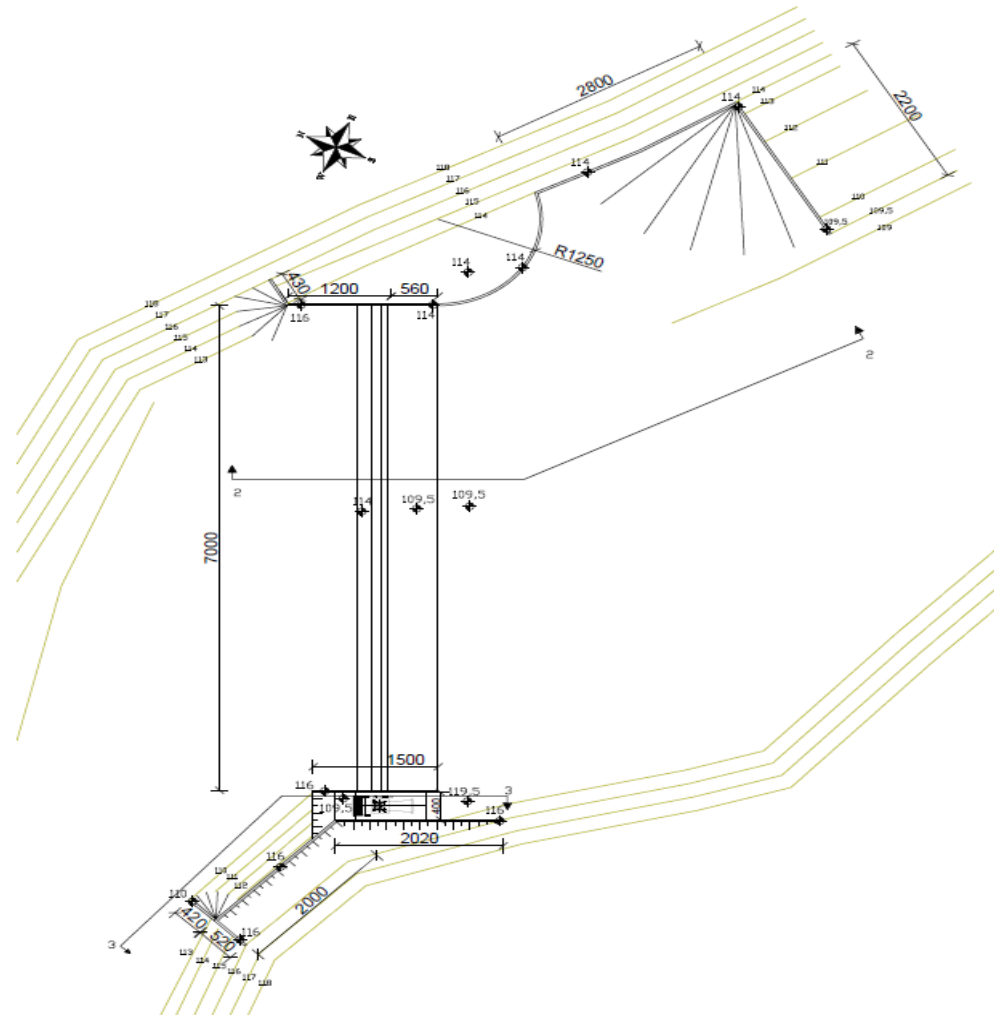
Gradnja male hidroelektrane odvijat će se u 2 faze.

Zaštićeni dio će se ograditi kamenim nabačajem nagiba 1:2, širine krune 3 metra i nalaziti će se na koti visine 115,7 m.n.m. što zadovoljava suhe uvjete pri protoku od 100 m³/s (koji se pojavljuje jednom u 50 godina). U prvoj fazi pregradit će se desna polovica obale (30 m), odnosno strana gdje će se nalaziti strojarnica, dok će voda teći preko praga. U prvoj fazi je planirano izgraditi zidove desne obale, strojarnicu i 30 metara praga.

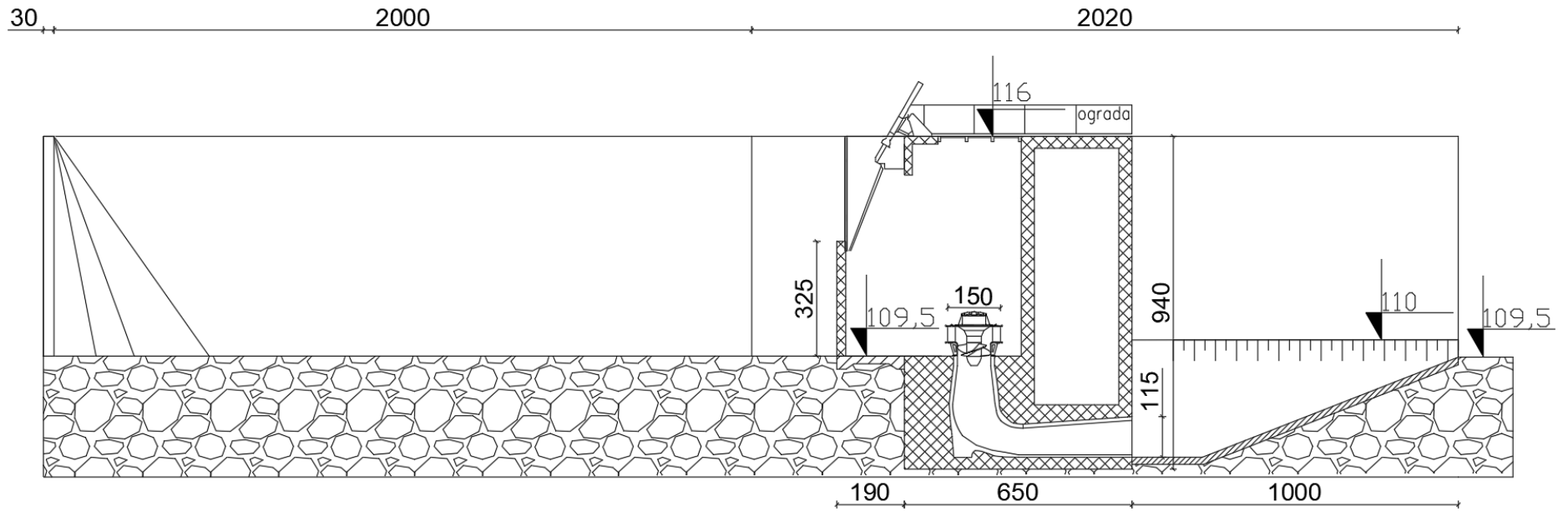
U drugoj etapi pregradit će se lijeva obala korita dok će voda teći kroz kanal strojarnice i preko dijela praga. Pristup mehanizacije zaštićenom dijelu je omogućen s obale na kojoj se gradi.

Planirano je izgraditi ostatak praga 40 metara te sve zidove lijeve obale. Prije početka gradnje potrebno je osigurati sav materijal na skladištu gradilišta s lijeve i desne strane obale te instalirati pogon za proizvodnji betona s lijeve strane obale.

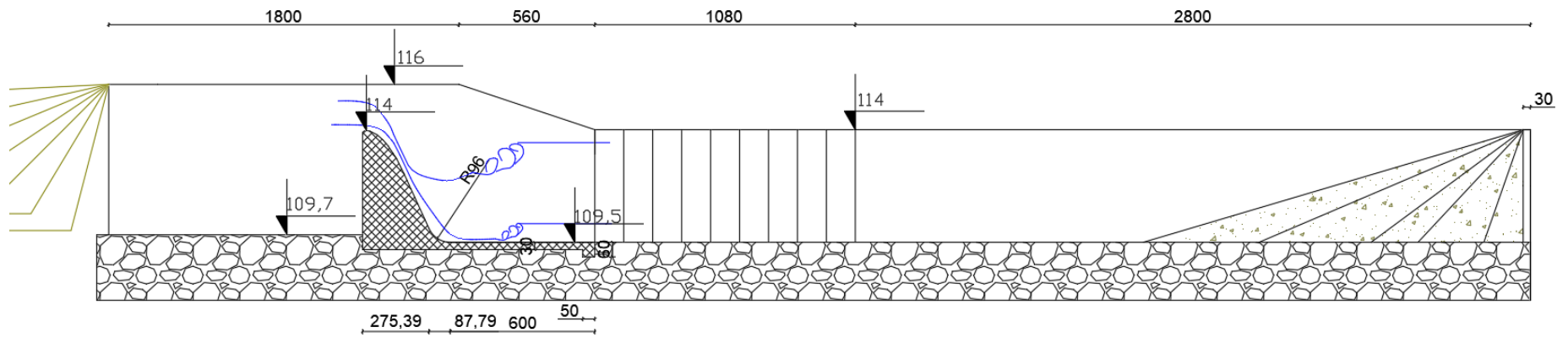
Očekivana godišnja proizvodnja je 2158 MWh godišnje.



Slika 10 Situacijski prikaz zahvata



Slika 11 Presjek kroz Strojarnicu mHe



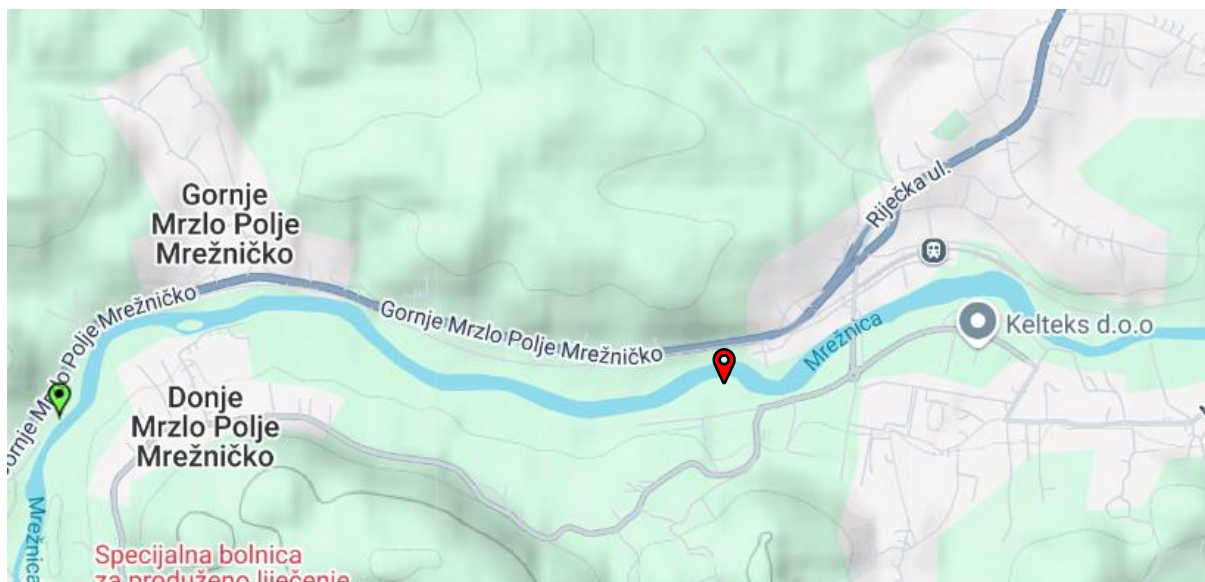
Slika 12 Presjek kroz prag mHe

2.3. Hidrološke podloge

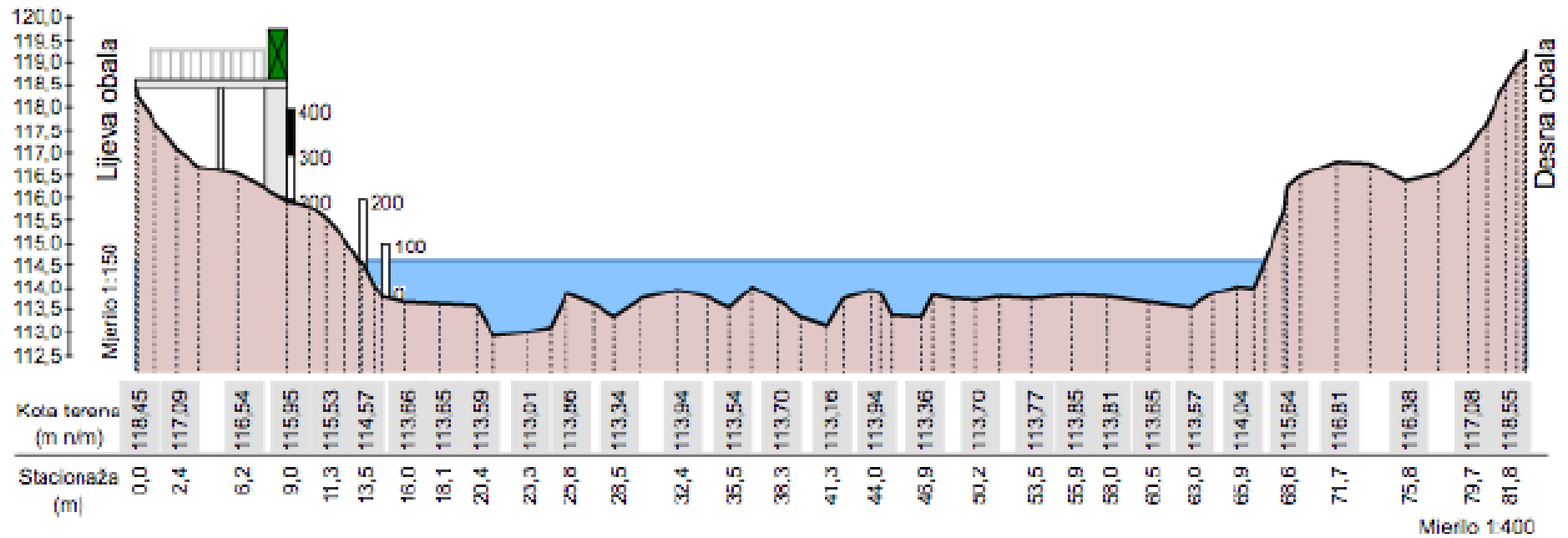
Vrlo važan aspekt u izradi ovog projekta bio je prikupljanje i analiza hidroloških podataka kako bi se bolje razumjele karakteristike rijeke Mrežnice i njezinih vodostaja. Nedaleko od lokacije izgradnje, otprilike deset kilometara uzvodno, nalazi se vodomjerna postaja Mrzlo Polje. Ova postaja ima ključnu ulogu u prikupljanju hidroloških podataka za ovu regiju.

Referentna mjerenja za nizvodne uvjete izvršena su na ušću rijeke Korane u rijeku Mrežnicu, što je od posebnog značaja za izgradnju Male Hidroelektrane. Podaci za ova mjerenja dobiveni su od Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) i obuhvaćaju razdoblje od 2000. do 2015. godine (Slika 21). Analizom ovih podataka izrađene su krivulje trajnosti i učestalosti protoka, koje su bitne za proračun gornjih i donjih voda unutar programskog paketa HEC-RAS. Također su izračunate karakteristične vrijednosti vodostaja s odgovarajućim povratnim periodima koristeći iste hidrološke podatke.

Vodomjerna postaja Mrzlo Polje (slika 13 i 14), koja pripada Crnomorskom slivu, koristi se za praćenje vodostaja rijeke Mrežnice od 1946. godine. Sliv ima značajnu topografsku površinu od 879.000 km², dok je kota nule vodostaja na toj postaji na visini od 113,97 metara nad morem (m.n.m.).



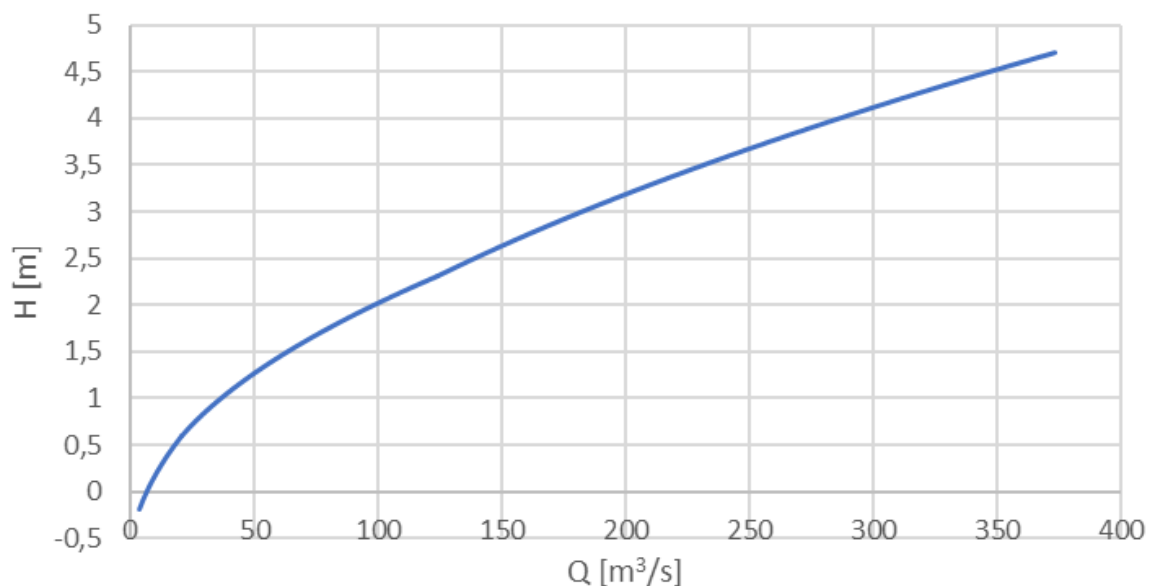
Slika 13 Pozicija Vodomjerne postaje (zeleno) i mHE (crveno). (DHMZ)



Slika 14 Poprečni presjek Vodomjerne postaje Mrzlo Polje

Jednadžba konsumpcijske krivulje za VP Mrzlo polje opisana je izrazima:

$$\begin{aligned}
 Q &= 9,43H^2 + 17,14H + 6,9 & -25 < H \leq 60 \\
 Q &= 16,319H^2 + 13,49H + 6,62 & 60 < H \leq 230 \\
 Q &= 11,5H^2 + 23,44H + 9,03 & 230 < H \leq 470
 \end{aligned}$$

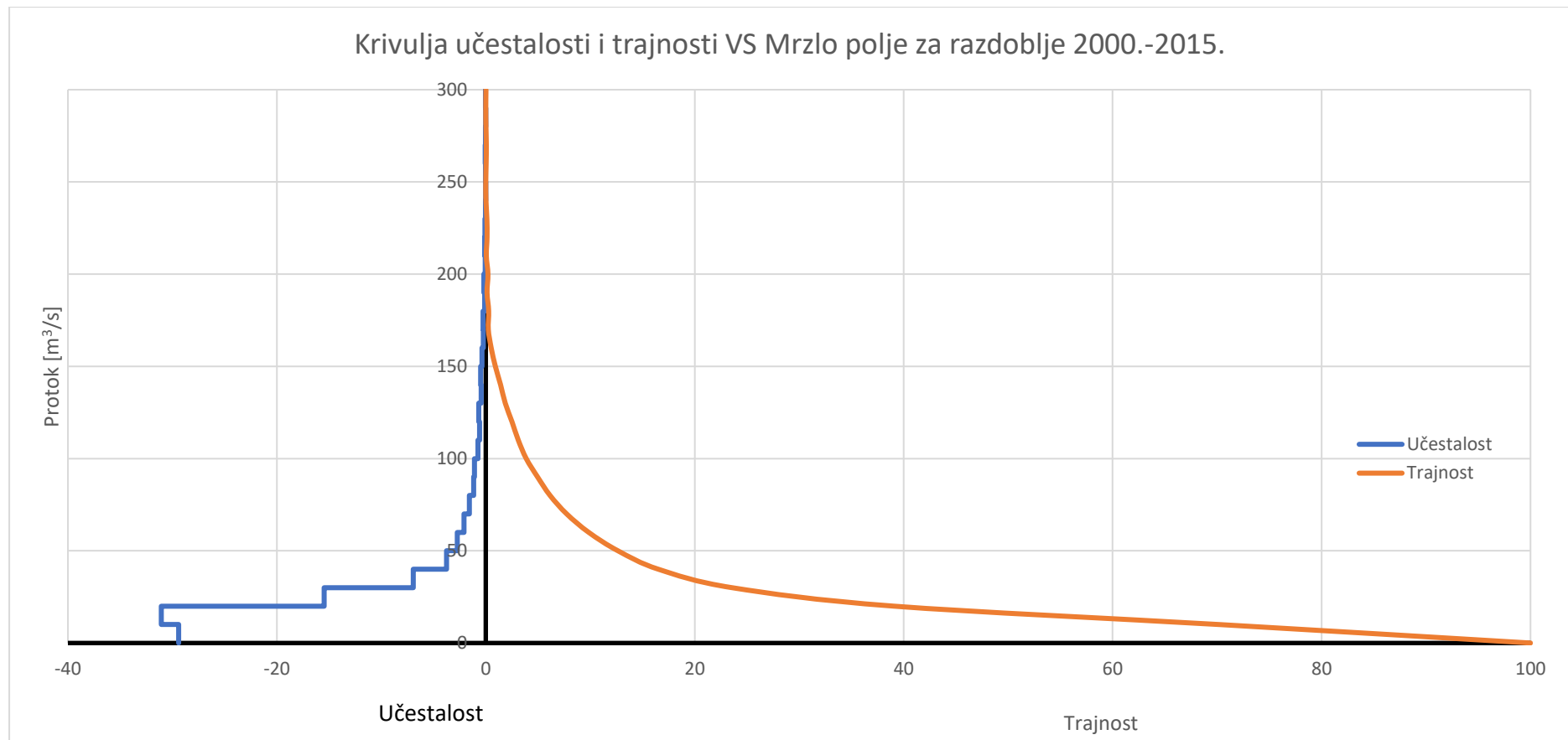


Slika 15 Konsumpcijska krivulja Mrežnice za Vodomjernu postaju Mrzlo polje u razdoblju 2000. do 2015. godine

Tablica 2 Karakteristični podaci za vodomjernu postaju Mrzlo Polje

Osnovna analiza Vodomjerne postaje Mrzlo Polje 2000. - 2015.		
Početak rada	1.9.1946	
Kota nule vodokaza	113,967 m.n.m.	
Minimalni vodostaj	113,717 m.n.m.	
Maksimalni vodostaj	118,667 m.n.m.	
Q_{max} [m^3/s]	306,00	16.10.2015
Q_{min} [m^3/s]	2,17	29.8.2007
Q_{sr} [m^3/s]	27,46	
Medijan [m^3/s]	16,00	
Mod [m^3/s]	11,80	
Broj dana	5844	

Izvršenom analizom raspoloživih hidroloških podataka izrađena je krivulja trajnosti i učestalosti protoka za vodomjernu postaju Mrzlo Polje. Ova krivulja pruža uvid u raspodjelu protoka tijekom vremena, omogućujući bolje razumijevanje hidroloških karakteristika i ponašanja vodotoka na toj lokaciji.

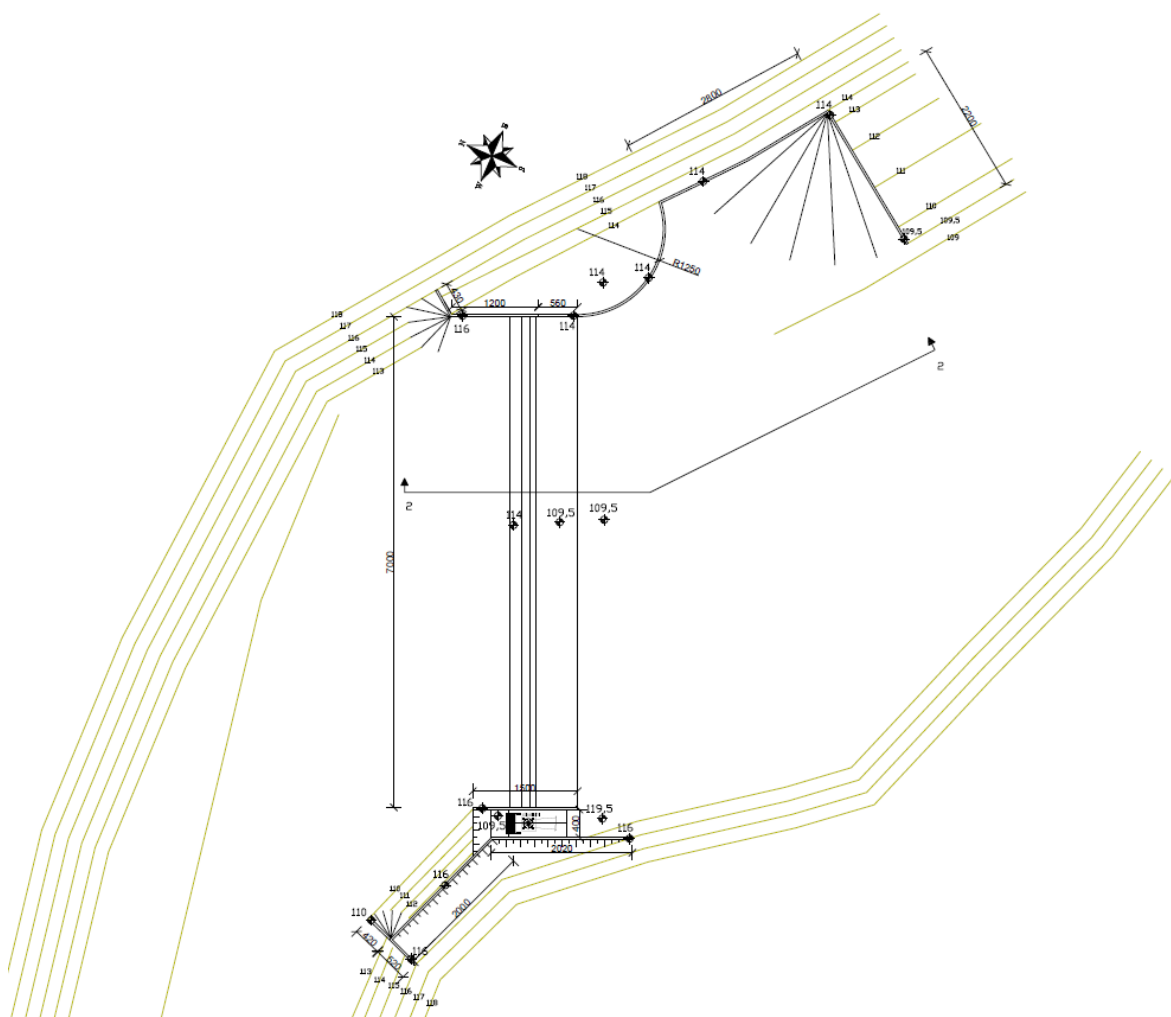


Slika 16 Krivulja učestalosti i trajnosti vodomjerne postaje Mrzlo Polje 2000.-2015. godine

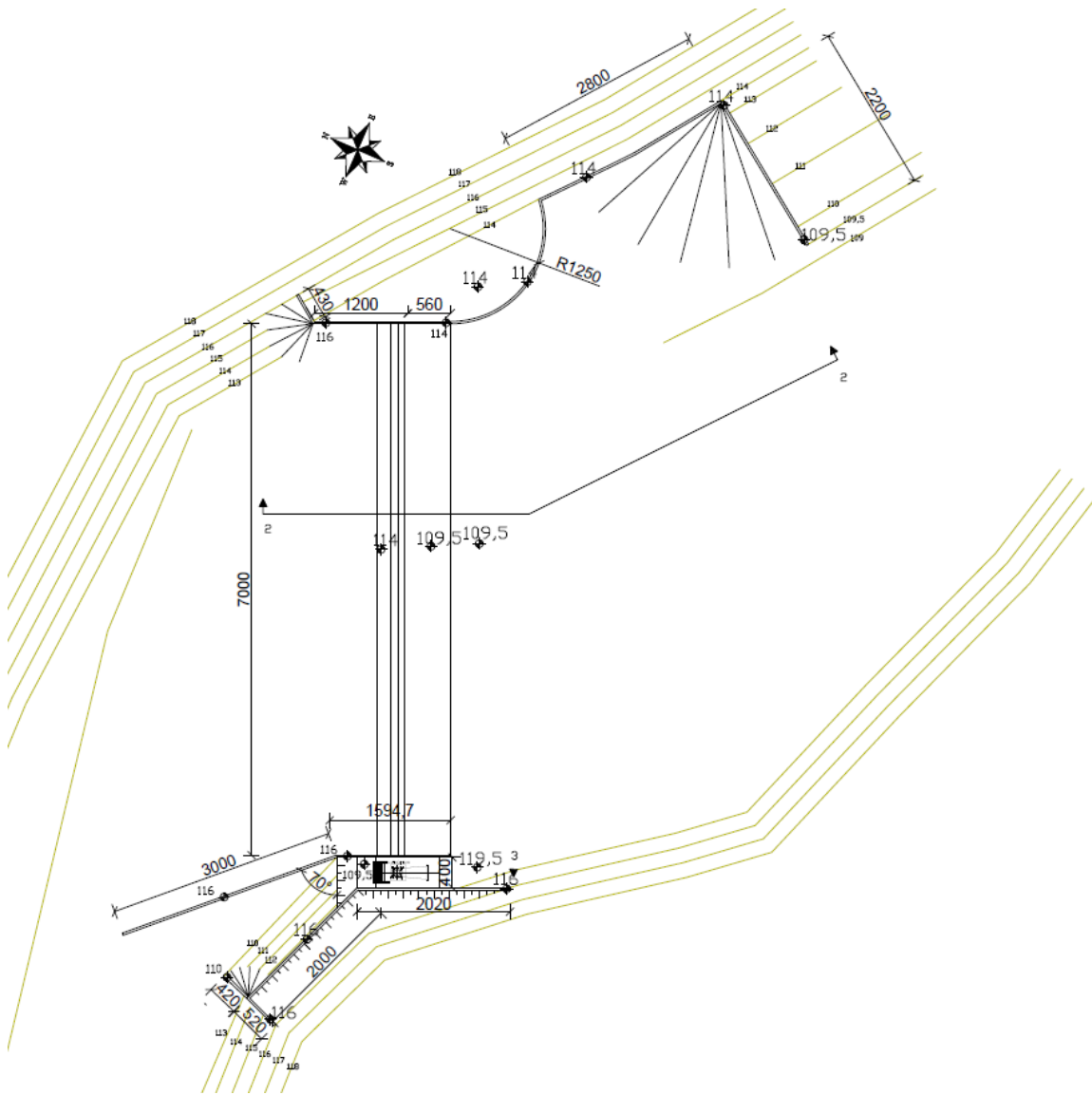
3. Cilj rada

Cilj ovog rada jest minimizacija gubitaka u dovodnom kanalu i postizanje ujednačenog strujnog polja u presjeku kanala neposredno ispred turbinskog trakta, analizom različitih tehničkih zahvata unutar samog kanala, dok se ulazna građevina ne mijenja. Posebna pažnja usmjerena je na brzine u koritu.

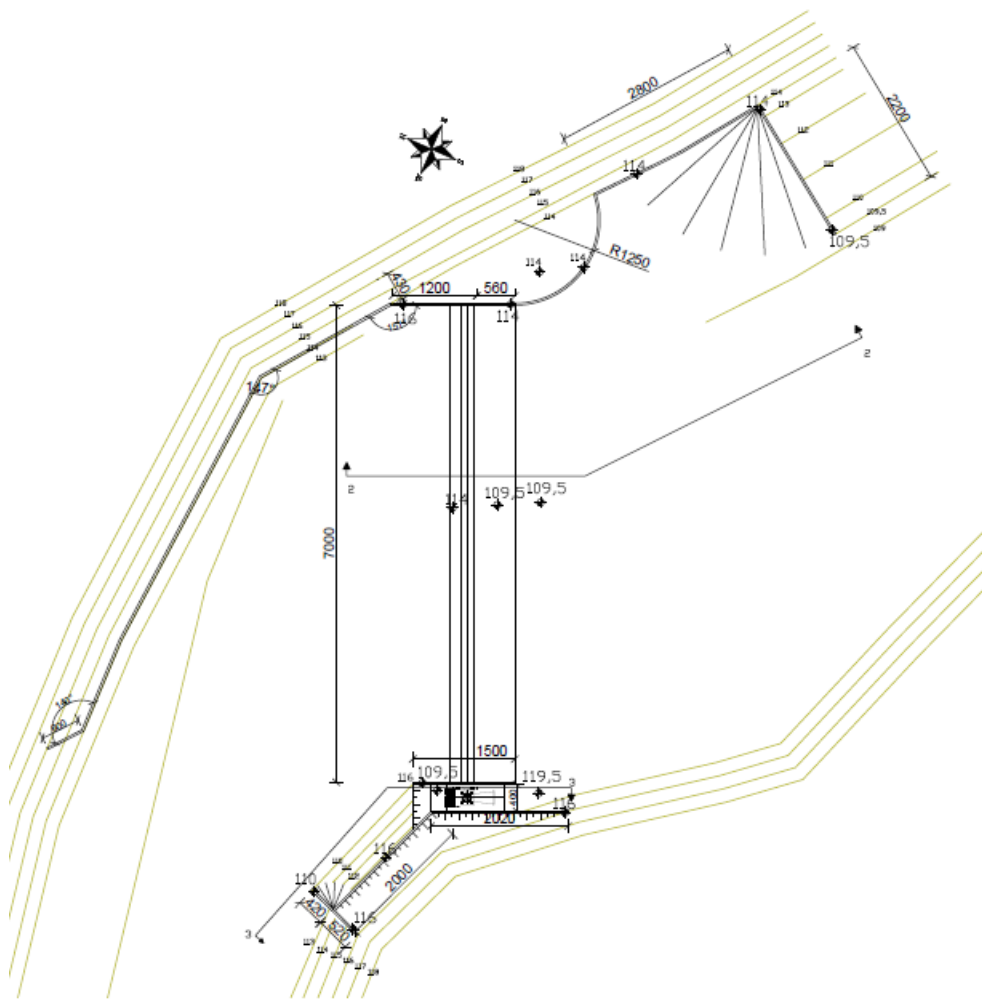
Ovaj rad analizira tri različite varijante: prva varijanta podrazumijeva pristup "ne činiti ništa", oslanjajući se na ranije projektno rješenje mHE, druga varijanta uključuje betonski zid uz lijevu stranu dovodnog kanala, koji služi kao usmjerivač toka, a treća varijanta predviđa betonski zid smješten uz lijevu stranu obale.



Slika 17 Tlocrt Varijante 1



Slika 18 Tlocrt varijante 2



Slika 19 Tlocrt varijante 3

4. Metodologija

U radu je prvo proveden hidraulički proračun vodnih lica za projektirano stanje u cilju definiranja gornje i donje vode korištenjem HEC-RAS-a. Na temelju dobivenih rezultata, izvršena je analiza strujanja unutar dovodnog kanala. Ova analiza obuhvaćala je simulaciju različitih varijanti hidrauličkih zahvata, uključujući usmjerivač toka i betonski zid, kako bi se usporedio njihov utjecaj na brzinu, odnosno na hidrauličke uvjete u kanalu. Cilj je bio odrediti optimalni oblik za smanjenje gubitaka i postizanje stabilnih uvjeta za rad strojarnice.

4.1. Hidraulički proračun

Numerički 2D model, izrađen u HEC-RAS-u, korišten je za provjeru hidrauličkih uvjeta toka u dovodnom toku neposredno prije turbine. HEC-RAS je napredan alat za simulaciju hidrauličkih procesa u otvorenim vodotocima i kanalima, koji omogućuje precizno modeliranje dinamike fluida u prostoru i vremenu. Temelji se na numeričkom rješavanju jednadžbi kretanja tekućine, uzimajući u obzir zadane rubne i početne uvjete.

Program koristi Saint-Venantove jednadžbe, koje predstavljaju pojednostavljene jednadžbe Navier-Stokesovog sustava. Ove jednadžbe uključuju kontinuitet (očuvanje mase) i očuvanje količine gibanja, što omogućava izračun promjene protoka, brzine i razine vode kroz vrijeme. Konkretno, HEC-RAS koristi 2D verziju ovih jednadžbi za analizu nestacionarnih uvjeta toka, gdje je protok vode promjenjiv tijekom vremena.[18]

Saint-Venantove jednadžbe sastoje se od:

- Jednadžbe kontinuiteta (očuvanje mase):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (hu) = 0$$

gdje je h visina vode, a u brzina strujanja u dvije dimenzije.

- Jednadžbe količine gibanja (očuvanje impulsa):

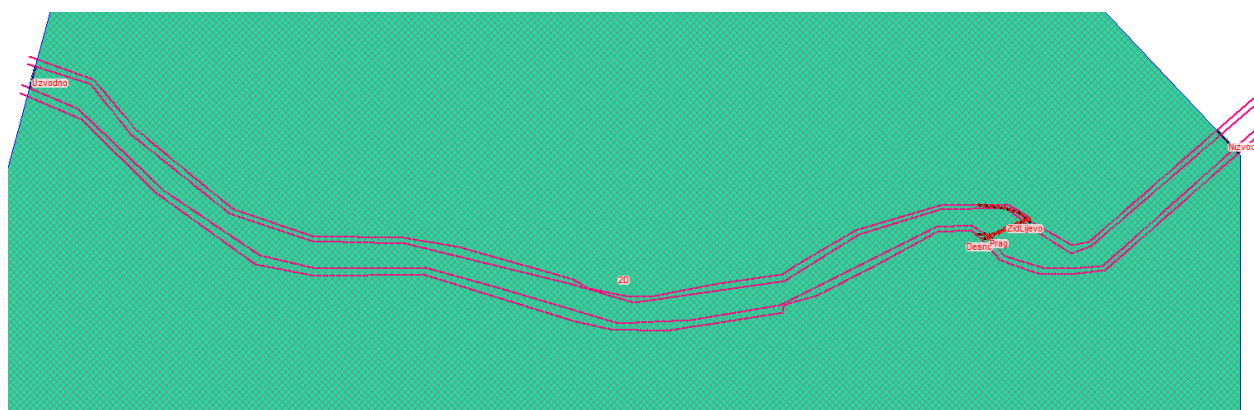
$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \nabla \cdot (huu) + gh\nabla h = -Sf$$

gdje je g gravitacijsko ubrzanje, a Sf sila trenja uzrokovana otporom dna kanala.

Numeričke metode, poput metode konačnih razlika ili volumena, koriste se za rješavanje ovih jednažbi, čime se omogućava detaljna analiza toka, raspodjele brzina i promjene vodostaja u modeliranom području. HEC-RAS također može uzeti u obzir složene geometrijske konfiguracije terena, otpor dna, te hidrauličke strukture poput ustava, mostova i turbina.

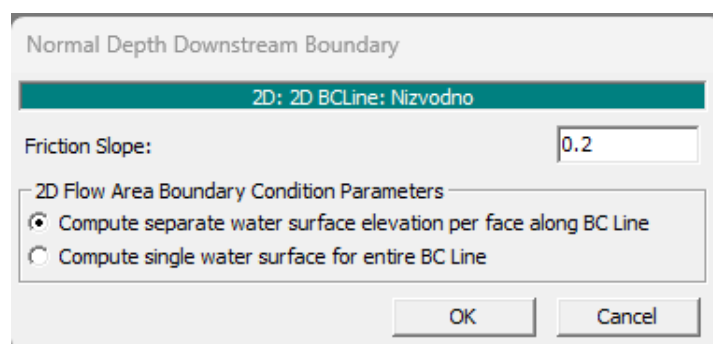
Prednost HEC-RAS-a nad fizičkim modelima je njegova brzina i ekonomičnost, jer omogućava simulaciju različitih scenarija bez potrebe za složenim i skupim laboratorijskim eksperimentima. Korištenjem numeričkih modela moguće je precizno predvidjeti ključne hidrauličke parametre, uključujući brzinu i tlak, što je presudno za inženjerske projekte u području hidroenergije.[18]

U ovoj studiji, HEC-RAS 2D model korišten je za analizu toka rijeke Mrežnice, od vodomjerne postaje Mrzlo Polje do ušća rijeke u Koranu. Geodetski prikupljeni podaci o poprečnim presjecima rijeke poslužili su za izradu modela. Simulacije su provedene za nestacionarne uvjete tečenja, pri čemu se uzimaju u obzir promjene u protoku tijekom vremena.

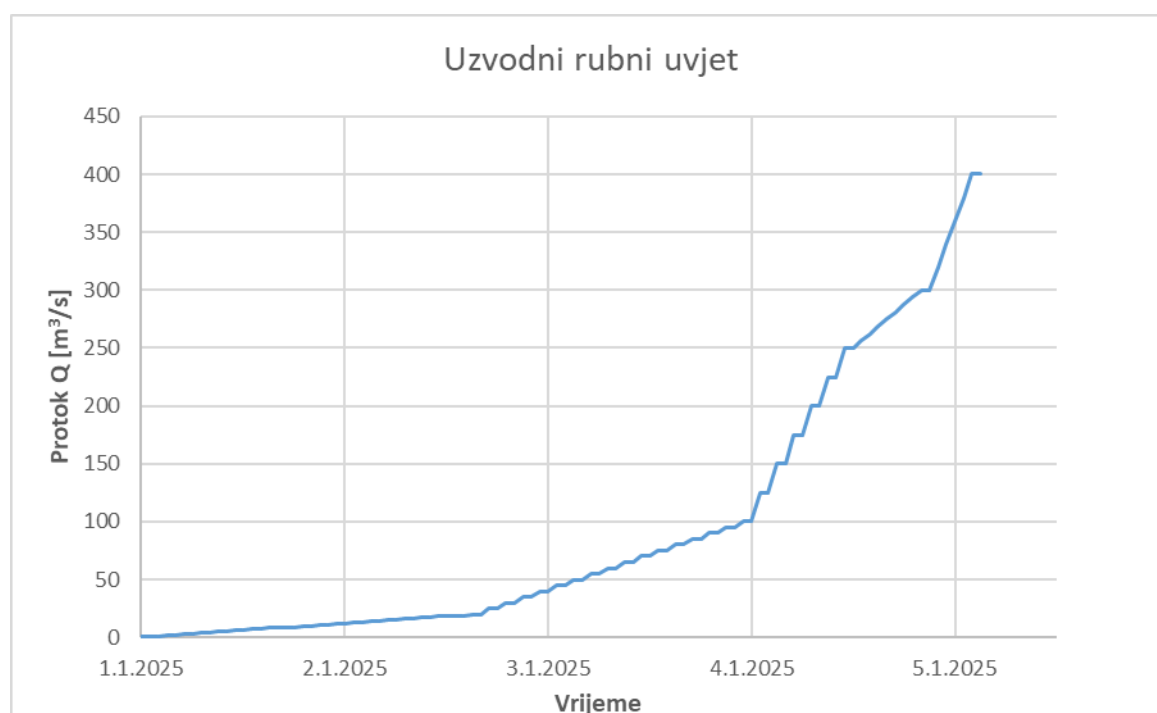


Slika 20 Model Vodotoka u HEC-RAS -u

Za nizvodni rubni uvjet korišten je energetski gradijent od 0,2 m/m, dok su uzvodni uvjeti definirani hidrogramom ulaznog protoka u rasponu od 1 do 400 m³/s. Za niže protoke (<20 m³/s), postignuta je stacionarnost sustava unutar 2 sata simulacije. Simulacije su uključivale analizu protoka i vodostaja na ključnim točkama, pri čemu je razlika između gornje i donje vode definirala bruto pad u analiziranom dijelu rijeke.



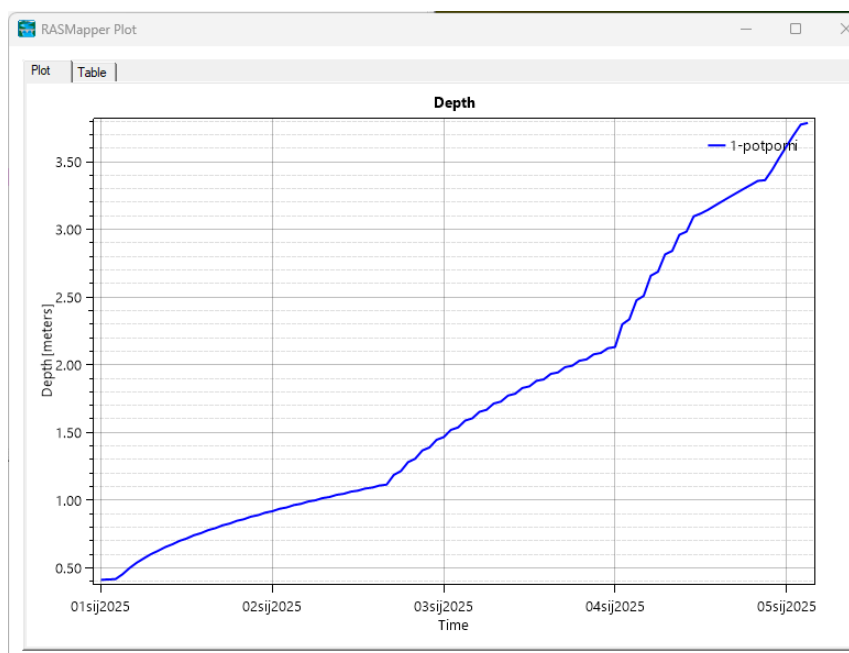
Slika 21 prikaz nizvodnog rubnog uvjeta



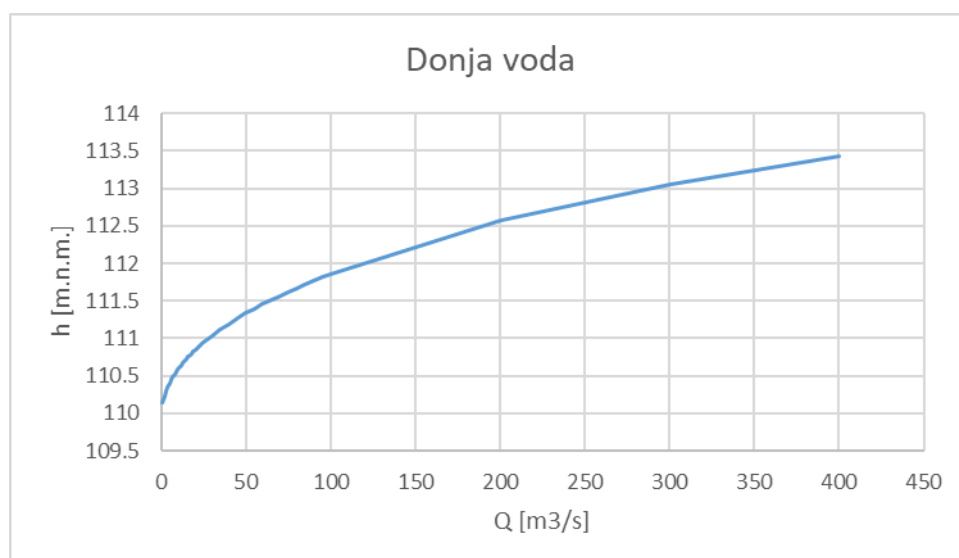
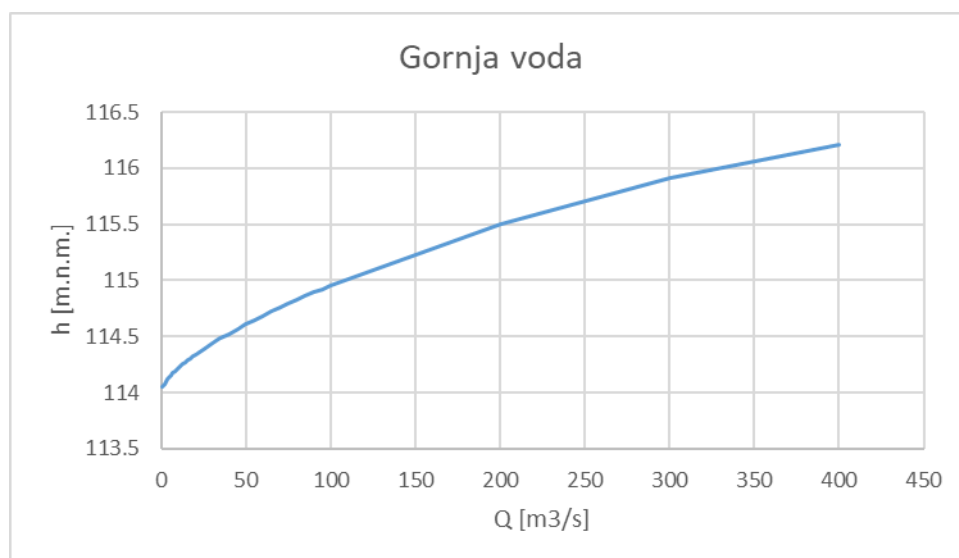
Slika 22 Prikaz Q-H Krivulje nizvodnog rubnog uvjeta

Rezultati hidrauličkog proračuna ukazuju na ključne karakteristike protoka, a konsumpcijski odnosi između protoka (Q) i vodostaja (H) su definirani na dvije ključne točke: donjoj vodi (DV), nizvodno od izlaza turbinskog trakta, te gornjoj vodi (GV), uzvodno od zahvatne građevine. Ovi odnosi omogućuju predviđanje vodostaja za različite protoke, što je od ključne važnosti za izračun proizvodnje električne energije.

Analiza pokazuje da je razina gornje vode stabilna pri protocima manjim od instaliranog kapaciteta turbine ($20 \text{ m}^3/\text{s}$). Pri višim protocima, dolazi do aktivacije praga i povećanja razine donje vode, što utječe na ukupnu dinamiku sustava.



Slika 23 Prikaz krivulje hidrografa



4.2. Određivanje polja brzina

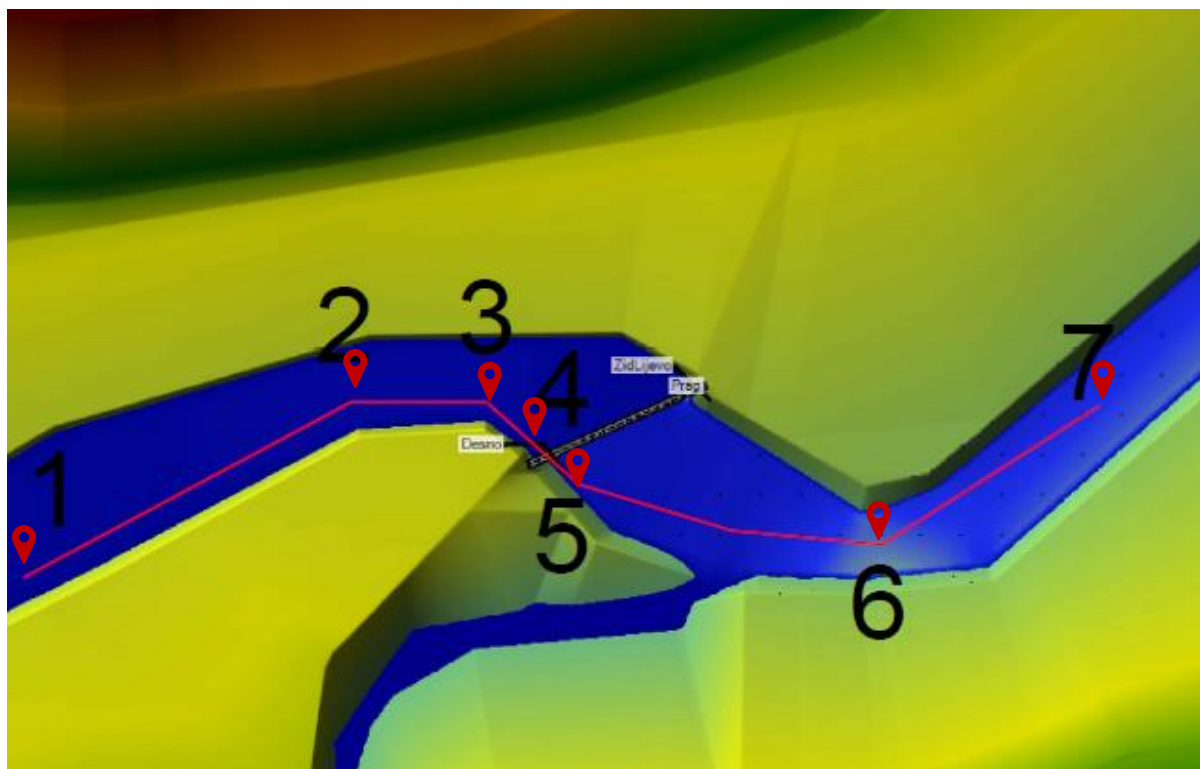
Polje brzina u 2D modelu HEC-RAS predstavlja raspodjelu brzina tekućine kroz prostor. U ovom modelu, brzine se procjenjuju u dvjema dimenzijama (X i Y) unutar svakog čvora mreže (mesh cell). Rezultati se obično prikazuju u obliku vektorskih polja, gdje svaka točka u mreži ima pridruženi vektor koji pokazuje smjer i intenzitet brzine.[18]

Za određivanje polja brzina, prvo je potrebno definirati geometriju modeliranog područja. Ovo uključuje kreiranje 2D mreže (mesh) koja razdvaja područje na male ćelije. Mreža može biti kvadratna, pravokutna ili trokutasta, ovisno o složenosti terena i potrebama analize. Nakon što su svi uvjeti definirani i numeričke jednačbe riješene, HEC-RAS generira polje brzina koje se može analizirati u različitim vremenskim koracima.

Rezultati polja brzina mogu se prikazati vizualno na karti, što omogućuje inženjerima i analitičarima da vide raspodjelu brzina i analiziraju kritična područja s visokim brzinama ili turbulentnim uvjetima. U radu je prikazano topografski, što uključuje generiranje karata brzina koje prikazuju različite zone s različitim intenzitetima brzine, obično pomoću boja ili kontura.

Analizom polja brzina moguće je identificirati područja s visokim brzinama koje mogu uzrokovati eroziju ili oštećenja, procijeniti učinak na strukture poput mostova ili brana, analizirati utjecaj različitih scenarija protoka na brzinu i dinamiku vode.

U radu su brzine određene i uspoređene na točkama od 1 do 7



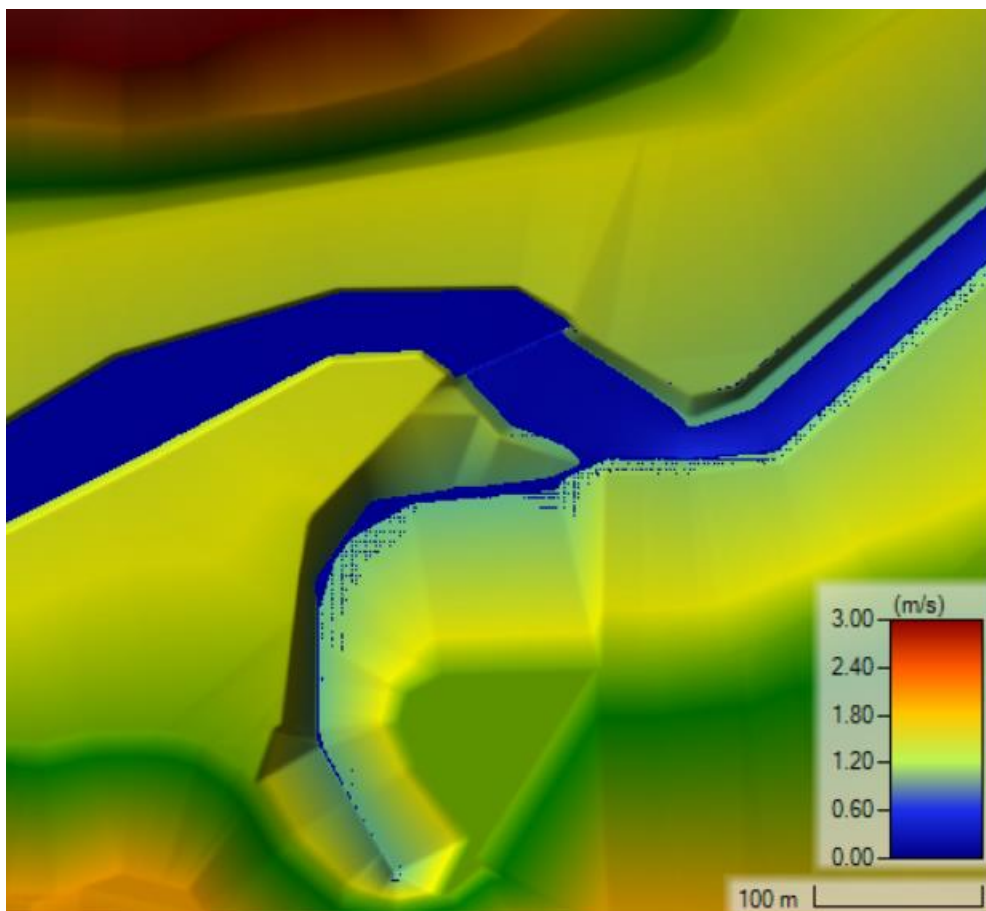
Slika 24 Prikaz pozicija analiziranih brzina

5. Rezultati i diskusija

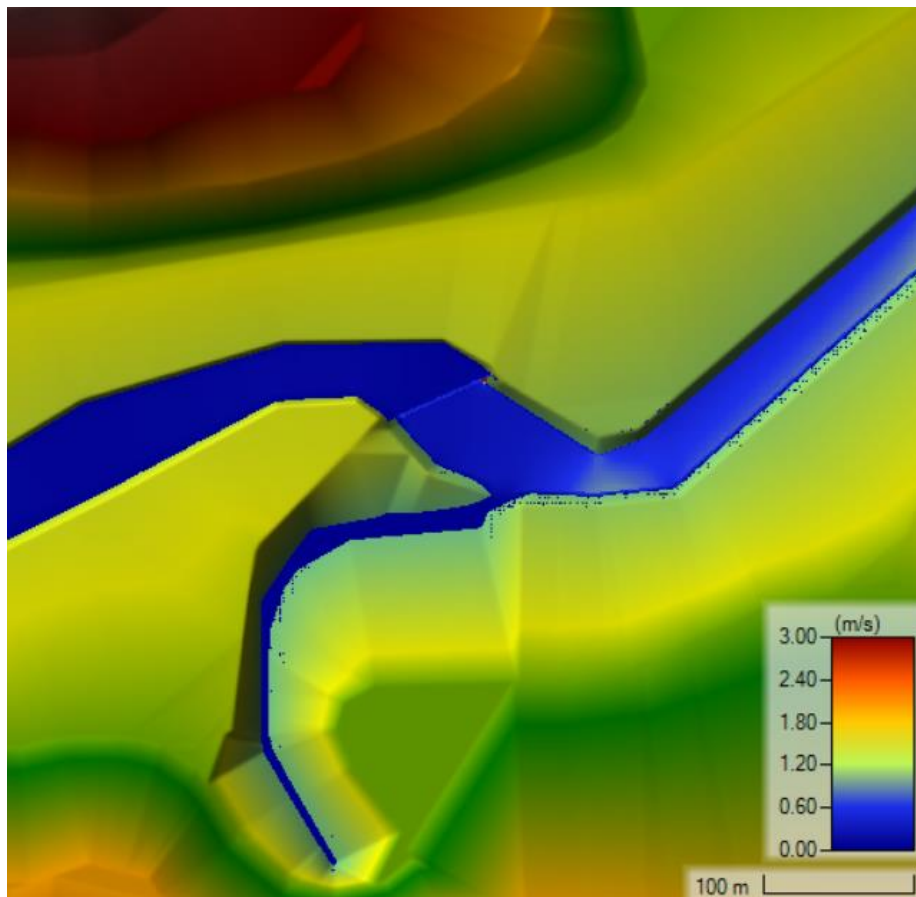
5.1. Varijanta 1

Osnovna varijanta, odnosno Varijanta 1, uključuje ranije projektno rješenje, tj. popravljivi prag izgrađen na visinu od 114 metara nad morem, što predstavlja temeljnu konfiguraciju bez izmjena u dovodnom kanalu. Varijanta 1 služi uglavnom za primijetiti nedostatke i mogućnosti poboljšanja. Prikazani su rezultati za:

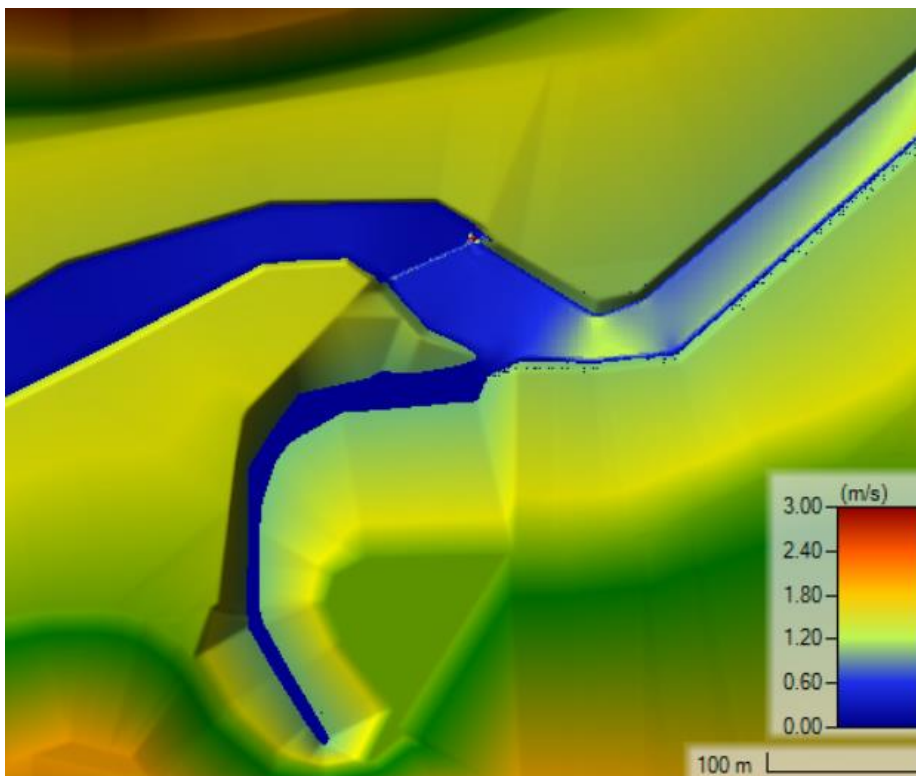
a) $Q=3\text{m}^3/\text{s}$ b) $Q=20\text{m}^3/\text{s}$ c) $Q=50\text{m}^3/\text{s}$ d) $Q=100\text{m}^3/\text{s}$ e) $Q=200\text{m}^3/\text{s}$



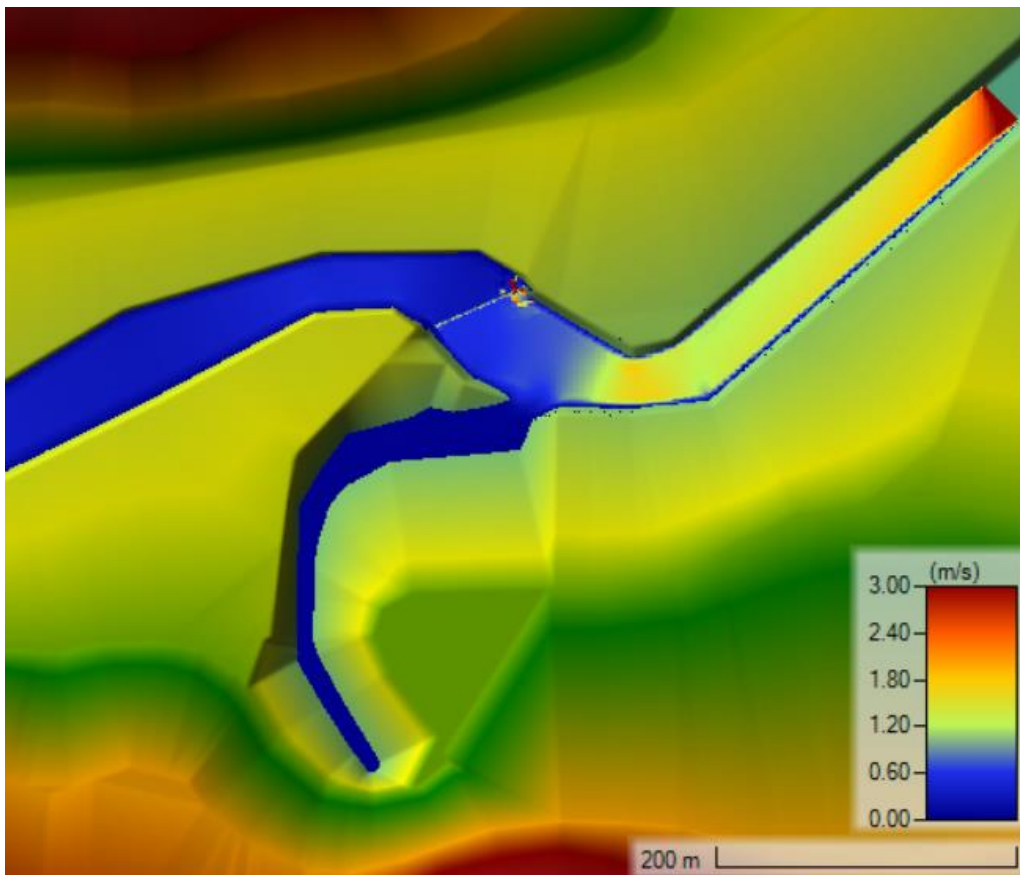
Slika 25 a) Brzine tečenja za $Q=3\text{m}^3/\text{s}$



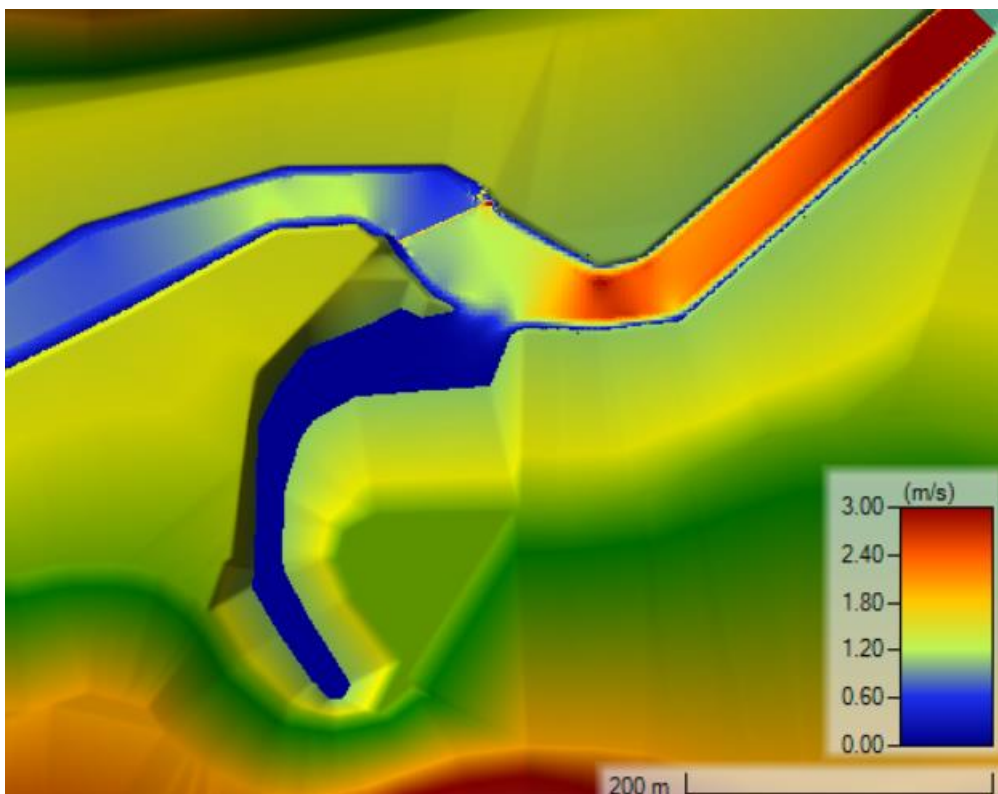
Slika 26b) Brzine tečenja za $Q=20\text{m}^3/\text{s}$ varijanta 1



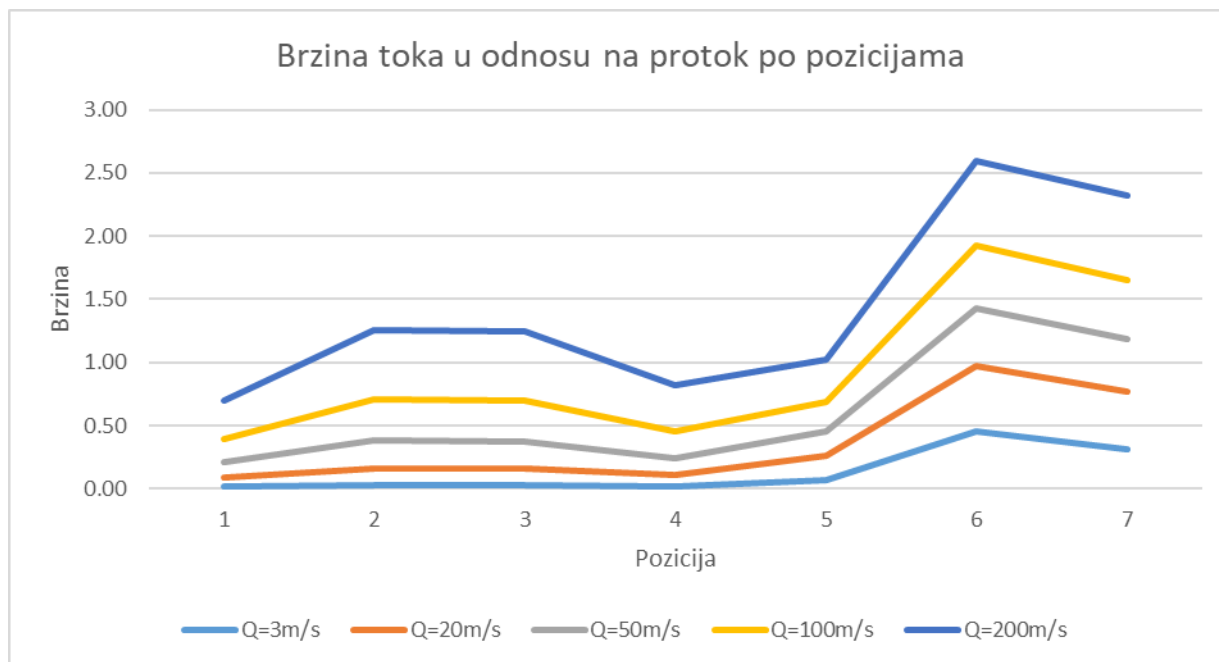
Slika 27 c) Brzine tečenja za $Q=50\text{m}^3/\text{s}$ varijanta 1



Slika 28d) Brzine tečenja za $Q=100\text{m}^3/\text{s}$



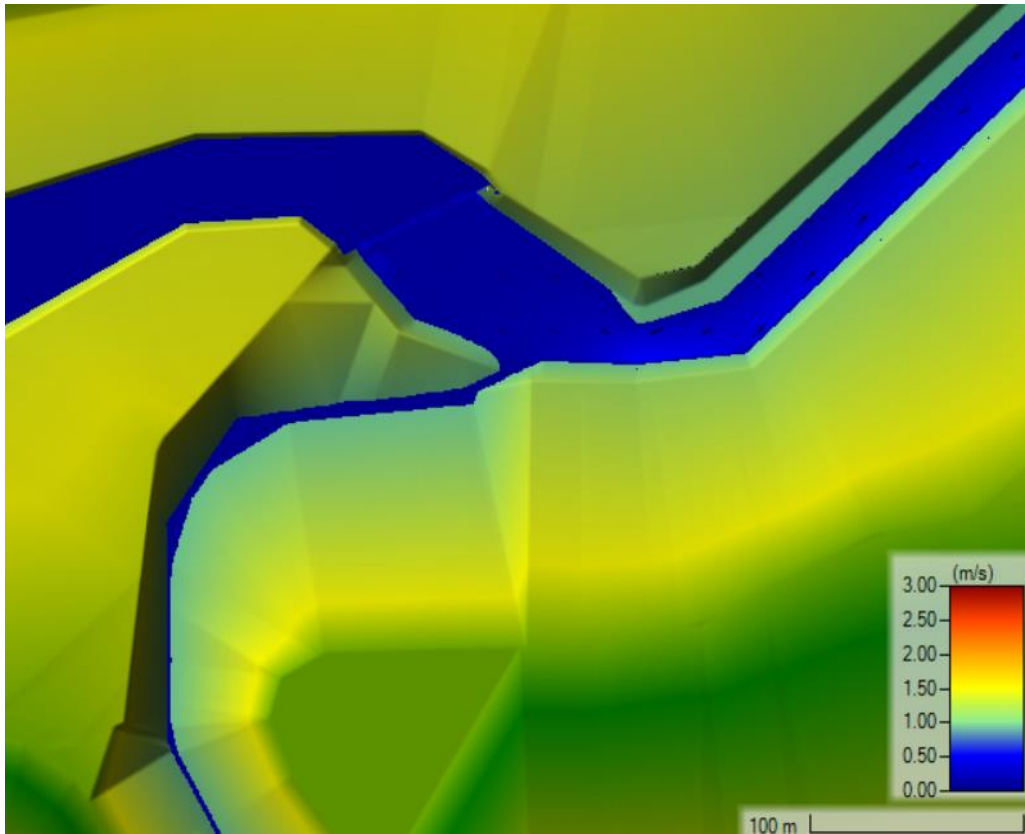
Slika 29 e) Brzine tečenja za $Q=200\text{m}^3/\text{s}$



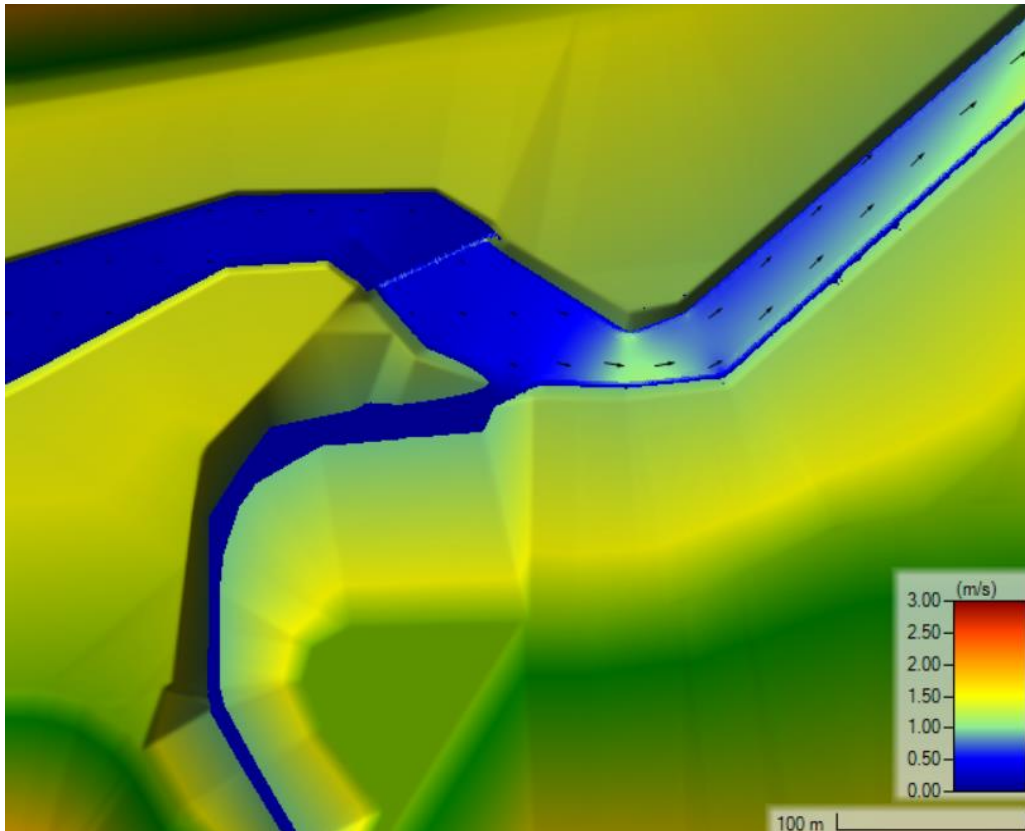
Slika 30 usporedba brzine tečenja u odnosi na protok po pozicijama za varijantu 1

5.2. Varijanta 2

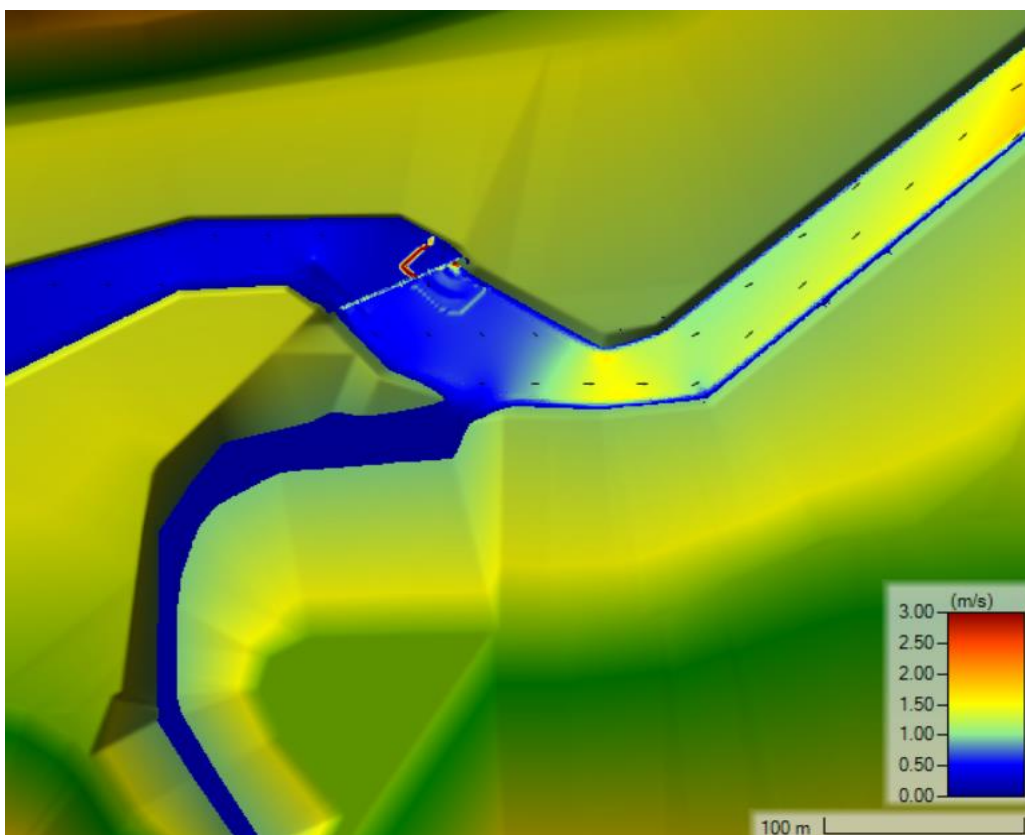
Varijanta 2 obuhvaća implementaciju usmjerivača toka u obliku masivnog betonskog zida duljine 30 metara, postavljenog duž lijeve strane strojarnice. Usmjerivač je postavljen okomito na prag, pridonoseći hidrauličkom oblikovanju ulazne građevine.



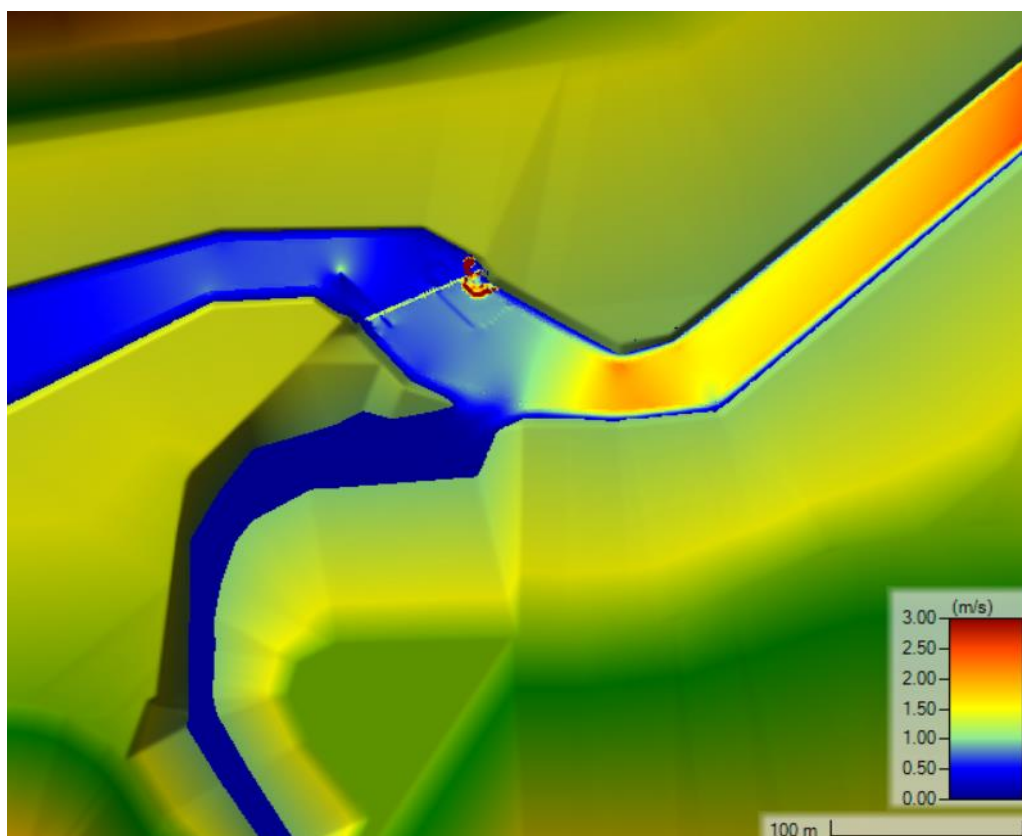
Slika 31 a) Brzine tečenja za $Q=3\text{m}^3/\text{s}$ varijanta 2



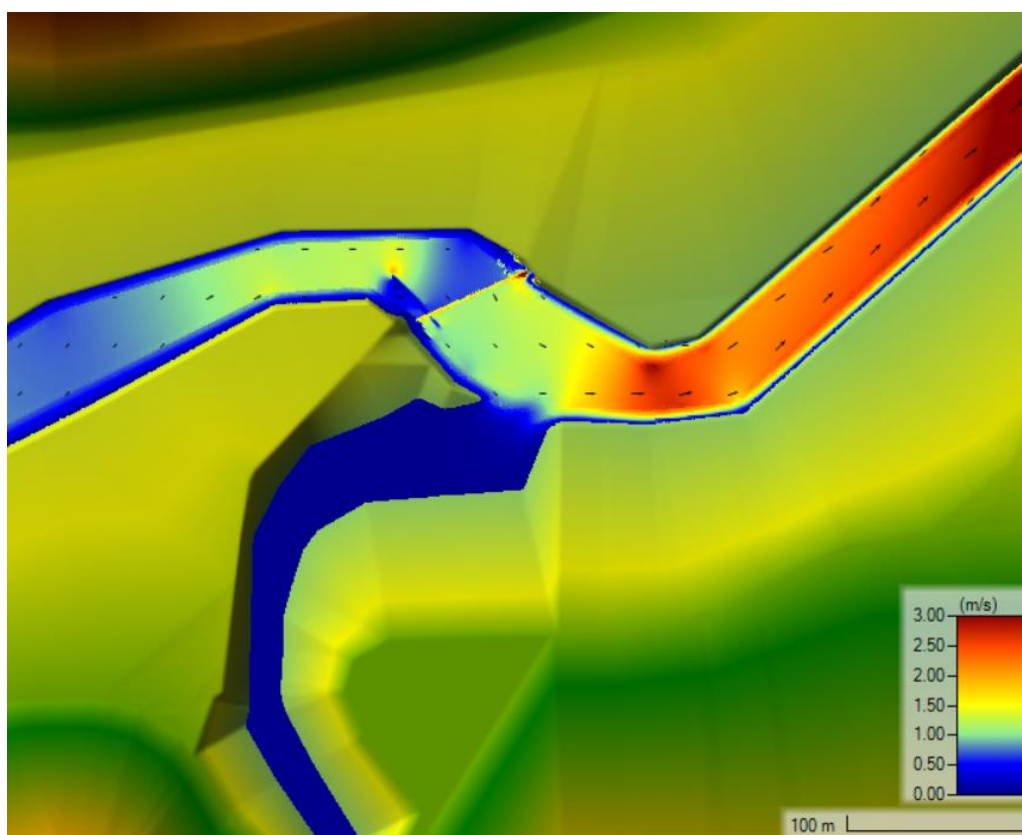
Slika 32b) Brzine tečenja za $Q=20\text{m}^3/\text{s}$ varijanta 2



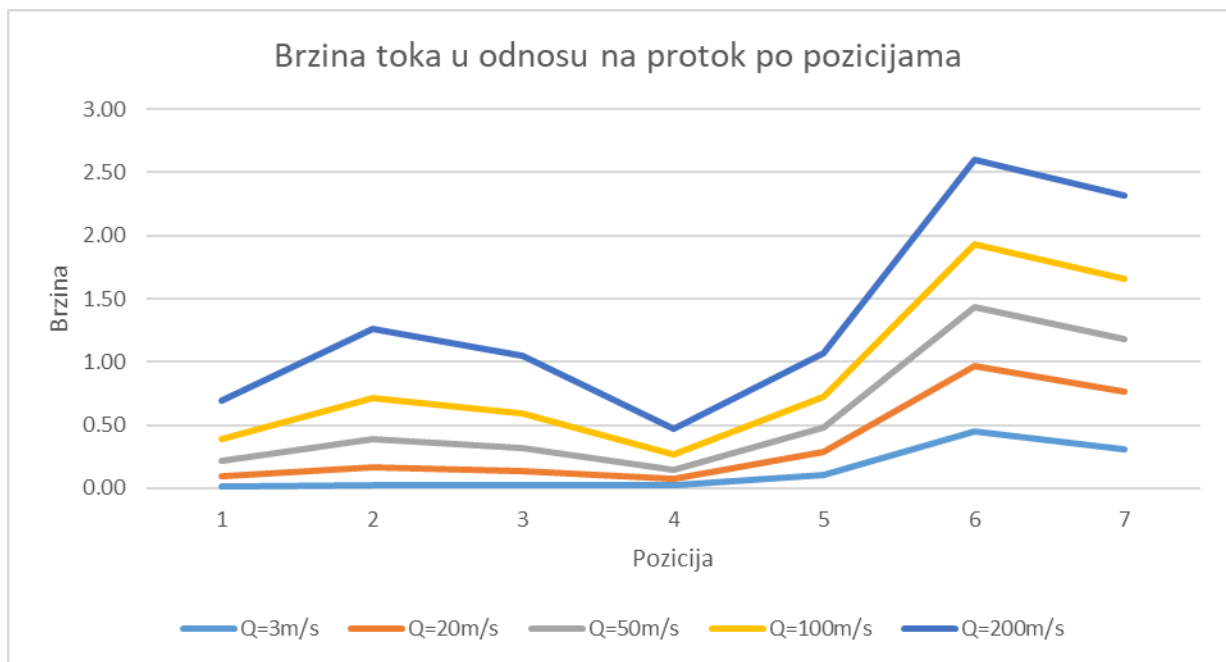
Slika 33c) Brzine tečenja za $Q=50\text{m}^3/\text{s}$ varijanta 2



Slika 34d) Brzine tečenja za $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ Varijante 2



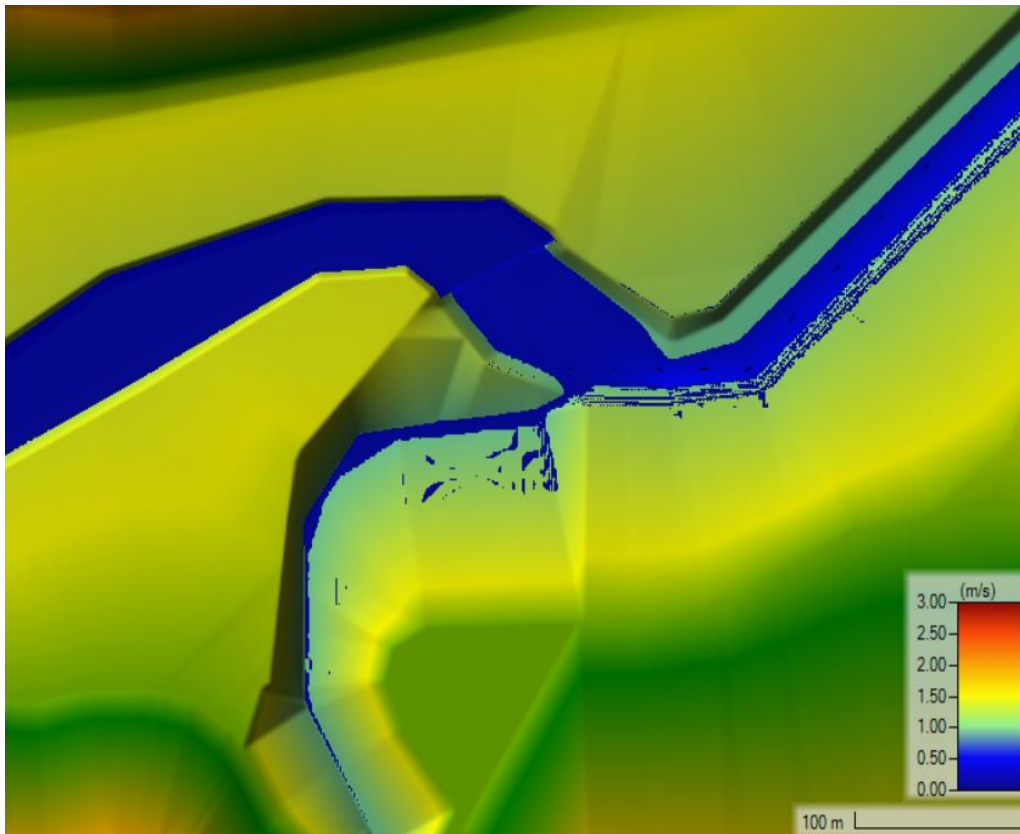
Slika 35e) Brzine tečenja za $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$ Varijante 2



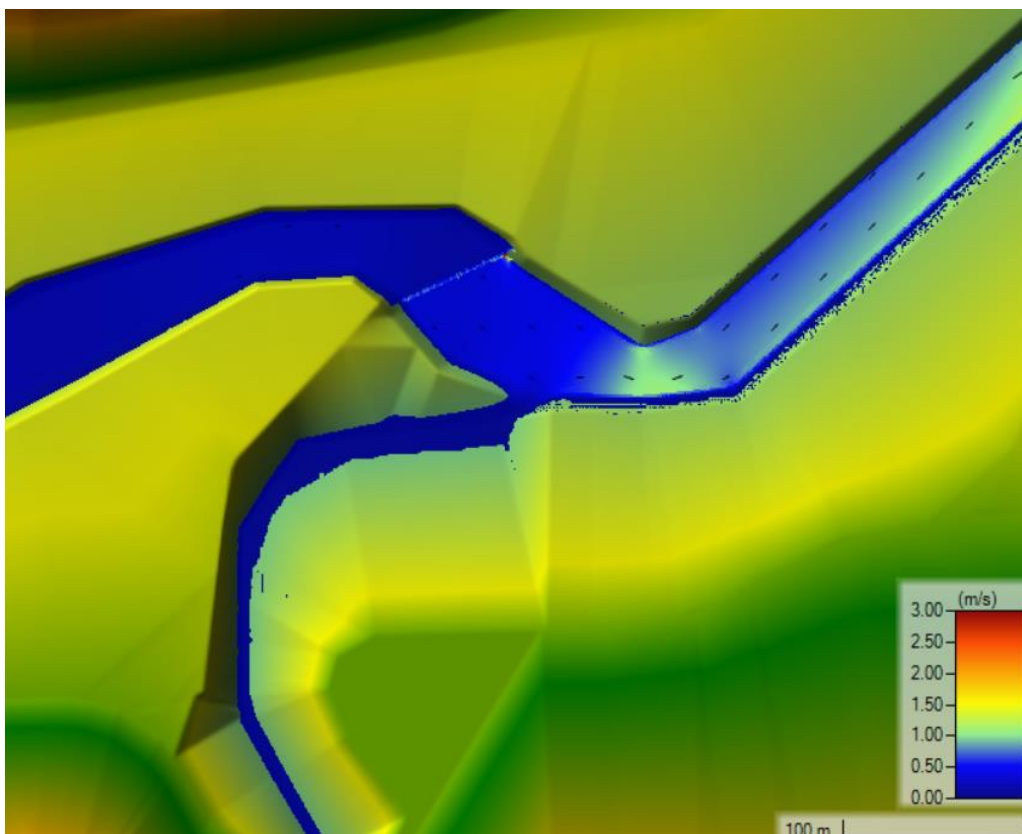
Slika 36 usporedba brzine tečenja u odnosi na protok po pozicijama za varijantu 2

5.3. Varijanta 3

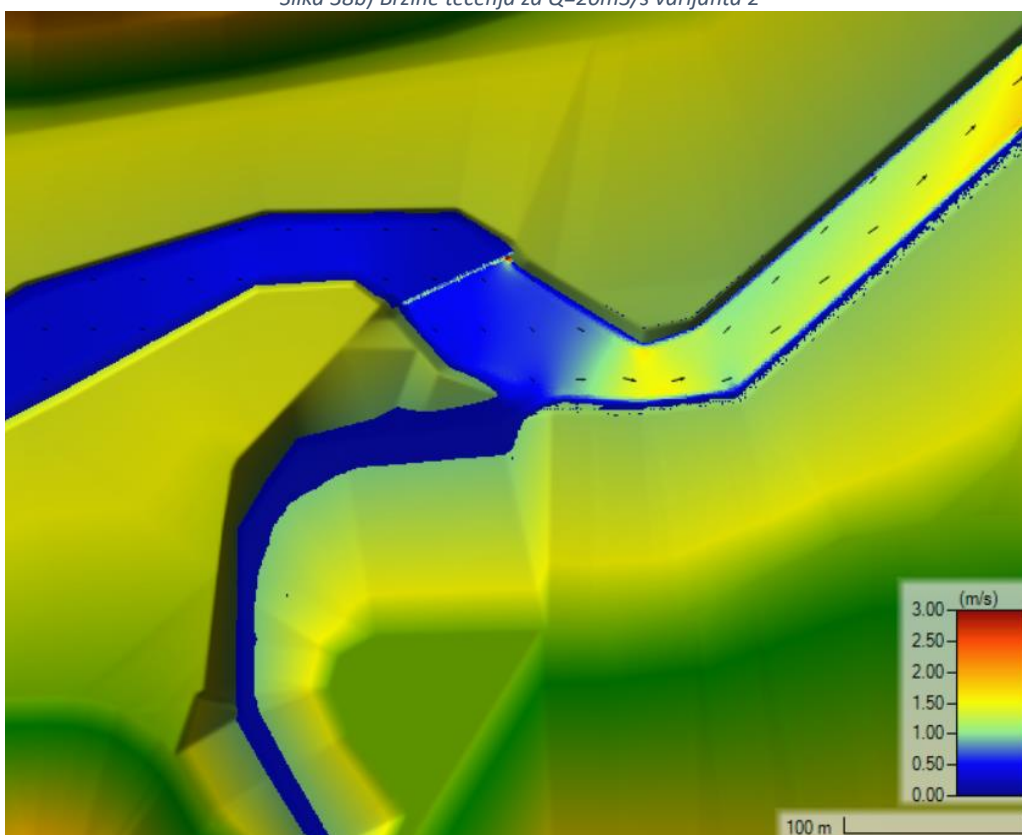
Varijanta 3 obuhvaća postavljanje masivnog betonskog zida dužine 80 metara duž lijeve obale korita, što predstavlja značajan projektni element s hidrauličkim učincima na sustav.



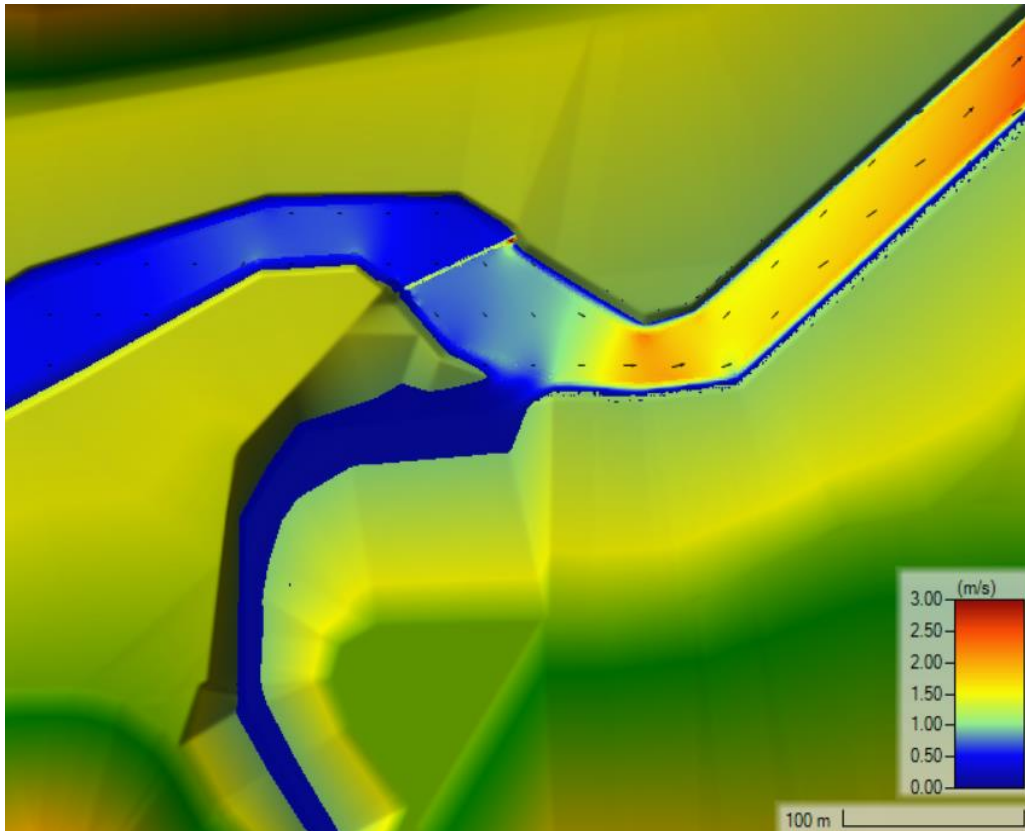
Slika 37 a) Brzine tečenja za $Q=3\text{m}^3/\text{s}$ varijanta 3



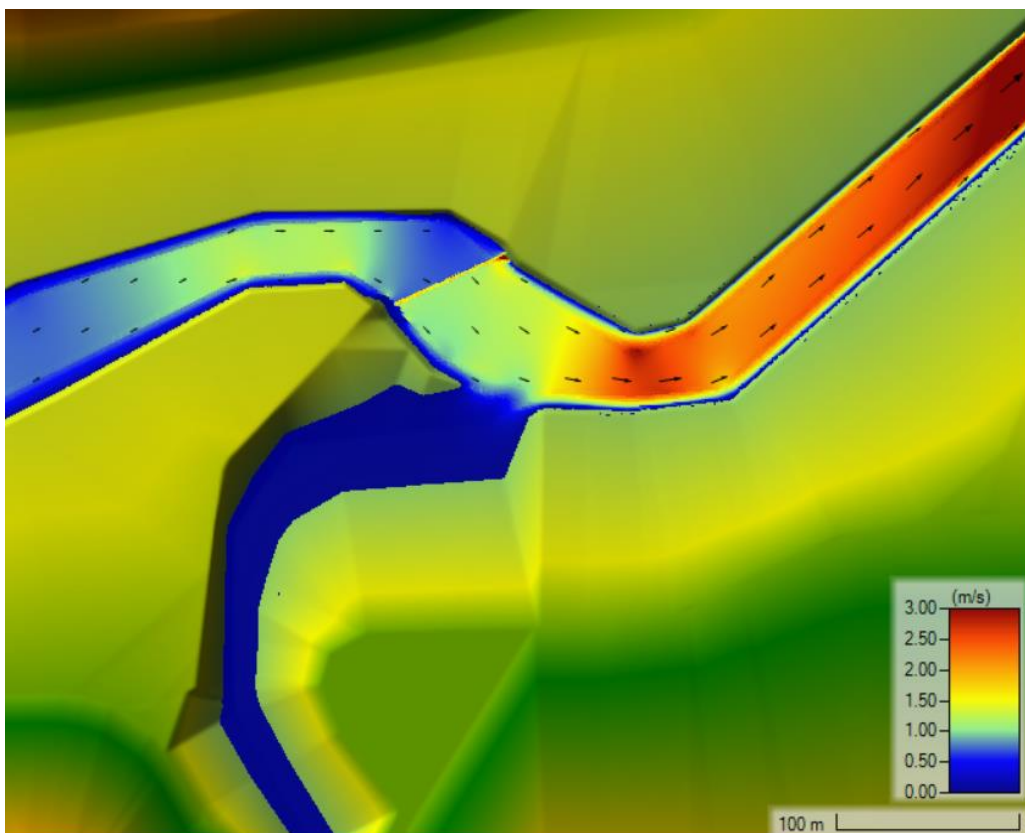
Slika 38b) Brzine tečenja za $Q=20\text{m}^3/\text{s}$ varijanta 2



Slika 39 c) Brzine tečenja za $Q=50\text{m}^3/\text{s}$ Varijante 3



Slika 40 d) Brzine tečenja za $Q=100\text{m}^3/\text{s}$ varijante 2



Slika 41 e) Brzine tečenja za $Q=200\text{m}^3/\text{s}$ varijante 2

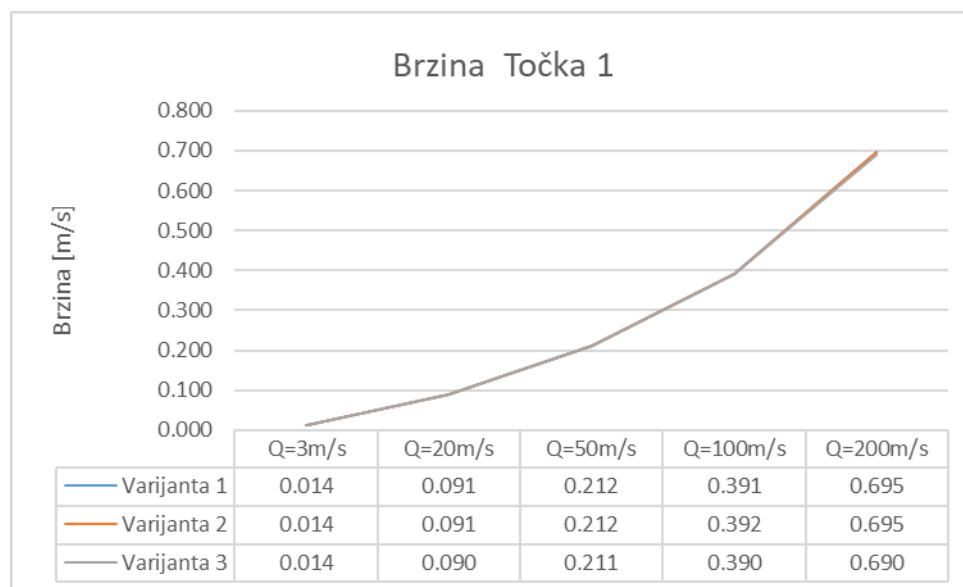
5.4. Usporedba rezultata

Usporedbom rezultata brzine kretanja vode na ranije zadanim točkama (točke 3, 4 i 5), primjećuje se da za isti protok i razinu gornje i donje vode dolazi do smanjenja brzine u dijelu ulaza u strojarnicu. U drugoj varijanti modela, gdje je primijenjen usmjerivač toka, brzina protoka na ulazu u strojarnicu smanjena je za 30%. Ovaj rezultat ukazuje na značajan utjecaj usmjerivača na dinamiku vode, te omogućava donošenje nekoliko ključnih zaključaka.

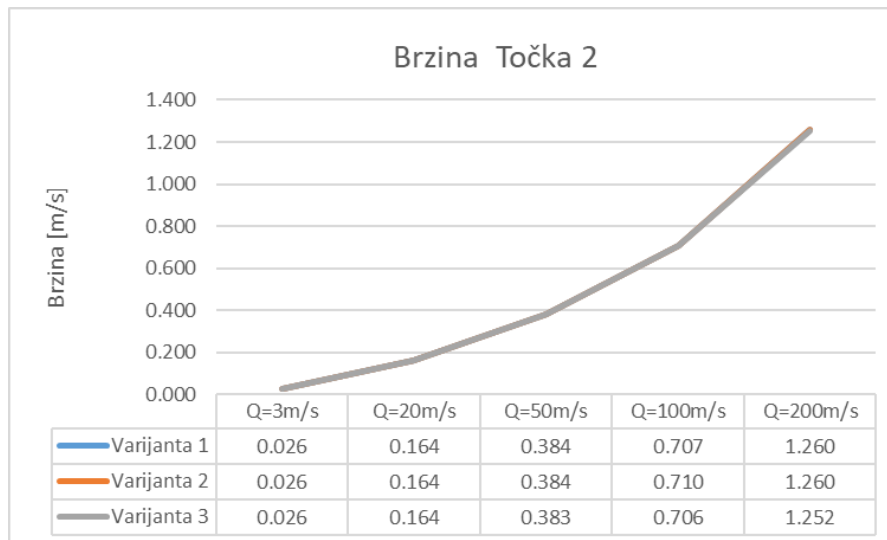
Usmjerivač toka učinkovito usporava protok vode prema strojarnici. Ovaj rezultat sugerira da usmjerivač radi prema planu, kontrolirajući brzinu i smanjujući turbulenciju na ulazu, što može doprinijeti stabilnijem radu sustava.

Smanjenje brzine protoka ima pozitivne učinke na rad turbine. Prevelika brzina može uzrokovati preopterećenje sustava i stvaranje turbulentnih uvjeta koji negativno utječu na učinkovitost turbine. Usporeni protok može poboljšati stabilnost toka, što omogućuje bolje upravljanje unutar strojarnice i dugoročno smanjenje rizika od mehaničkih oštećenja.

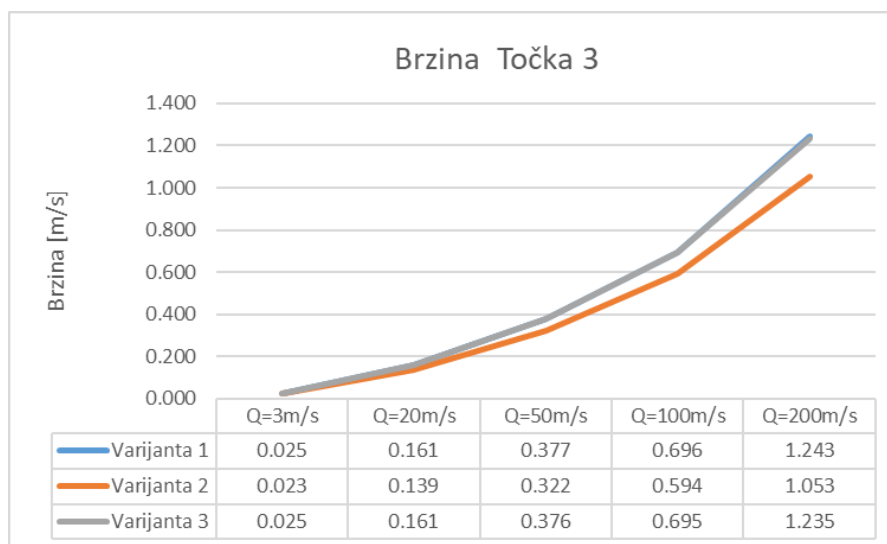
Varijanta 3 ima učinak smanjenja brzine u tom dijelu obale što doprinosi smanjenju erozije i zaštiti od poplava, ali ne djeluje značajno na dinamiku ulaza vode u strojarnicu.



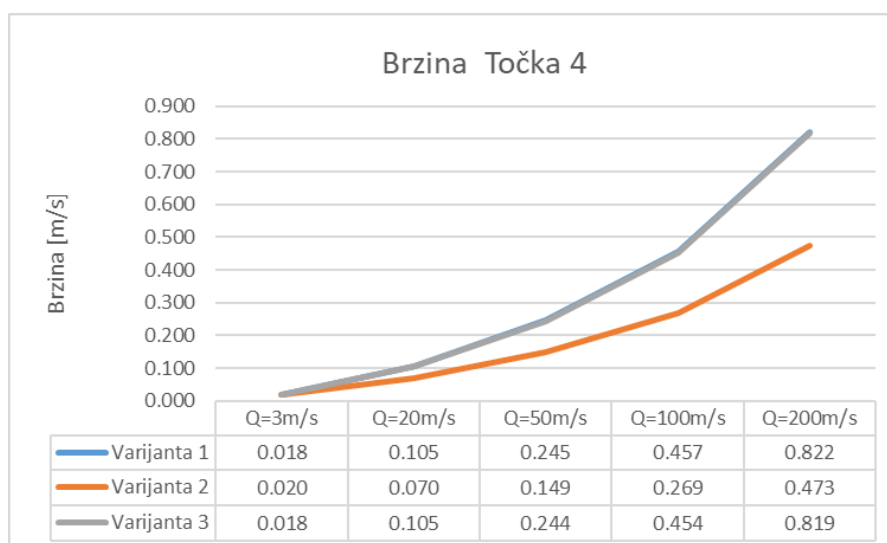
Slika 42 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 1



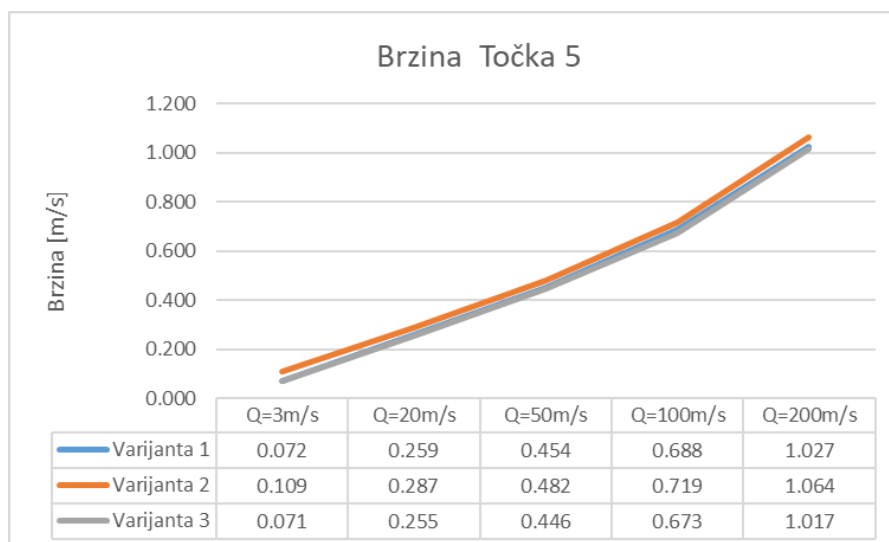
Slika 43 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 2



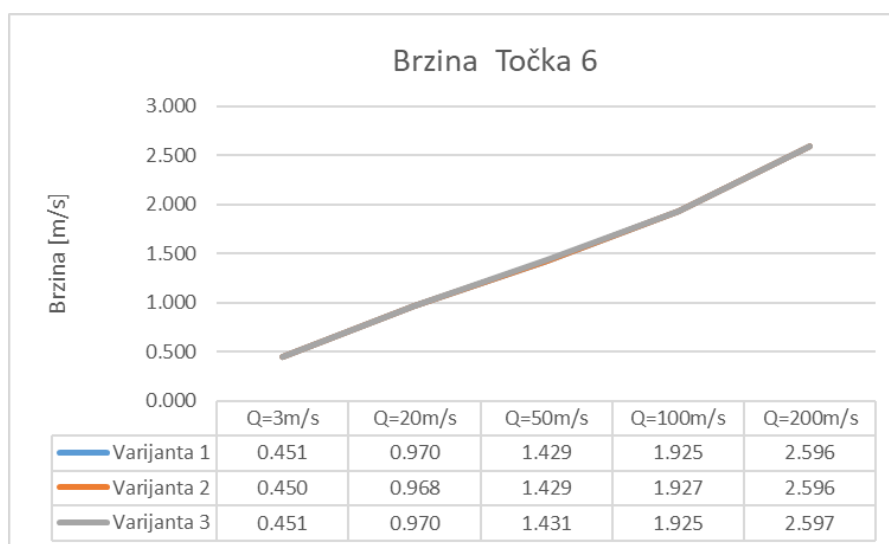
Slika 44 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 3



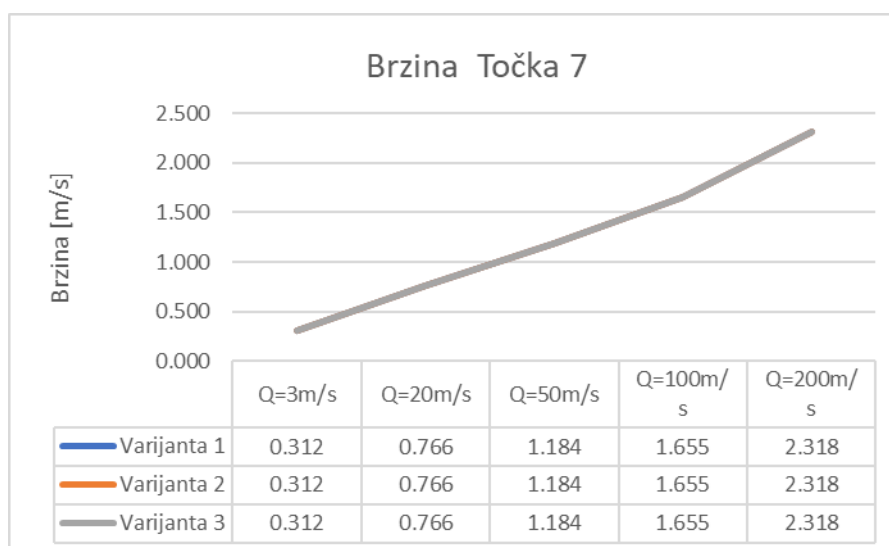
Slika 45 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 4



Slika 46 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 5



Slika 47 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 6



Slika 48 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 7

6. Zaključak

Male hidroelektrane predstavljaju potencijal za proizvodnju čiste energije, uz minimalan utjecaj na okoliš. U ovom radu istražuje se optimizacija hidrauličkih uvjeta u dovodnom kanalu male hidroelektrane na rijeci Mrežnici, s ciljem smanjenja gubitaka i poboljšanja efikasnosti rada turbine.

Rezultati pokazuju da je usmjerivač toka učinkovitiji u reguliranju protoka prema strojarnici nego betonski zid. Ova varijanta može biti poželjna ako je cilj smanjiti brzinu toka na ulazu, dok betonski zid može bolje služiti kao zaštita u drugim dijelovima projekta.

Općenito, zaključak je da usmjerivač toka ima značajan utjecaj na smanjenje brzine protoka u kritičnim točkama, što može doprinijeti stabilnijim uvjetima rada strojarnice. Ova varijanta nudi bolje uvjete u odnosu na ostale opcije, posebno u pogledu smanjenja brzine i poboljšanja uvjeta za rad turbine.

Za daljnje korake u optimizaciji hidrauličkih uvjeta u sustavu, predlaže se istraživanje različitih oblika i duljina usmjerivača toka. Varijacije u geometriji usmjerivača mogle bi dodatno poboljšati kontrolu brzine i smjera protoka, posebno u dijelovima gdje se javlja povećana turbulencija ili preopterećenje na ulazu u strojarnicu. Istraživanje optimalne duljine i nagiba usmjerivača moglo bi rezultirati dodatnim smanjenjem brzine protoka i povećanjem stabilnosti sustava, čime bi se dodatno poboljšala učinkovitost rada turbine te smanjili troškovi održavanja zbog potencijalnog smanjenja hidrauličkih udara i opterećenja na opremu.

Literatura

- [1] H. Bašić, N. Matijašević, »Male hidroelektrane,« 12. 6. 2013. [Mrežno]. Dostupno na : <https://www.menea.hr/wp-content/uploads/2013/12/6-hidroelektrane.pdf>. [Pristupljeno : 1.8.2023.].
- [2] INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. (2019). 2019 hydropower status report Dostupno na : https://hydropower-assets.s3.eu-west-2.amazonaws.com/publications-docs/2019_hydropower_status_report_0.pdf [Pristupljeno 1.8.2023.].
- [3] Z. Guzović, »male hidroelektrane u hrvatskoj - Advantage Austria,« 9. 4. 2014. [Mrežno]. Available: https://menea.hr/wp-content/uploads/2014/04/Guzovic_MHE.pdf. [Pristupljeno 1.8.2023.].
- [4] H. Bašić, Z. Mahmutović, Ž. Pavlin, »Studija za "Hrvatske vode",« 12. 1999. [Mrežno]. Available: <https://bib.irb.hr/datoteka/61621.StudijaMogunosti99HE2.doc>. [Pristupljeno 1.8.2023.].
- [5] Z. Šimić, »OIEiK - Obnovljivi izvori energije i kogeneracija,« 2010. [Mrežno]. [Pristupljeno 1. 8. 2023.].
- [6] N. Matijašević, »Potencijal malih hidroelektrana u Hrvatskoj,« u *Simpozij o malim hidroelektranama Njemačko-hrvatske industrijske i trgovinske komore*, Zagreb, 2015..
- [7] P. Stojić, »Ulazne građevine za riječne protočne hidroelektrane,« u *Hidrotehničke građevine*, Split, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, 1999., pp. 15-21.
- [8] A. J. Odgaard, »Stabilization of River Channel at Diversions and Water Intakes,« u *Advances in Water Resources Engineering*, Springer, 2014, pp. 120-128.
- [9] A. H. Khater, M. Ashraf, »The use of baffle columns to mitigate undesired hydraulic,« *Journal of Advanced Research*, svez. 12, pp. 79-87, 2018.
- [10] H. Benigni, M. Mosshammer, H. Jaberg, M. Hölbling, J. Mayrhuber, »Flow analysis and operational optimisation of a two-unit bulb turbine hydro plant with significant power

- difference: Simultaneous CFD calculation of both turbines,« u *Hydro 2017*, Seville, Spain, 2017.
- [11] Momany D., Moko A., »DESIGN OF A PENSTOCK FOR A MICRO HYDRO PLANT,« April 2015.. [Mrežno]. Available:
<http://mechanical.uonbi.ac.ke/sites/default/files/cae/engineering/mechanical/DESIGN%20OF%20A%20PENSTOCK%20FOR%20A%20MICRO%20HYDRO%20PLANT.pdf>.
[Pristupljeno 1.8 2023.].
- [12] Singhal M.K., Arun K., »Optimum Design of Penstock for Hydro Projects,« *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2015.
- [13] Electric Power Development Co., Ltd. JP Design Co., Ltd., »Small scale hydropower,« Japan International Cooperation Agency , 2011..
- [14] R.K. Fisher, G.F. Franke, »The Impact of Inlet Flow Characteristics on Low Head Hydro Projects,« u *International Conference on Hydropower*, Portland, Oregon, 1987..
- [15] M. Angulo, S. Liscia, »CFD OPTIMIZATION OF LOW HEAD TURBINES INTAKE USING FISHER-FRANKE GUIDELINES,« u *I Latin American "Hydro power and System Meeting"*, At Campinas, Brasil, 2013..
- [16] M. Angulo, S. Liscia, »CFD OPTIMIZATION OF LOW HEAD TURBINES INTAKE USING FISHER-FRANKE GUIDELINES,« u *I Latin American "Hydro power and System Meeting"*, At Campinas, Brasil, 2013..
- [17] R. Gabl, D. Innerhofer S. Achleitner, M. Righetti, M. Aufleger, »Evaluation criteria for velocity distributions in front of bulb hydro,« *Elsevier*, pp. 745-756, 2018.
- [18] U.S. Army Corps of Engineers. (2016). HEC-RAS river analysis system: User's manual (Version 5.0). https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_Users_Manual_5.0.pdf

Popis slika

Slika 1 Instalirana snaga hidroelektrana u svijetu (2022. godine, godišnji izvještaj IHA - International Hydropower Association) [2]	1
Slika 2 MHE Duga Resa na Mrežnici 1884. godine služila za proizvodnju struje u pamučnoj industriji..	2
Slika 3 Podjela ulaznih građevina po položaju zahvata, bočni zahvat (lijevo), čeon (desno) [7]).....	2
Slika 4 Prirodna pojava rotacijskog tečenja (lijevo), potopljena krila za usmjeravanje toka i sprječavanja pojave erodiranja dna rotacijskim tečenjem (desno) [8]	4
Slika 5 Batimetrija rijeke Cedar na mjestu zahvata za DAEC postrojenje, a) u 1989. godini, i b) u 1992. godini [8]).....	4
Slika 6 Batimetrija rijeke Rock na mjestu zahvata za postrojenje Byron, a) stanje u 1990. godini, b) u 1994. godini i c) u 2007. godini [8].....	5
Slika 7 Prikaz makrolokacije mHE.....	8
Slika 8 Prikaz katastarskih čestica lokacije zahvata.....	9
Slika 9 Poprečni presjek Vodomjerne postaje Mrzlo Polje.....	10
Slika 10 Situacijski prikaz zahvata.....	12
Slika 11 Presjek kroz Strojarnicu mHe.....	13
Slika 12 Presjek kroz prag mHe.....	14
Slika 13 Pozicija Vodomjerne postaje (zeleno) i mHE (crveno). (DHMZ).....	15
Slika 14 Poprečni presjek Vodomjerne postaje Mrzlo Polje.....	16
Slika 15 Konsumpcijska krivulja Mrežnice za Vodomjernu postaju Mrzlo polje u razdoblju 2000. do 2015. godine	17
Slika 16 Krivulja učestalosti i trajnosti vodomjerne postaje Mrzlo Polje 2000.-2015. godine.....	19
Slika 17 Tlocrt Varijante 1.....	20
Slika 18 Tlocrt varijante 2.....	21
Slika 19 Tlocrt varijante 3.....	22
Slika 20 Model Vodotoka u HEC-RAS -u	24
Slika 21 prikaz nizvodnog rubnog uvjeta.....	25
Slika 22 Prikaz Q-H Krivulje nizvodnog rubnog uvjeta	25
Slika 23 Prikaz krivulje hidrografa	26
Slika 24 Prikaz pozicija analiziranih brzina	29
Slika 25 a) Brzine tečenja za $Q=3m^3/s$	30
Slika 26b) Brzine tečenja za $Q=20m^3/s$ varijanta 1	31
Slika 27 c) Brzine tečenja za $Q=50m^3/s$ varijanta 1	31
Slika 28d) Brzine tečenja za $Q=100m^3/s$	32
Slika 29 e) Brzine tečenja za $Q=200m^3/s$	32
Slika 30 usporedba brzine tečenja u odnosi na protok po pozicijama za varijantu 1	33
Slika 31 a) Brzine tečenja za $Q=3m^3/s$ varijanta 2	34
Slika 32b) Brzine tečenja za $Q=20m^3/s$ varijanta 2	35
Slika 33c) Brzine tečenja za $Q=50m^3/s$ varijanta 2	35
Slika 34d) Brzine tečenja za $Q=1000m^3/s$ Varijante 2.....	36
Slika 35e) Brzine tečenja za $Q=200m^3/s$ Varijante 2.....	36
Slika 36 usporedba brzine tečenja u odnosi na protok po pozicijama za varijantu 2	37
Slika 37 a) Brzine tečenja za $Q=3m^3/s$ varijanta 3	38
Slika 38b) Brzine tečenja za $Q=20m^3/s$ varijanta 2	39
Slika 39 c) Brzine tečenja za $Q=50m^3/s$ Varijante 3	39

Slika 40 d) Brzine tečenja za $Q=100\text{m}^3/\text{s}$ varijante 2	40
Slika 41 e) Brzine tečenja za $Q=200\text{m}^3/\text{s}$ Varijante 2	40
Slika 42 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 1	41
Slika 43 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 2	42
Slika 44 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 3	42
Slika 45 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 4	42
Slika 46 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 5	43
Slika 47 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 6	43
Slika 48 Usporedba brzine tečenja varijanti 1,2 i 3 u točki 7	43

Popis tablica

Tablica 1 Prikaz potencijala mHE u ovisnosti raspona instalirane snage [5]	0
Tablica 2 Karakteristični podaci za vodomjernu postaju Mrzlo Polje	17