

# IZRADA GEOMETRIJE I NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA FLUIDA U ODVODNOM KANALU HE RIJEKA

---

Grgorinić, Mateo

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:363319>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-20**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**IZRADA GEOMETRIJE I NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA  
FLUIDA U ODVODNOM KANALU HE RIJEKA**

Rijeka, rujan 2023.

Mateo Grgorinić

0069086119

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**IZRADA GEOMETRIJE I NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA  
FLUIDA U ODVODNOM KANALU HE RIJEKA**

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka, rujan 2023.

Mateo Grgorinić

0069086119



## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam završni rad naslova „Izrada geometrije i numerička analiza strujanja fluida u odvodnom kanalu HE“ pod vodstvom prof. dr. sc. Zoran Čarija izradio samostalno, koristeći stečeno znanje tijekom prijediplomskog sveučilišnog studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci te navedenu literaturu.

Rijeka, rujan 2023.

---

Mateo Grgorinić

0069086119

## ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Zoranu Čariji i asist. dr. sc. Ivani Lučin na danim savjetima i pomoći pri izradi završnog rada.

## Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. TIPOVI HIDROELEKTRANA</b> .....	2
<b>2.1. Prema regulaciji protoka</b> .....	3
<b>2.1.1. Hidroelektrane s konstantnim protokom vode</b> .....	3
<b>2.1.2. Hidroelektrane s reguliranim protokom vode</b> .....	4
<b>2.1.3. Reverzibilne hidroelektrane</b> .....	5
<b>2.2. Hidroelektrane prema instaliranoj snazi</b> .....	6
<b>2.2.1. Velike hidroelektrane</b> .....	6
<b>2.2.2. Srednje hidroelektrane</b> .....	7
<b>2.2.3. Male hidroelektrane</b> .....	8
<b>3. HIDROELEKTRANA</b> .....	10
<b>3.1. Općenito o hidroelektranama</b> .....	10
<b>3.2. Dijelovi hidroelektrane</b> .....	12
<b>3.2.1. Dovodni kanal</b> .....	12
<b>3.2.2. Tlačni cjevovod</b> .....	13
<b>3.2.3. Vodna komora</b> .....	14
<b>3.2.4. Strojarnica</b> .....	15
<b>3.2.5. Turbina</b> .....	16
<b>3.2.6. Hidrogenerator</b> .....	17
<b>3.2.7. Odvodni kanal</b> .....	18
<b>4. HEC RAS</b> .....	19
<b>5. IZRADA NUMERIČKE SIMULACIJE</b> .....	21
<b>5.1. Izrada geometrije</b> .....	21
<b>5.2. Postavke simulacije</b> .....	28
<b>6. REZULTATI</b> .....	31
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	37
<b>8. LITERATURA</b> .....	38
<b>9. POPIS OZNAKA I KRATICA</b> .....	40
<b>10. SAŽETAK</b> .....	41
<b>11. ABSTRACT</b> .....	42

## 1. UVOD

Hidroelektrane u današnjem svijetu zastupaju veliki udio energije dobivene od strane obnovljivih izvora energije. Hrvatska spada u vodeće zemlje u proizvodnji energije iz obnovljivih izvora energije. Više od 50% elektrana čine hidroelektrane, te je u Hrvatskoj u pogonu 17 velikih i oko 20 malih hidroelektrana. Hrvatska vrlo dobro iskorištava potencijal hidroenergije, sa čime postiže svu manju potrebu i ovisnost o fosilnim gorivima. Ekološki utjecaj hidroelektrana nije zanemariv ali u odnosu na fosilna goriva je puno manji. Težnja prema obnovljivim izvorima energije je sve veća radi radi negativnog utjecaja fosilnih goriva na okoliš, predviđanja su da do 2030 se prosječno poveća kapacitet za 1000 GW u svjetskoj proizvodnji.

Zadatak završnog rada je izrada geometrije odvodnog kanala hidroelektrane Rijeka te numerička analiza strujanja fluida kroz isti. U prvom dijelu definirana je podjela hidroelektrana, dijelimo ih prema regulaciji protoka i prema instaliranoj snazi. Navedene podijele u zatim detaljnije opisane i objašnjen princip rada te mane i prednosti pojedinačnih. Nadalje pobliže je definiran i objašnjen rad hidroelektrane, te zatim navedeni i opisani pojedini dijelovi hidroelektrana. U četvrtom poglavlju predstavljen je program HEC RAS koji je korišten za izradu ovog rada, funkcija programa je prikazivanje simulacije kako se određeni model ponaša u realnim uvjetima. U petom poglavlju je detaljno opisan postupak izrade numeričke simulacije, od kreiranje geometrije odvodnog kanala do izrade same simulacije. Zatim uz pomoć izračunatih i dobivenih parametara vršimo simulaciju i očitavamo rezultate. Program nam omogućava pregled rezultata pomoću grafa brzina, grafa protoka te raznih presjeka kanala.

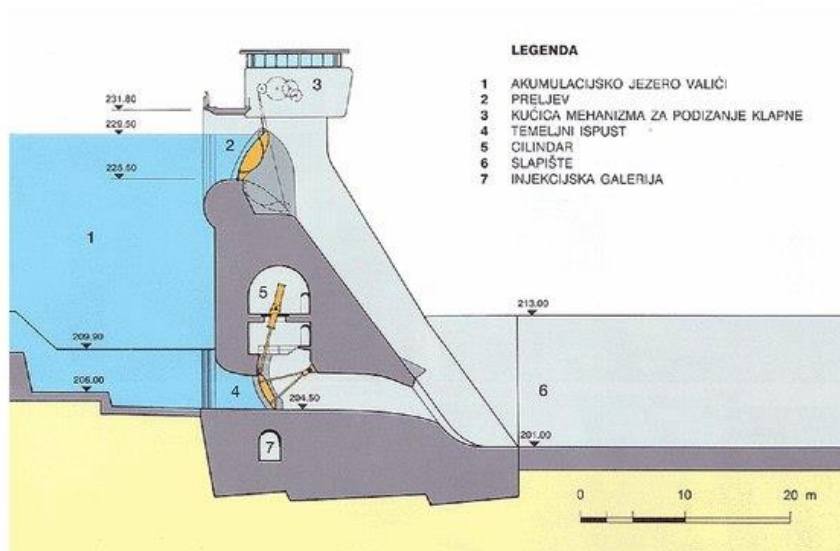


## 2. TIPOVI HIDROELEKTRANA

Postoji nekoliko različitih vrsta hidroelektrana od kojih je svaka prilagođena određenim geografskim i energetske potrebama. To uključuje hidroelektrane s protokom rijeke, rezervoarske hidroelektrane, hidroelektrane s pumpnom pohranom, hidroelektrane na plimu i oseku te elektrane na valove oceana. Razumijevanje raznolikosti ovih vrsta hidroelektrana ključno je za maksimiziranje proizvodnje energije, osiguravanje stabilnosti mreže i minimiziranje utjecaja na okoliš.

U ovome se završnom radu, radi na primjeru hidroelektrane Rijeka. To je potočna hidroelektrana koja se koristi pritokom Rječine. Brana hidroelektrane Rijeka smještena je na visini od 35 m na Rječini kod sela Groh, umjetno jezero sa maksimalnim vodostajem od 229,5 m sadrži korisni obujam od 470 000 m<sup>3</sup>. [1]

Hidroelektrana Rijeka koristi dvije dvije Francisove turbine sa snagom od 19,8 MW. Turbine imaju instalirani protok od 10,5 m/s i pad od 213 m, s predturbinskim kuglastim zatvaračem, regulatorom i tlačnom napravom. Ukupna instalirana snaga Hidroelektrane Rijeka je 36,8 MW. [2]



Slika 3.1. Presjek brane HE Rijeka [3]

## 2.1. Prema regulaciji protoka

### 2.1.1. Hidroelektrane s konstantnim protokom vode

Protočne hidroelektrane odnosno hidroelektrane sa konstantnim protokom predstavljaju tip hidroelektrane koja se oslanja na prirodne tokove rijeka kako bi generirala električnu energiju. Takav tip hidroelektrana su one čija se uzvodna akumulacija može isprazniti za manje od dva sata rada kod nazivne snage ili takva akumulacija uopće ne postoji. Kinetička energija vode se gotovo direktno koristi za pokretanje vodnih turbina. Hidroelektrane s konstantnim protokom imaju važnu ulogu u diversifikaciji energetskeg portfolija, nudeći održiv izvor električne energije uz manji utjecaj na okoliš. [4]



*Slika 3.2. Protočna HE Chief Joseph Dam, SAD [5]*

Karakteristike hidroelektrane sa konstantnim protokom ogledaju se u neiskorištavanju velikih rezervoara za skladištenje vode te umjesto toga koriste prirodne tokove rijeka kako bi voda prolazila kroz branu i turbine. Upravo se korištenjem takvih prirodnih tokova stvara minimalan utjecaj na okoliš. Iako nemaju velike rezervoare za regulaciju vodostaja, pojedine hidroelektrane mogu imati regulacijske strukture kako bi se osigurao određeni protok vode kroz branu. Upravo se samim time osigurava kontinuirana proizvodnja, no količina proizvedene energije svakako ovisi o sezoni i količini padalina.

### 2.1.2. Hidroelektrane s reguliranim protokom vode

Hidroelektrane sa kontroliranim protokom odnosno hidroelektrane s akumulacijom koriste rezervoare za skladištenje vode kako bi omogućile regulaciju protoka i proizvodnje električne energije. Potencijalnu energiju dobivamo sa kreiranjem branama uz pomoć kojih stvaramo akumulacijska jezera. Te prema potrebi voda se dovodi do vodne turbine i električnog generatora, sa kojima proizvodimo električnu energiju. Snaga ovisi o visini vodostaja ili razlici između visine vode u akumulacijskom jezeru i odvodu vode poslije vodne turbine. Cijev uz pomoć koje dovodimo vodu do vodne turbine nazivamo se tlačni cjevovod. [6]



*Slika 3.3. HE sa reguliranim protokom Peruća [7]*

Prednosti hidroelektrana sa kontroliranim protokom prikazuje se u mogućnosti skladištenja viška vode tijekom perioda niske potražnje električne energije. Skladištenoj se vodi iz akumulacijskog jezera kontrolira protok te sa time na taj način prilagođava uvjetima na tržištu energije. Nadalje prednost ovakvog tipa hidroelektrana je to što osiguravaju kontinuiranu proizvodnju električne energije neovisno o sezonskim fluktuacijama u prirodnom protoku. Njezin najveći nedostatak ogleda se u utjecaju na okoliš i ekosustav zbog izgradnje velikih brana te stvaranja velikih rezervoara. Hidroelektrane sa kontroliranim protokom imaju ključnu ulogu u osiguravanju stabilnosti energetskog sustava. Na način da omogućuju prilagodljivu proizvodnju električne energije prema potrebama potrošača i tržišta.

### 2.1.3. Reverzibilne hidroelektrane

Reverzibilne hidroelektrane (RHE) su poseban tip hidroelektrana koji se koristi za pohranu energije na efikasan način. Ova vrsta hidroelektrane može raditi u dva smjera. Jedan od njih omogućuje generiranje električne energije upravo onda kada je potrebna, dok se drugi smjer ogleda u mogućnosti djelovanja u obliku pumpe kako bi se voda prebacila iz nižeg rezervoara u viši rezervoar i tako pohranila energija za buduću uporabu. Glavna ideja iza reverzibilnih hidroelektrana je da se tokom razdoblja niske potražnje za električnom energijom koristi višak električne energije za pumpu vode iz nižeg rezervoara u viši rezervoar. Time se pohranjuje energija u obliku potencijalne energije vode na višoj nadmorskoj visini. Tijekom razdoblja povećane potražnje za električnom energijom, voda se pušta iz višeg rezervoara nizbrdo prema nižem rezervoaru kroz turbine, pri čemu se potencijalna energija vode pretvara u električnu energiju.[8]



*Slika 3.4. HE sa reverzibilnim protokom Velebit.[9]*

Karakteristike reverzibilnih hidroelektrana predstavljaju mogućnost pohrane viška energije za upotrebu tijekom velike potražnje te prilagodljivost tržišnim uvjetima. Posjeduju brzu reakciju prilikom prelaska iz pumpanja u generiranje električne energije gdje pomažu prilikom održavanju stabilnosti mreže te ih čine vrlo učinkovitim. Nedostaci takvih hidroelektrana su zadovoljavanje uvjeta na zahtjevnim terenima i rješavanje problema dostupnosti vode na različitim visinama. Uz takve zahtjevne geografske uvjete normalno je i pretpostaviti da takav tip hidroelektrana ima visoke troškove gradnje. Uz navedene nedostatke, financijska isplativost takvih projekata je upitna te se ista može zadovoljiti samo u odgovarajućim uvjetima.

## 2.2. Hidroelektrane prema instaliranoj snazi

### 2.2.1. Velike hidroelektrane

Velike hidroelektrane su mega građevine. Imaju sposobnost generiranja dvostruko veće količine energije od trenutno najvećih instaliranih nuklearnih elektrana, te su ujedno i najveći proizvođači električne energije na svijetu. Iako ne postoji službeni raspon kapaciteta za velike hidroelektrane raspon se uzima od 100 MW do preko 20GW, te je trenutno na svijetu takvih sedam postrojenja sa kapacitetom većim od 10 GW.



*Slika 3.5. HE na rijeci Yangtze sa snagom od 22,5 GW [10]*

Prednosti velikih hidroelektrana ogledaju se kroz njihov veliki kapacitet i veliki rezervoar koji omogućava skladištenje velikih količina vode sa kojom se zatim može generirati električna energija. Upravo takve građevine imaju veliki utjecaj na okoliš i ekosustave zbog promjena u prirodnom toku rijeka i utjecaja na vodostaje te biljni i životinjski svijet. Velike hidroelektrane imaju važnu ulogu u globalnoj proizvodnji električne energije, pružajući velike količine čiste i obnovljive energije. Međutim, njihov utjecaj na okoliš i zajednicu može izazvati pitanja vezana uz samu održivost i zaštitu prirode.[11]

### 2.2.2. Srednje hidroelektrane

Srednje hidroelektrane su karakteristične po tome što nemaju preveliki utjecaj na okoliš radi toga što ne koriste velike brane i velike rezervoare, koji posljedično utječu na ekosustav te cjelokupno područje oko brane. Raspon snage srednjih hidroelektrana varira od države do države no europska komisija je odredila granicu da od 100KW do 100 MW instalirane snage se karakterizira kao srednja hidroelektrana.

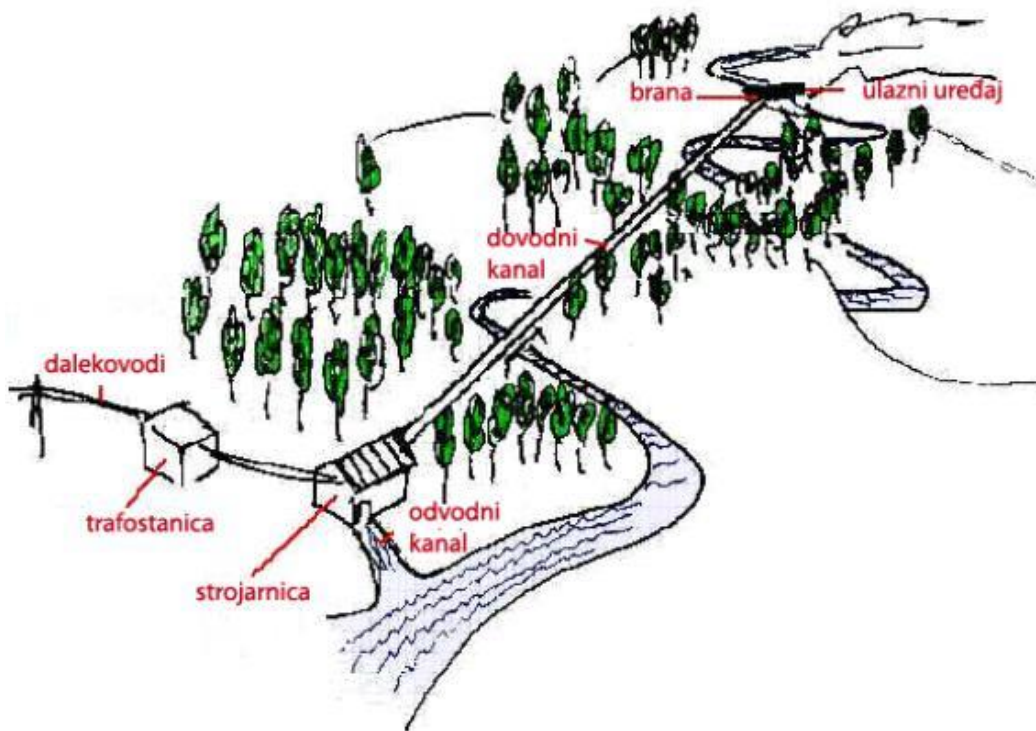


*Slika 3.6. Srednja HE na istoku Gane sa snagom od 45 kW [12]*

Srednje hidroelektrane predstavljaju spoj prednosti proizvodnje energije iz hidro potencijala i decentralizirane proizvodnje energije, te u usporedbi sa velikim hidroelektranama praktički nemaju nikakvih nedostataka. Velika stavka je to što imaju minimalan utjecaj na okoliš. Razlog tome ogleda se u sigurnosti samog protoka kroz cjevovod oko izvorišta vode te crpilišta gdje je protok također osiguran gravitacijskom silom. Takvo postavljanje turbina i pripadnih električnih generatora ne ugrožava dobavu pitke vode i okoliš. [13]

### 2.2.3. Male hidroelektrane

Male hidroelektrane dijelimo na dvije skupine hidroelektrana, na mirko i piko hidroelektrane. Gdje su mikro elektrane do 100 KW instalirane snage te se grade za male zajednice te ujedno čine izvor jeftine i obnovljive energije. Najveća prednost takvih elektrana je to što su lagano održive te koriste fotonaponske panele za napajanje. Izazov takvih hidroelektrana ogleda se u dostupnosti vode pa prilikom sušnim razdoblja imaju smanjenu ili nikakvu proizvodnju.[14]



Slika 3.7. Princip rada manjih HE [15]

Zadnji i najmanji tip hidroelektrane su piko hidroelektrane. One su okarakterizirane sa kapacitetom do 5 KW te su namijenjene za potrebe vrlo malih zajednica i pojedinačnih domova u ruralnim područjima gdje je teži pristup konvencionalnoj elektroenergetskoj mreži.[16]



Slika 3.8. HE u ruralnom dijelu Vijetnama sa snagom od 5 kW [17]

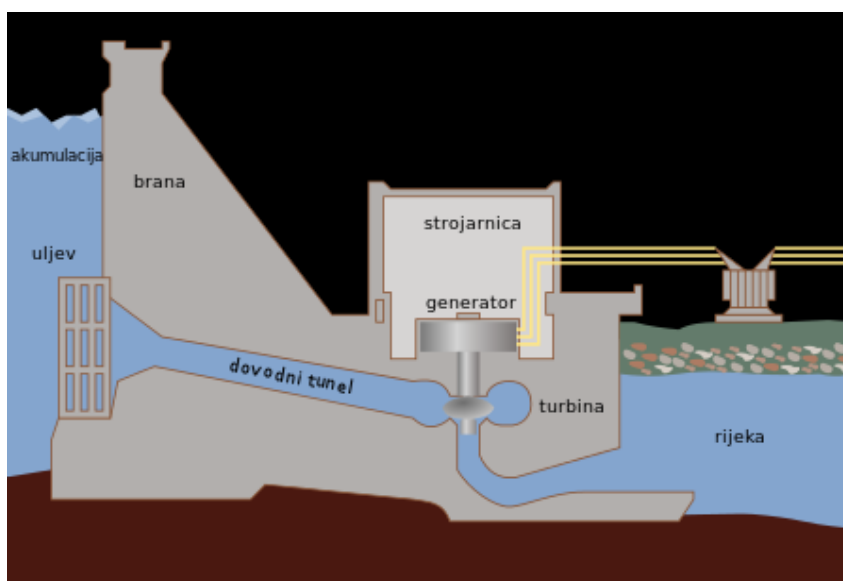


### 3. HIDROELEKTRANA

#### 3.1. Općenito o hidroelektranama

Hidroelektrana je postrojenje koje označava iskorištavanje vodene energije radi proizvodnje električne energije ili pokretanje strojeva. Koristi se potencijalna energija vode koja se pretvara u kinetičku energiju njezinog strujanja, a potom u mehaničku energiju vrtnje vratila turbine te konačno u električnu energiju u električnom generatoru. Hidroelektranu u širem smislu čine sve građevine i postrojenja, koje služe u procesu stvaranja električne energije. Hidroenergija je privlačna alternativa fosilnim gorivima jer ne sudjeluje u izravnoj proizvodnji ugljičnog dioksida ili drugih atmosferskih onečišćivača te pruža relativno konstantan izvor energije. Međutim, ima ekonomske, sociološke i ekološke nedostatke i zahtijeva dovoljno energičan izvor vode, poput rijeke ili visokog jezera.

Električna energija proizvedena iz hidroenergije je ekonomski konkurentna proizvodnji električne energije iz fosilnih i nuklearnih goriva, te je zato hidroenergija jedna od značajnijih obnovljivih izvora energije. Proizvodnja električne energije iz hidroelektrana se značajno povećala te je njezin udio u zadnjih trideset godina povećan za 50%. Iako se dogodio rast proizvodnje i dalje značajno zaostaje u proizvodnji za nuklearnim postrojenjima i termoelektranama. Razlozi se nalaze u tome što hidroenergija ima bitna tehnička i prirodna ograničenja. Jedan od glavnih ukazuje na to da hidroelektrane zahtijevaju konstantan izvor i protok vode kroz cijelu godinu za stvaranje električne energije.



Slika 3.1. Shema hidroelektrane [18]

Snaga hidroelektrane se računa pomoću navedene jednadžbe:

$$P = q \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot k$$

gdje su:

$P$  - dobivena snaga struje [W]

$q$  - volumni protok vode [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$\rho$  - gustoća vode (uzima se približna vrijednost 1000 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ])

$g$  - ubrzanje sile teže [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

$h$  - visina vodenog stupca [m]

$k$  - koeficijent djelovanja hidroelektrane koji poprima vrijednosti između 0 i 1

Koeficijent  $k$  ovisi o vrsti turbina ugrađenih u hidroelektranu, te što su turbine modernije se koeficijent približava 1. [19]

Jednom kada je hidroelektrana završena, nije potreban novac za sve skuplje gorivo. Ne sudjeluje u stvaranju opasnih otpada (poput nuklearnih elektrana) te također proizvodi gotovo zanemarivu količinu stakleničkih plinova za razliku od termoelektrana. Trenutno u svijetu hidroelektrane generiraju 4 300 TWh sveukupne energije i generira više energije nego svi drugi obnovljivi izvori energiji. [20]

## 3.2. Dijelovi hidroelektrane

### 3.2.1. Dovodni kanal

Dovodni kanal ili kanal za usmjeravanje vode omogućava kontrolirani i usmjereni protok vode prema turbinama te samim time ima ključnu ulogu u strukturi hidroelektrane. Funkcija dovodnog kanala obuhvaća prikupljanje te zatim vođenje vode iz izvora (rijeka, jezero ili rezervoar) prema turbinama unutar hidroelektrane sa dovoljnom količine energije kako bi uspješno generirali električnu energiju. Takvi kanali moraju biti pažljivo oblikovani i konstruirani te je obično kružnog presjeka a pri malim unutrašnjim tlakovima tuneli imaju oblik potkove. Optimalni je oblik slova D jer je zbroj troškova u elektroenergetskom sustavu minimalan.[18] Presjek mora biti optimalno konstruiran kako bi osigurali glatki i kontrolirani protok vode, nagib i oblik kanala koji zatim reguliraju brzinu i pritisak vode kako bi se postigao najučinkovitiji rad turbina. U posebnim slučajevima koriste se prepreke kao što su pregrade, kapije ili ventili koji omogućavaju kontrolu protoka te se također koriste posebni materijali poput oblog kanala kako bi spriječili habanje i koroziju radi kontakta s vodom te brzog protoka. Dovodni kanali mogu biti izgrađeni u zemlji ili u obliku betonske strukture. Njihov odabir ovisi o terenu i okolini te se samim time prilagođavaju uvjetima koji osiguravaju optimalan protok prema turbinama.[21]



*Slika 3.2. Ulaz u dovodni kanal [22]*

### 3.2.2. Tlačni cjevovod

Tlačni cjevovodi isto poznati kao usmjerivači su dijelovi hidroelektričnih elektrana čija je svrha usmjeriti vodu s potencijalnom energijom prema turbinama pod visokim tlakom. Voda ulazi u dovodni kanal te se kreće u njemu pod utjecajem gravitacijske sile. Potom ulazi u cijeli kanal ili njegove strukture koje zatim prenose tu vodu pod visokim tlakom prema turbinama, pritom koristeći svoju potencijalnu energiju kako bi se dobila kinetička energija.

Razlikujemo vrste tlačnih cjevovoda prema različitim parametrima kao što su nagib cijevi, materijal od kojih je napravljena, po unutarnjim oblozima koji utječu na smanjenje trenja i korozije te prema debljini stijenki cijevi koja je važna kako bi održali pritisak vode u cijevima.[23]



*Slika 3.3. Tlačni cjevovod na Hidroelektrani Rijeka [24]*



### 3.2.4. Strojarnica

Strojarnica označava centralno mjesto hidroelektrane. U njoj se nalaze svi potrebni uređaji i sustavi za nadzor i upravljanje hidroelektrane. Unutar kontrolne sobe prate se promjene tlaka, protoka vode, brzine turbine, napona te drugih važnih varijabli kako bi se osigurala stabilnost i optimalan rad hidroelektrane. Operatori u strojarnici trebaju biti svjesni nepravilnosti ili izvanrednih događaja koji mogu uzrokovati oštećenja opreme. Većina suvremenih strojarnica ima automatizirane sustave za praćenje i upravljanje te koriste senzore i računala koja im pomažu prilikom dinamičkog upravljanja hidroelektranama. Takvo upravljanje omogućuje učinkovitije i preciznije upravljanje cjelokupnim procesom.[27]



*Slika 3.5. Strojarnica HE Miljacka [28]*

Strojarnica predstavlja srce hidroelektrane. Omogućuje upravljanje, nadziranje i kontroliranje samog procesa generiranja električne energije. Kontrolna soba omogućuje operaterima da optimiziraju rad hidroelektrane, osiguraju stabilnost i sigurnost te prilagode proizvodnju električne energije prema potrebama tržišta.

### 3.2.5. Turbina

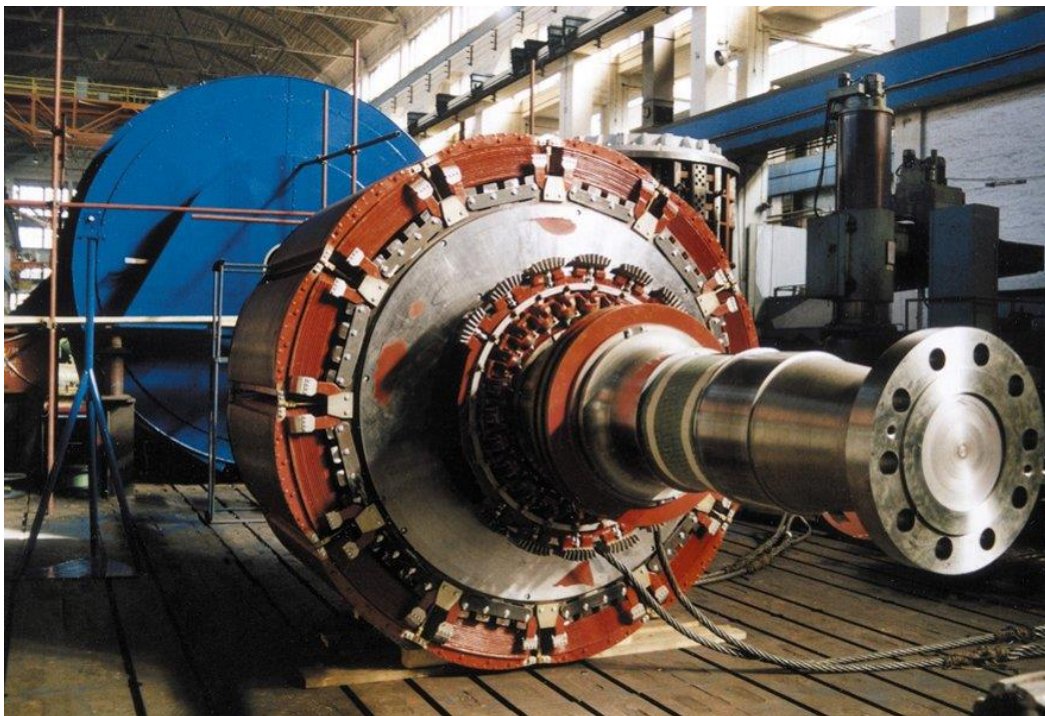
Vodna turbina je energetska stroj koji potencijalnu energiju vode pretvara u kinetičku, te zatim tu istu kinetičku energiju pretvara u mehanički rad. Sastoji se od kućišta sa statorskim lopaticama i rotora. Razlikuju se akcijske i reakcijske vodne turbine. Njihova glavna razlika ogleda se u mjestu pada tlaka. Kod akcijskih turbina pad tlaka se događa u statorskim lopaticama dok kod reakcijskih dijelom u statorskim i dijelom u rotorskim lopaticama. Reakcijske turbine koriste se kod većih protoka, dok se akcijske koriste pri visokim hidrostatskim tlakovima.[29]



*Slika 3.6. Mala Francisova turbina spojena na generator [30]*

### 3.2.6. Hidrogenerator

Hidrogenerator je zapravo električni generator koji je tjeran vodenom turbinom, brzina vrtnje je određena vrstom turbine te o količini i visini dolaznog fluida. Proces dobivanja električne energije se temelji na principu elektromagnetske indukcije koja počinje sa rotacijom magnetskog polja. Navedeno magnetsko polje stvara se pomoću magneta ili elektromagneta na rotoru. Kako se rotor pokreće magnetsko polje se mijenja u odnosu na stator koji je nepokretan. Takva promjena magnetskog polja uzrokuje indiciranje elektromotorne sile u statoru koja zatim uzrokuje cirkulaciju izmjeničnih električnih struja unutar statora. Generirane izmjenične struje stvaraju izmjenični napon koji se putem transformatora prilagođava odgovarajućem naponskom nivou potrebnom za distribuciju. Rad generatora se može regulirati i prilagoditi kako bi se održala stabilnost električne mreže. Navedeno se uspijeva regulacijom brzine rotora što naposljetku utječe na generiranje energije koju prilagođavamo potrebama tržišta.[31]



*Slike 3.7. Hidrogenerator HE Vinodol [32]*



### 3.2.7. Odvodni kanal

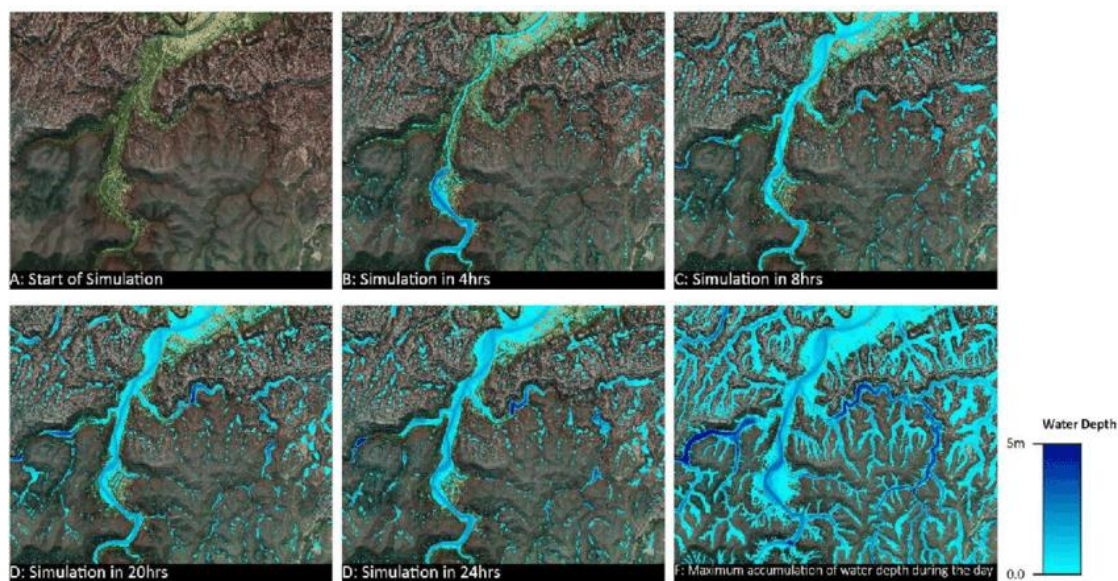
Osnovna zadaća odvodnog kanala je kontrolirano ispuštanje vode koja je prošla kroz turbinu elektrane, sa time omogućuje kontroliranu distribuciju vode natrag u vodotok. Radi regulacije vodostaja fluida kroz kanale koriste se sustavi ventila, sa regulacijom vodostaja sprječavamo poplave i suše u okolnom području. Također odvodni kanali imaju sisteme za kontrolu brzine protoka vode uz pomoć kojih osiguravamo optimalan rad hidroelektrane. Odvodni kanal ima ključnu ulogu u sigurnosti hidroelektrane, pravilno dizajniran i održavan kanal sprječava nesreće i štetu na električkim turbinama i drugim dijelovima hidroelektrane. Osim dizajna, materijal odvodnog kanala mora biti pravilno odabran te najčešće se koriste beton ili čelik. Moderni odvodni kanali radi veće iskoristivosti koriste pumpe uz pomoć kojih dio vode iz odvodnog kanala vraćamo u rezervoar hidroelektrane radi ponovnog korištenja. Uvjeti za projektiranje odvodnog kanala uvijek u obzir uzimaju okoliš, cilj je maksimalno smanjiti utjecaj izgradnje na okoliš. Uz pomoć kontrole sedimentacije kroz odvodni kanal odvajamo teške čestice i tvari štetne za okoliš, prije vraćanja nazad u prirodni vodotok.[33]



*Slika 3.8. Odvodni kanal HE Buckeye, USA [34]*

## 4. HEC RAS

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) je softverski alat razvijen od strane američkog inženjerskog centra (Hydrologic Engineering Center) za analizu tokova rijeka i hidrauličkih sustava. Ovaj program omogućuje inženjerima i stručnjacima da modeliraju protok vode u rijekama, kanalima, potocima i u drugim hidrauličkim sustavima radi analize poplava, erozije i drugih hidrauličkih problema. HEC-RAS je moćan alat koji se koristi za simulaciju protoka vode, analizu poplavnih područja, oblikovanje mostova i branica, proračun brzine strujanja i pritisaka vode, te pruža informacije o visinama vode na različitim točkama tijekom vremena. Ovaj softver ima veliku primjenu u inženjeringu vodnih resursa i hidraulici te pomaže stručnjacima u donošenju informiranih odluka o upravljanju vodnim sustavima kako bi se smanjili rizici od poplava, zaštitili objekti od erozije i optimizirali dizajn vodnih infrastrukturnih projekata.[35]



*Slika 4.1. Primjer simulacije poplave s obzirom na količinu padalina [36]*

HEC-RAS se često koristi za analizu hidrauličkih problema, oblikovanje vodnih struktura i procjenu utjecaja na okoliš, te ima ključnu ulogu u vodnoj i hidrauličkoj inženjeringu. Njegova primjena u praksi se koristi radi upravljanja rijekama kako bi se minimizirao rizik poplava i očuvala hidraulička ravnoteža, za evaluaciju raznih brana, kanala i mostova te za procjenu rizika od poplava, erozije i drugih hidrauličkih poplava što je važno za urbanističko planiranje i upravljanje rizicima. HEC-RAS je alat koji je ključan za inženjere i stručnjake u vodnom sektoru, omogućujući im da bolje razumiju i modeliraju ponašanje vodenih tijela te da donose informirane odluke u vezi s upravljanjem vodnim resursima.

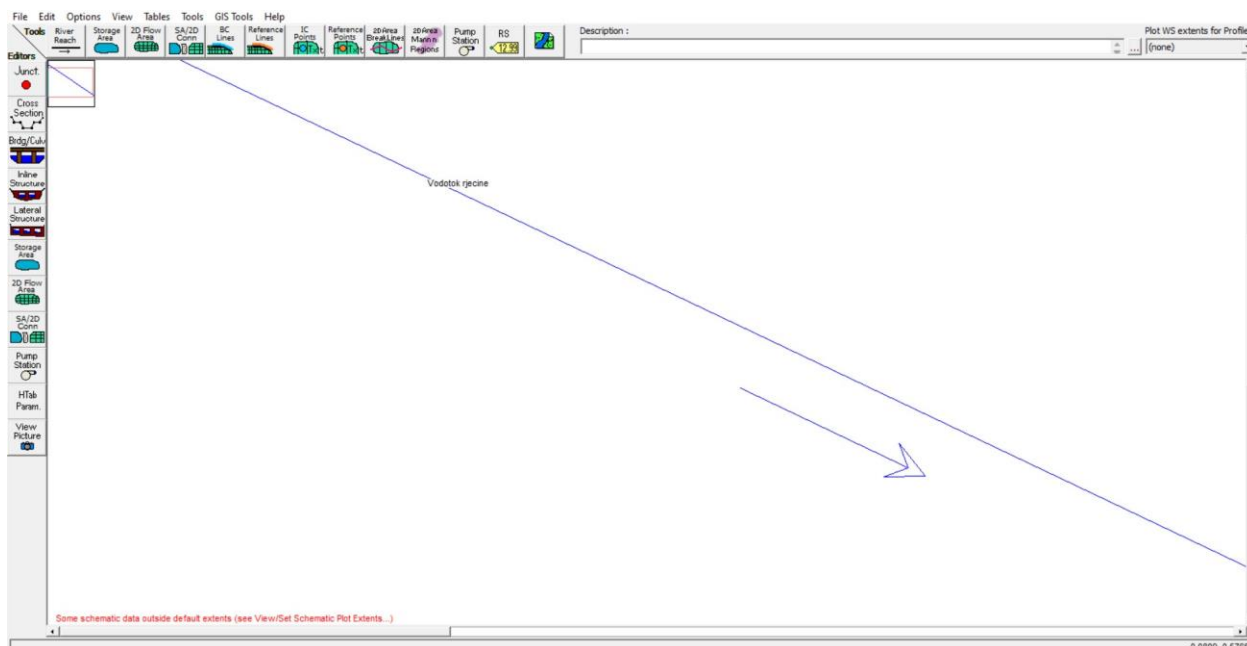
## 5. IZRADA NUMERIČKE SIMULACIJE

Cilj numeričke simulacije je modeliranje geometrije odvodnog kanala hidroelektrane Rijeka u svrhu proučavanja strujanja fluida pri različitim protocima fluida nakon izlaska iz turbine.

### 5.1. Izrada geometrije

Potrebno je kreirati model odvodnog kanala koji je duljine 186 m. Ulaz odvodnog kanala je dugačak 152 m nakon kojega slijedi odvajanje kanala na dvije grane dugačke 34 m. Poprečni presjek ulaza u odvodni kanal je prikazan na slici 5.2. dok poprečni presjek izlaznog dijela kanala je prikazan na slici 5.3..

Prvi korak u kreiranju geometrijskog modela je definiranje toka rijeke i same rijeke u programu uz pomoć naredbe „River reach“.



Slika 5.1. Definiranje same rijeke i njen smjer

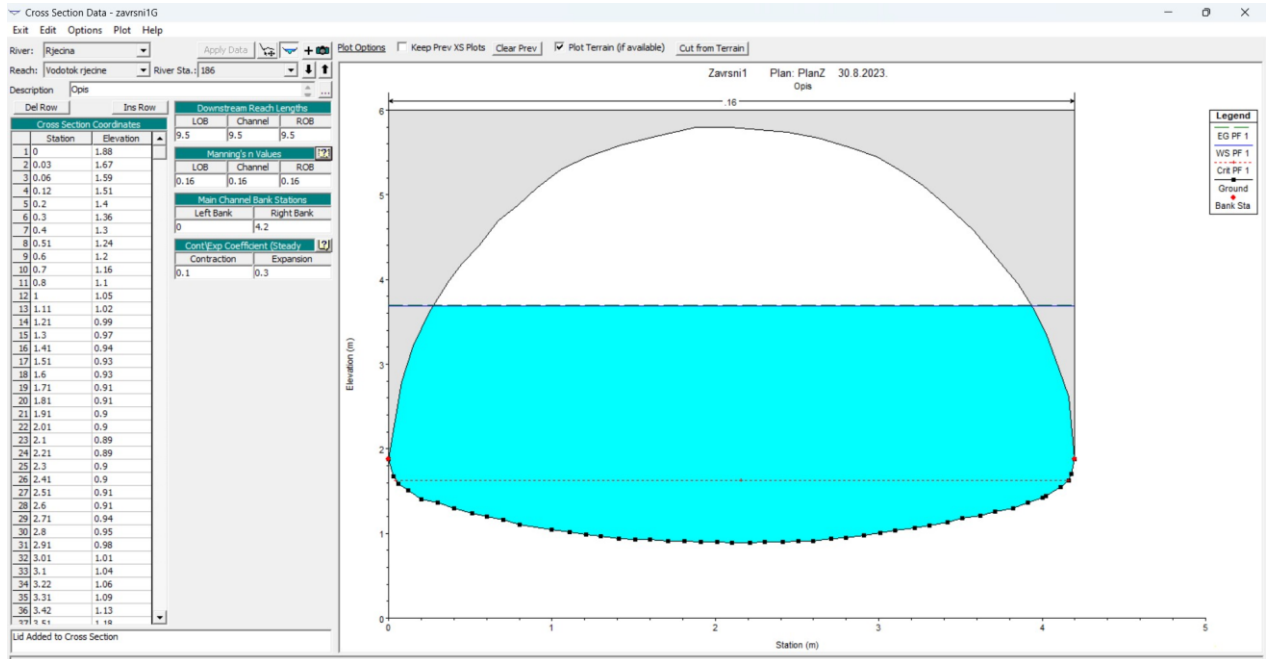
Zatim se uz pomoć naredbe „Cross section“ uz pomoć digitaliziranih podataka koji se baziraju prema nacrtu prikazanih u tablicama 5.1. i 5.2.. Unosom dobivenih podataka kreiramo željene poprečne presjeke kanala, dobiveni poprečni presjeci su prikazani na slikama 5.2. i 5.3..Prvo se definira za koju stanicu na vodotoku određujemo profil, te zatim se određuje njen razmak između stanica, koeficijent trenja i krajnje lijeva i desna točka kreiranog profila.

Tablica 5.1. Digitalizirani podaci 1.profila

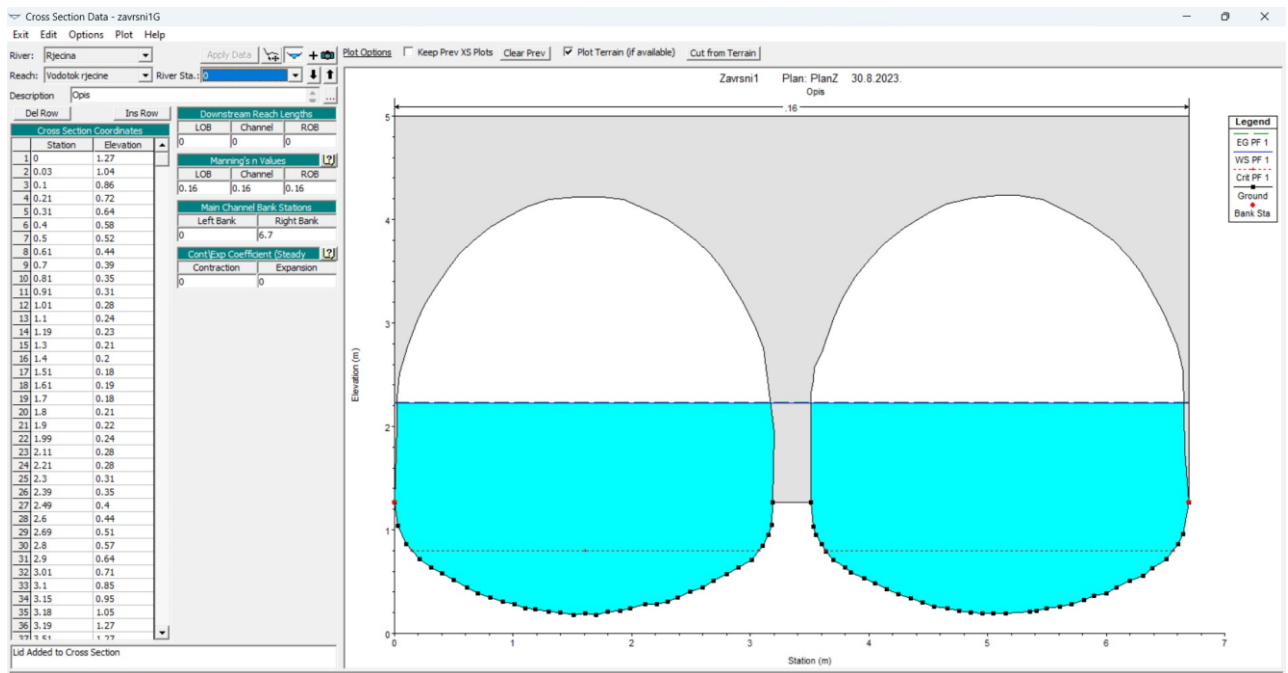
Rd.br.	Station	Elevation	Rd.br.	Station	Elevation
1.	0,00	1,87	25.	2,21	0,88
2.	0,03	1,66	26.	2,30	0,89
3.	0,06	1,58	27.	2,41	0,89
4.	0,12	1,50	28.	2,51	0,90
5.	0,20	1,39	29.	2,60	0,90
6.	0,30	1,35	30.	2,71	0,93
7.	0,40	1,29	31.	2,80	0,94
8.	0,51	1,23	32.	2,91	0,97
9.	0,60	1,19	33.	3,01	1,00
10.	0,70	1,15	34.	3,10	1,03
11.	0,80	1,09	35.	3,22	1,05
12.	0,90	1,08	36.	3,31	1,08
13.	1,00	1,04	37.	3,42	1,12
14.	1,11	1,01	38.	3,51	1,17
15.	1,21	0,98	39.	3,62	1,20
16.	1,30	0,96	40.	3,71	1,25
17.	1,41	0,93	41.	3,82	1,29
18.	1,51	0,92	42.	3,91	1,35
19.	1,60	0,92	43.	4,02	1,43
20.	1,71	0,90	44.	4,11	1,54
21.	1,81	0,89	45.	4,16	1,62
22.	1,91	0,89	46.	4,18	1,69
23.	2,01	0,88	47.	4,20	1,87
24.	2,10	0,88			

Tablica 5.2. Digitalizirani podaci 2.profila

Redni broj	Station	Elevation	Redni broj	Station	Elevation
1.	0	1,28	39.	3,51	1,27
2.	0,03	1,05	40.	3,53	1,04
3.	0,1	0,87	41.	3,55	0,96
4.	0,21	0,73	42.	3,6	0,87
5.	0,31	0,65	43.	3,64	0,8
6.	0,4	0,59	44.	3,7	0,72
7.	0,5	0,53	45.	3,8	0,65
8.	0,61	0,45	46.	3,85	0,6
9.	0,7	0,4	47.	3,96	0,54
10.	0,81	0,36	48.	4,05	0,49
11.	0,91	0,32	49.	4,15	0,44
12.	1,01	0,29	50.	4,25	0,39
13.	1,1	0,25	51.	4,35	0,35
14.	1,19	0,24	52.	4,45	0,31
15.	1,3	0,22	53.	4,55	0,27
16.	1,4	0,21	54.	4,66	0,25
17.	1,51	0,19	55.	4,76	0,23
18.	1,61	0,2	56.	4,86	0,21
19.	1,7	0,19	57.	4,96	0,2
20.	1,8	0,22	58.	5,05	0,2
21.	1,9	0,23	59.	5,15	0,2
22.	1,99	0,25	60.	5,27	0,21
23.	2,11	0,27	61.	5,36	0,22
24.	2,21	0,29	62.	5,41	0,23
25.	2,3	0,32	63.	5,5	0,25
26.	2,39	0,36	64.	5,61	0,27
27.	2,49	0,41	65.	5,71	0,29
28.	2,6	0,45	66.	5,81	0,33
29.	2,69	0,52	67.	5,9	0,37
30.	2,8	0,58	68.	6	0,4
31.	2,9	0,65	69.	6,09	0,45
32.	3,01	0,72	70.	6,2	0,52
33.	3,1	0,86	71.	6,31	0,57
34.	3,15	0,96	72.	6,39	0,64
35.	3,18	1,06	73.	6,51	0,73
36.	3,19	1,26	74.	6,61	0,87
37.	3,19	1,96	75.	6,65	0,97
38.	3,51	1,96	76.	6,7	1,28

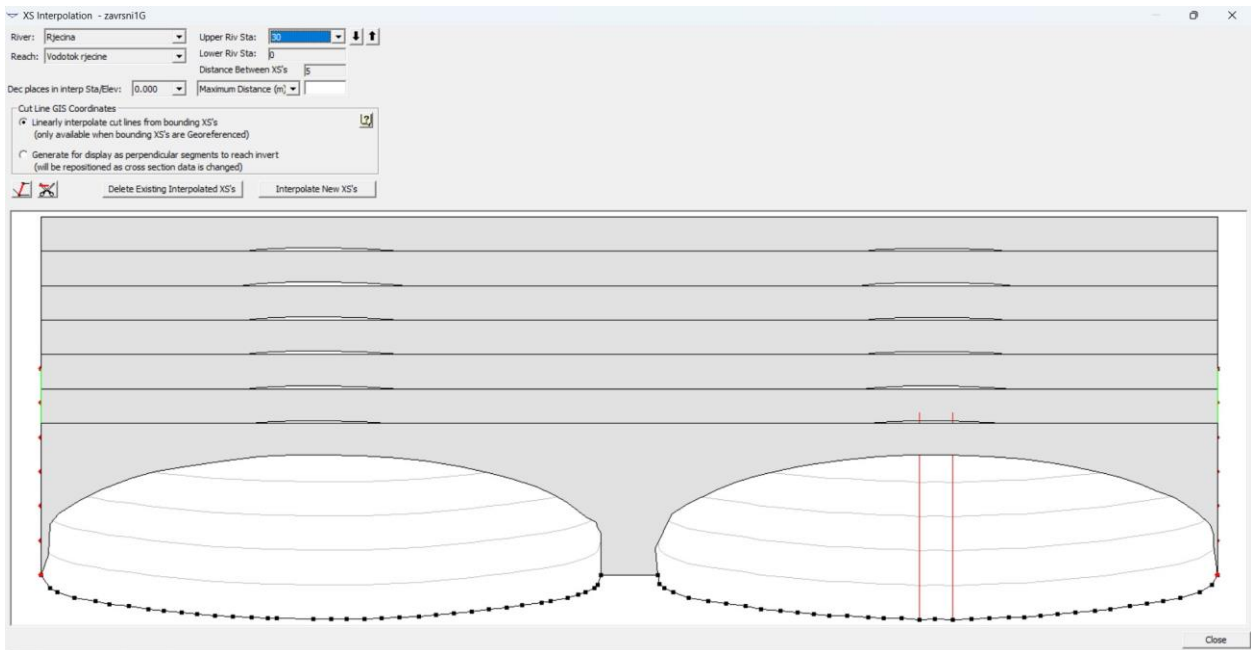


Slika 5.2. Izgled kreiranog ulaznog profila

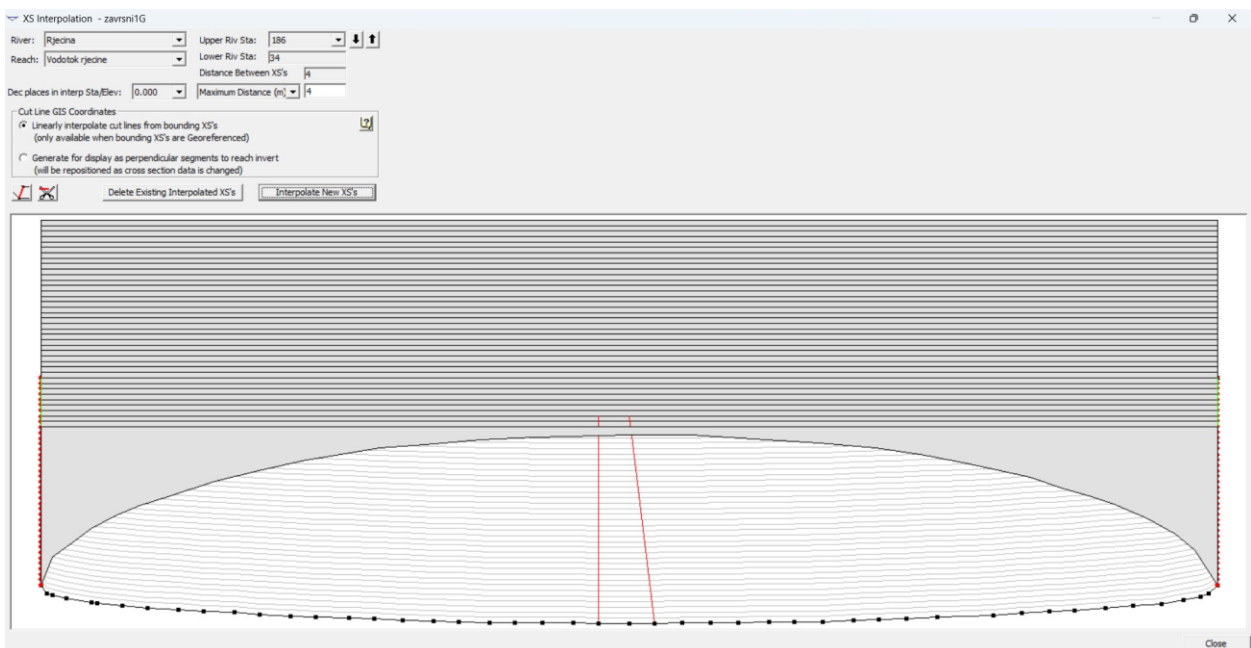


Slika 5.3. Izgled kreiranog izlaznog profila

Potrebna je dodatna diskretizacija područja između krajnjih profila, za navedenu diskretizacija se koristi interpolacija. Interpolacija se izrađuje između dva krajnja profila, te se prvo radi za profile ulaznog dijela kanala te zatim za profile izlaznog dijela kanala. Kanal ima kontinuirani blagi pad pa se koordinate profila prilagođavaju ka tome. Navedeno se izrađuje uz pomoć naredbe „XS Interpolation“ gdje se bira „Between two X“ te je važno zatim odrediti potrebnu duljinu između točaka. Određena duljina između profila 186 i 34 je 4 m, dok između profila 30 i 0 je 5 m.



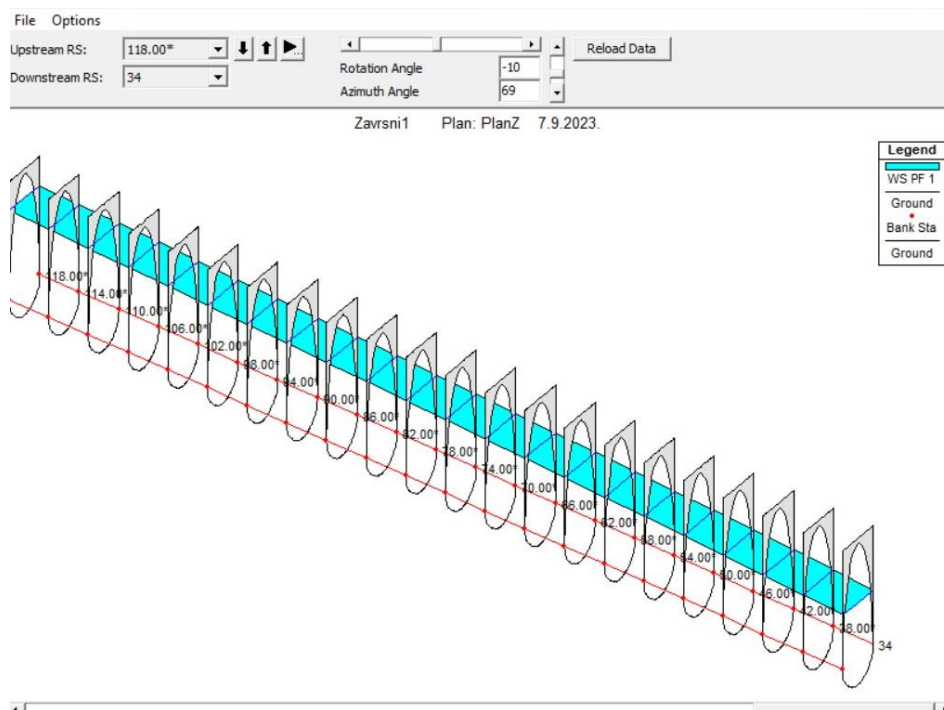
Slika 5.4. Prikaz interpolacije između profila 30 i 0



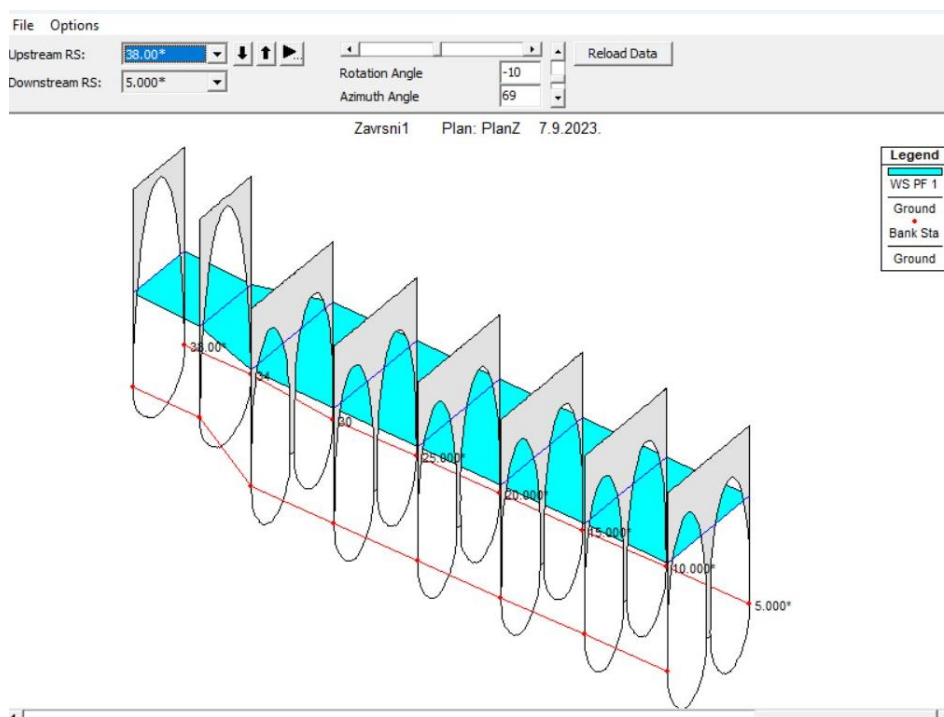
Slika 5.5. Prikaz interpolacije između profila 186 i 34



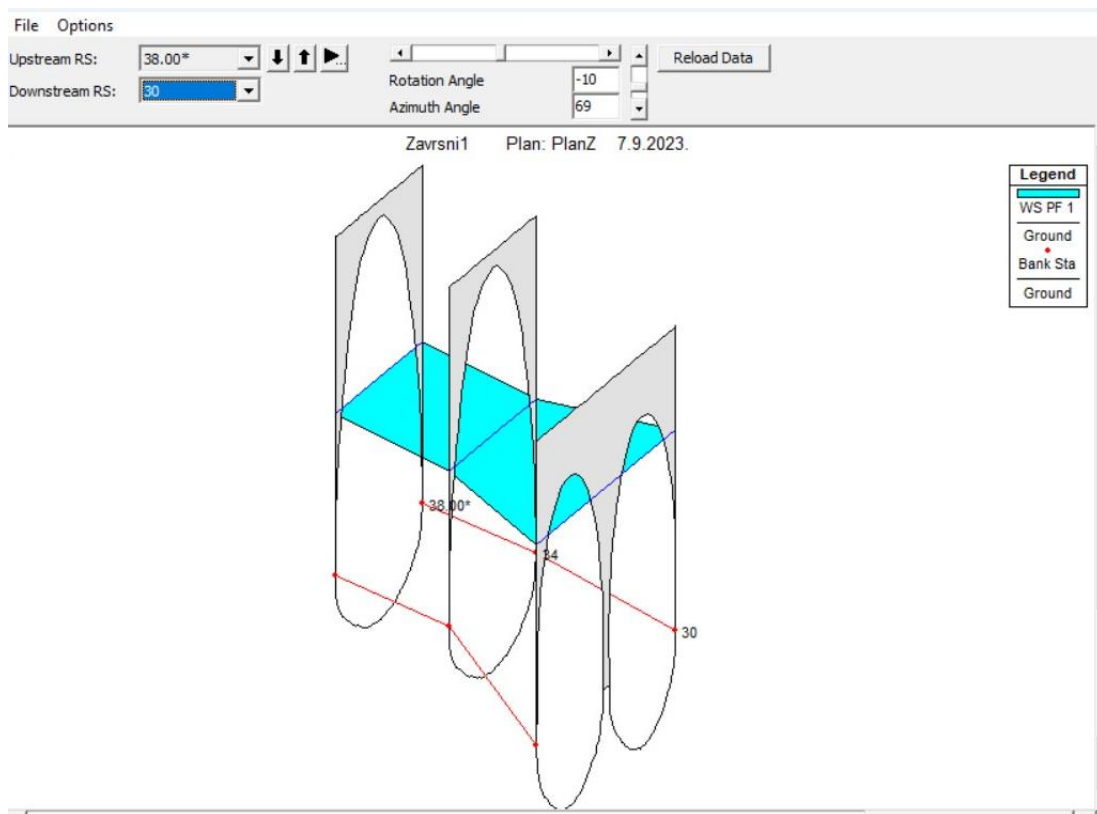
Finalni izgled kanala je prikazan na slici 5.9. gdje interpolirani presjeci su označeni s \*. Kanal ima kontinuirani poprečni presjek od profila 186 do profila 34, dio kanala je prikazan na slici 5.6., nakon kojega se kanal širi te započinje novi poprečni presjek od profila 30 do 0 koji je prikazan na slici 5.7., račvanje kanala od profila 34 do profila 30 je približe prikazano na slici 5.8..Finalni izgled kanala je prikazan na slici 5.9. gdje su interpolirani presjeci označeni s \*.



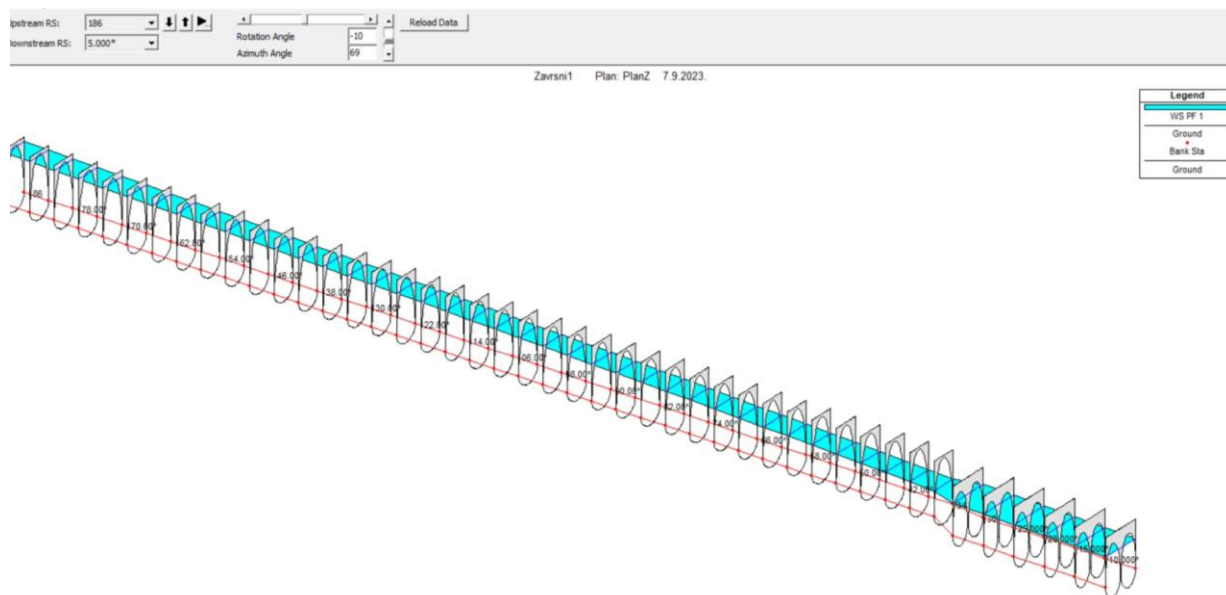
Slika 5.6. Prikaz poprečnog presjeka ulaznog dijela kanala



Slika 5.7. Prikaz poprečnog presjeka izlaznog dijela kanala



Slika 5.8. Prikaz račvanja odvodnog kanala



Slika 5.9. Finalni izgled odvodnog kanala

## 5.2. Postavke simulacije

Za izradu simulacije potrebno je definirati nagib kanala koji se određuje uz pomoć bočnog pogleda profila prikazanog na slici 5.10.. Očituje se visina kreiranog kanala na lijevom i desnom kraju te dijeli sa ukupnom duljinom.

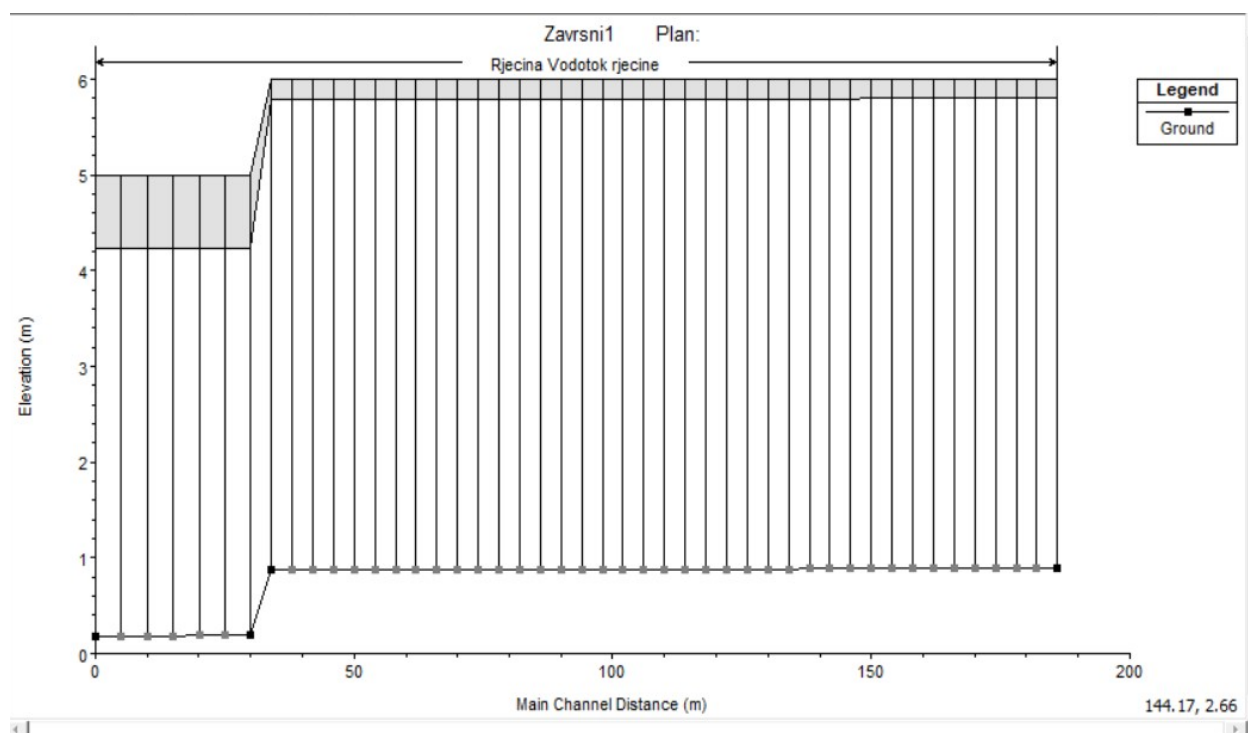
$$s = \frac{(e_d - e_l)}{l} = \frac{(5,8 - 4,2)}{186} = 0,008 \text{ m}$$

$s$  - označava nagib [m]

$e_d$  - označava desnu visinu kanala [m]

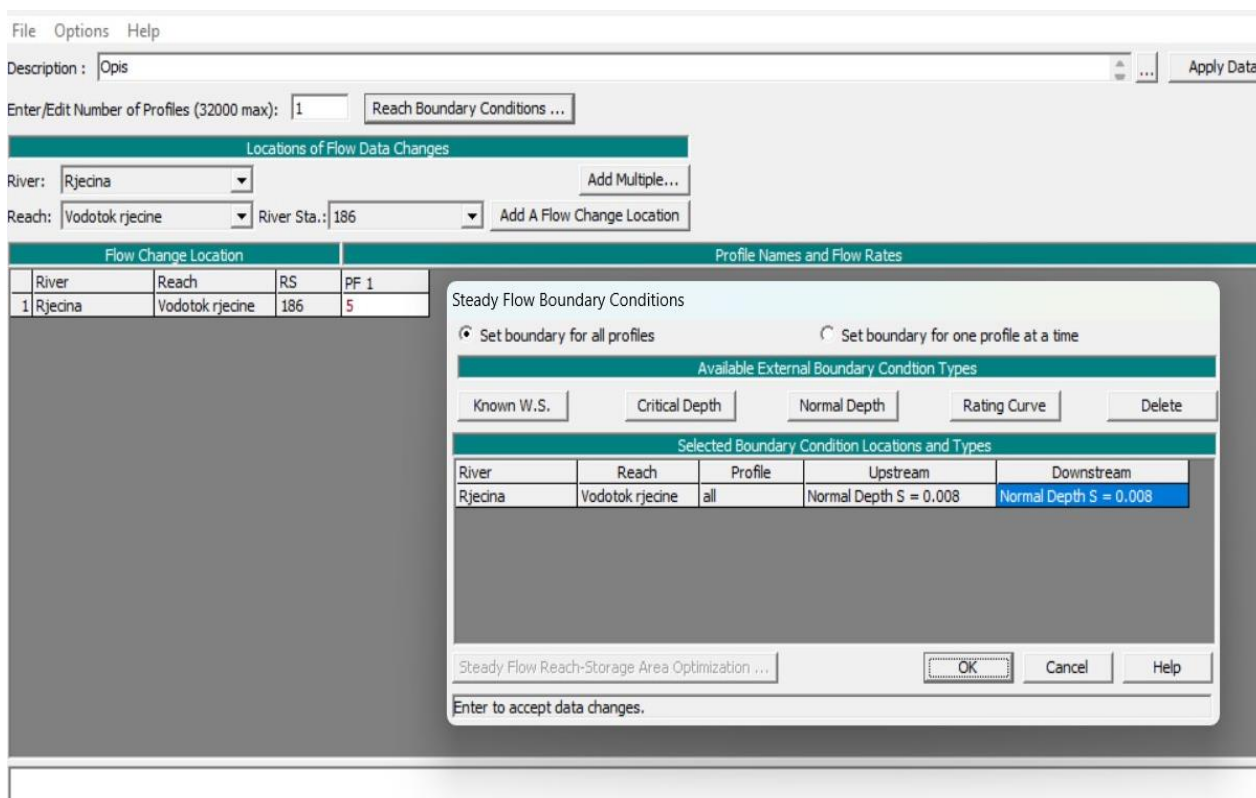
$e_l$  - označava lijevu visinu kanala [m]

$l$  - označava duljinu kanala [m]



Slika 5.10.Bočni prikaz kanala

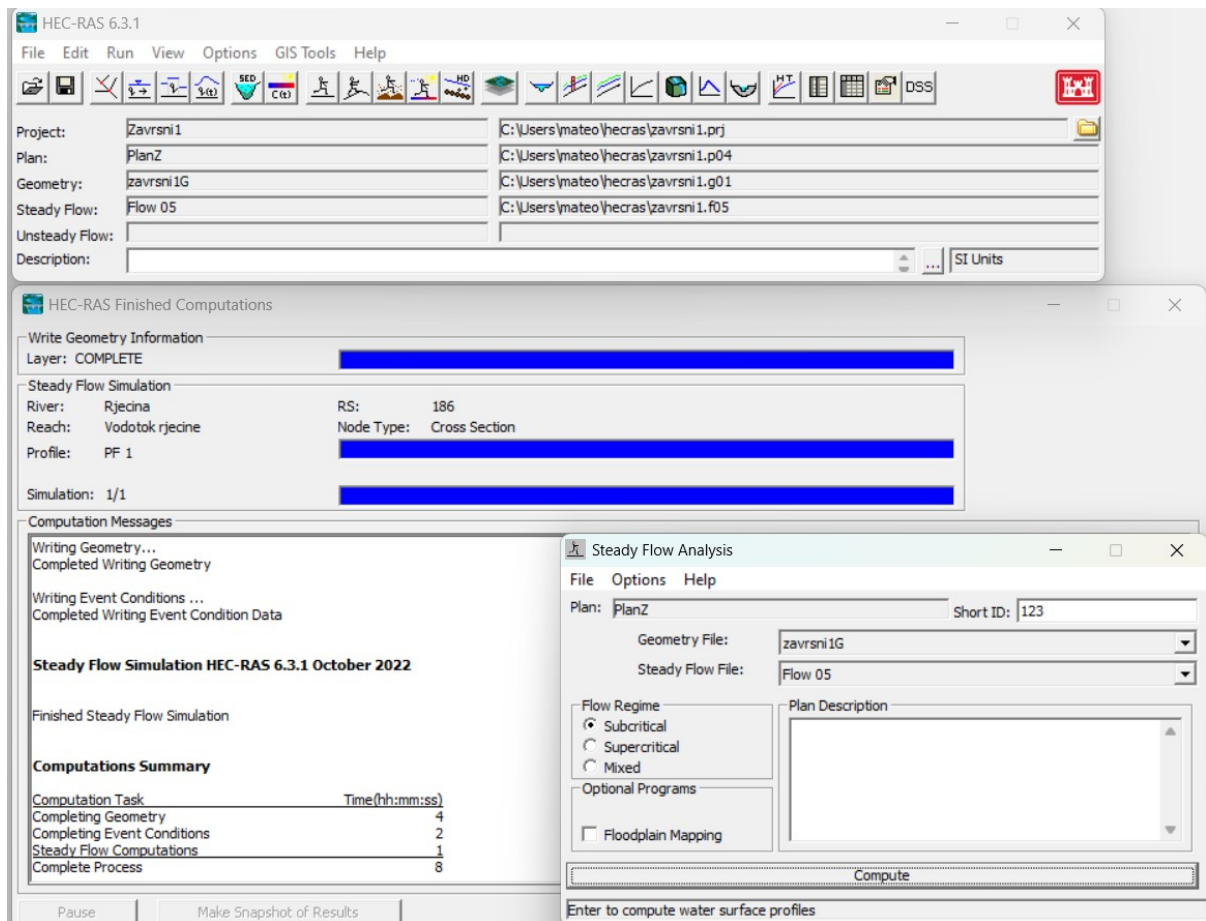
Nakon što je određen nagib kanala, sljedeći korak je pomoću naredbe „Reach boundary conditions“ unijeti dobiveni nagib pod „Normal depth“ za nizvodnu i uzvodnu stanicu definiranog profila te zatim upisati željeni protok kroz kanal kao što vidimo na slici 5.11. Normalna dubina označava dubinu protoka u kanalu kada je nagib vodene površine i dna kanala isti, dok je dubina vode konstanta. Prilikom određivanja normalne dubine pretpostavljamo da fluid teče uvjetima normalnog toka. Normalna dubina je izračunata sa potrebnim parametrima te iznosi 0,008.



Slika 5.11. Definiranje protoka i uvjeta simulacije

Zatim slijedi pokretanje simulacije pritiskom na naredbu „Run“ i zatim „Steady flow analysis“ gdje se određuje način protoka sa „Flow regime“ i odabire geometrija i protok sa slike 5.12.

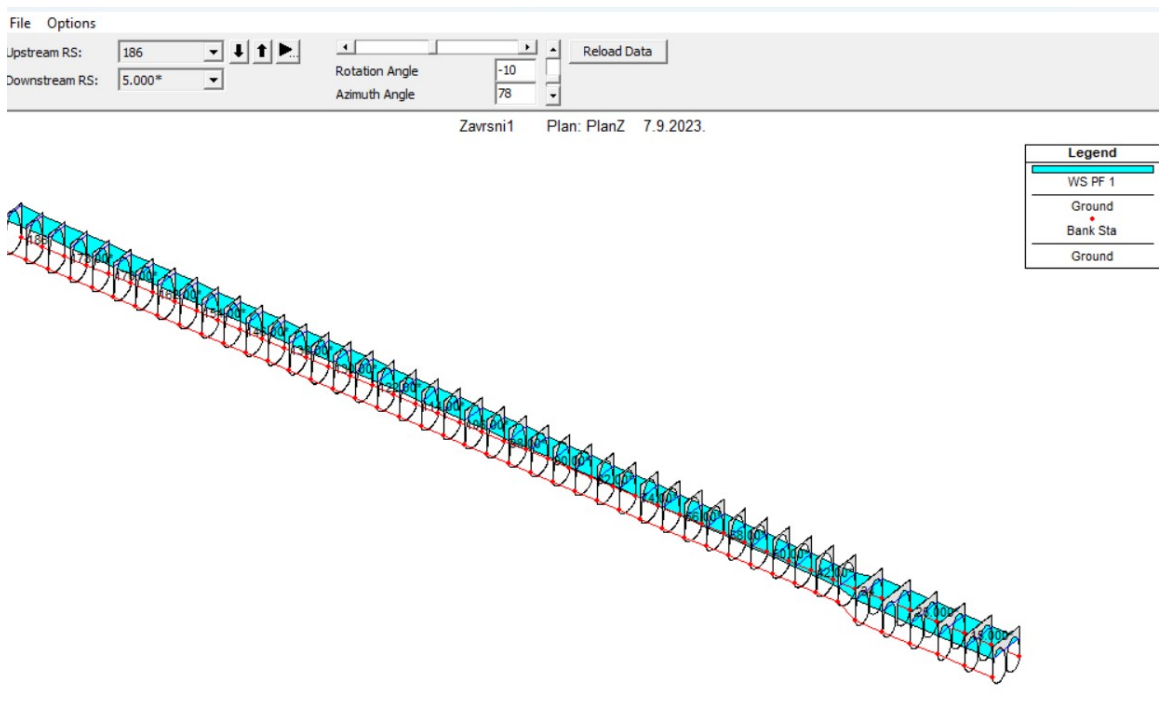
U numeričkoj simulaciji su korišteni protoci od  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $11.2 \text{ m}^3/\text{s}$ .



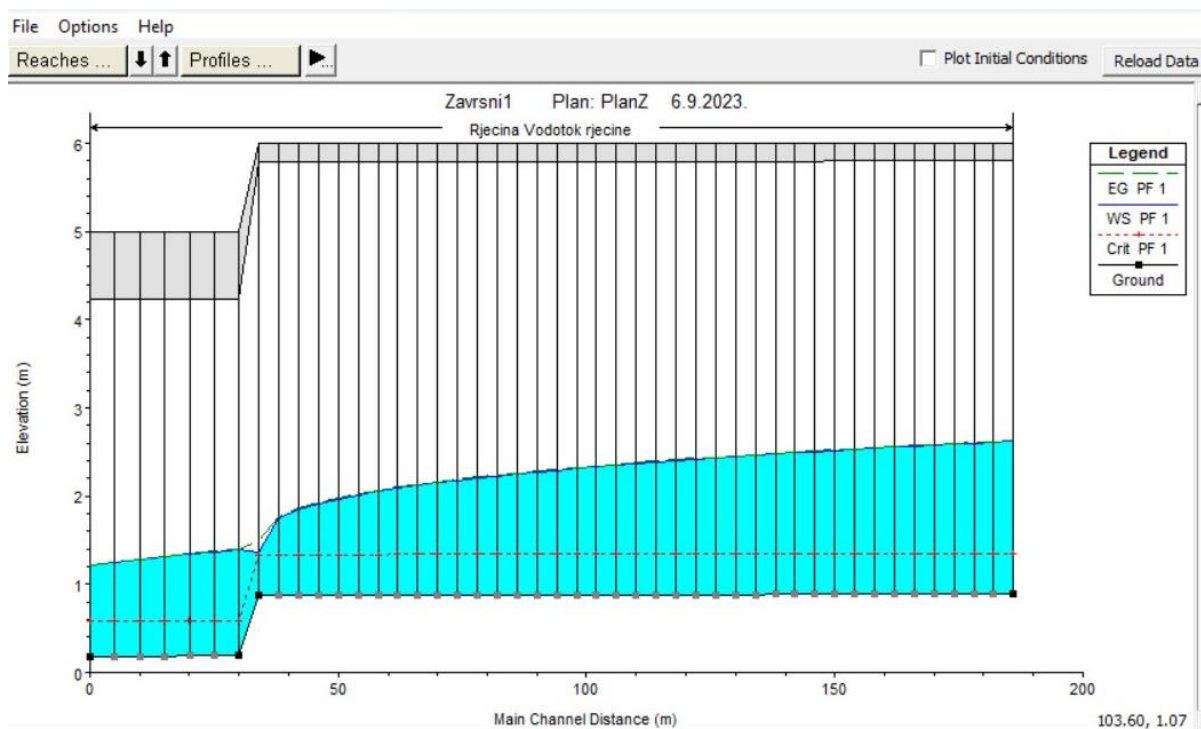
Slika 5.12. Završni dio simulacije

## 6. REZULTATI

Rezultati prikazuju strujanje fluida kroz odvodni kanal te način kretanja i količinu fluida kroz različite presjeke. Slika 6.1. prikazuje cijeli odvodni kanal po presjecima te strujanje fluida kroz njega protoka  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , dok slika 6.2. je bočni prikaz odvodnog kanala.

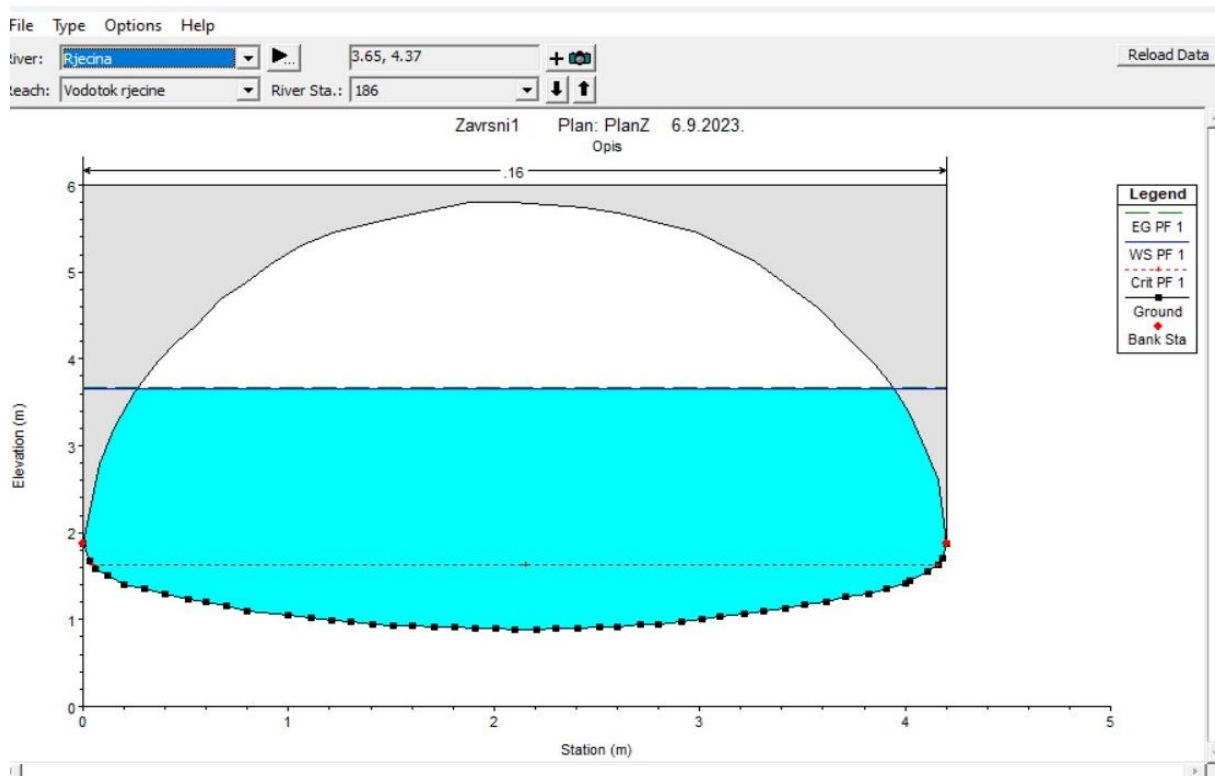


Slika 6.1. Prikaz cijelog odvodnog kanala

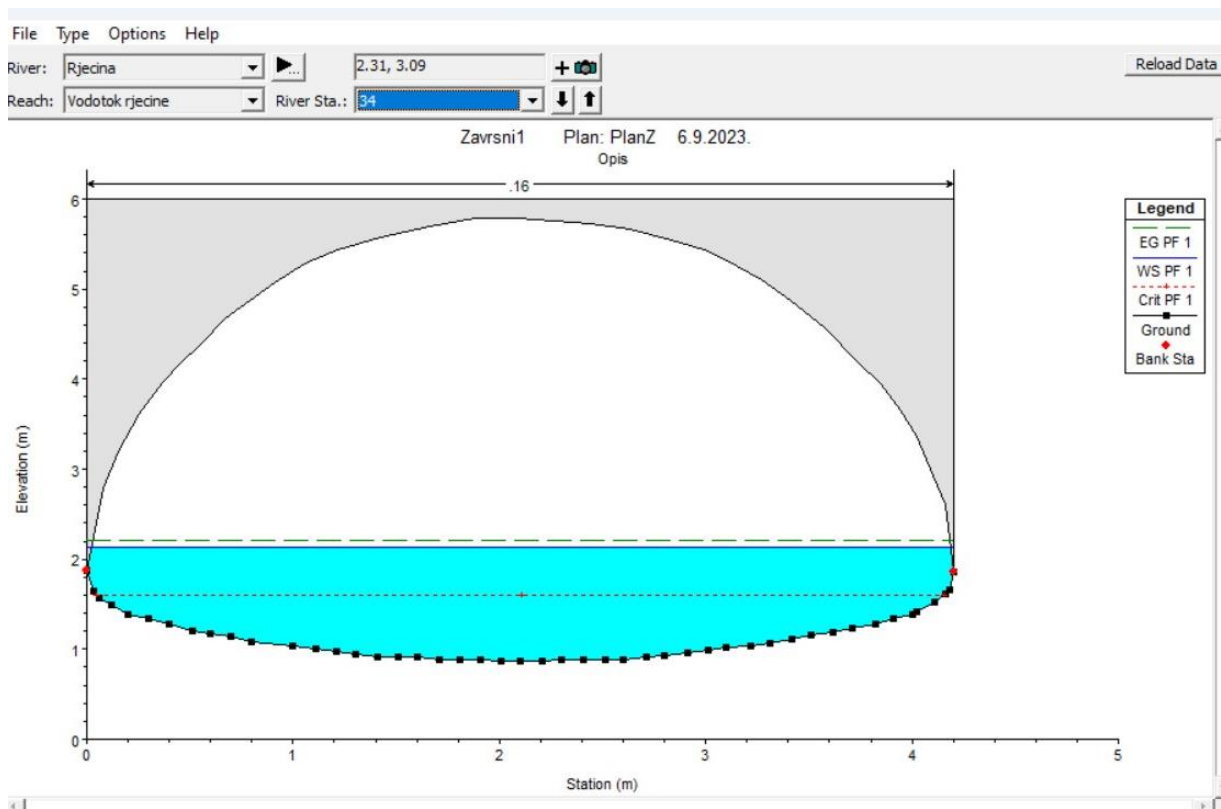


Slika 6.2. Bočni prikaz odvodnog kanala

Slika 6.3. i slika 6.4. prikazuju kretanje fluida protoka  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ , kroz presjeke profila 184 do profila 34, gdje profil 184 predstavlja najviši profil dok profil 34 predstavlja najniži dio tog profila.

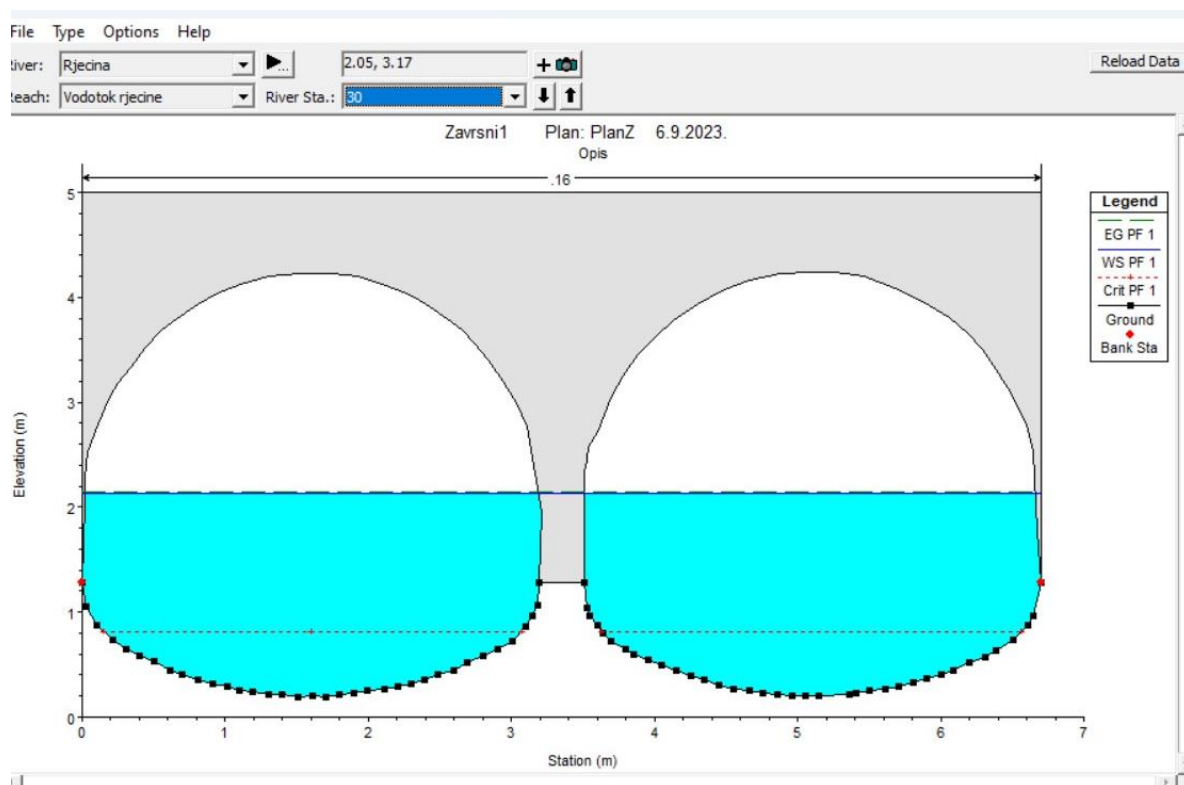


*Slika 6.3. Presjek profila 184*

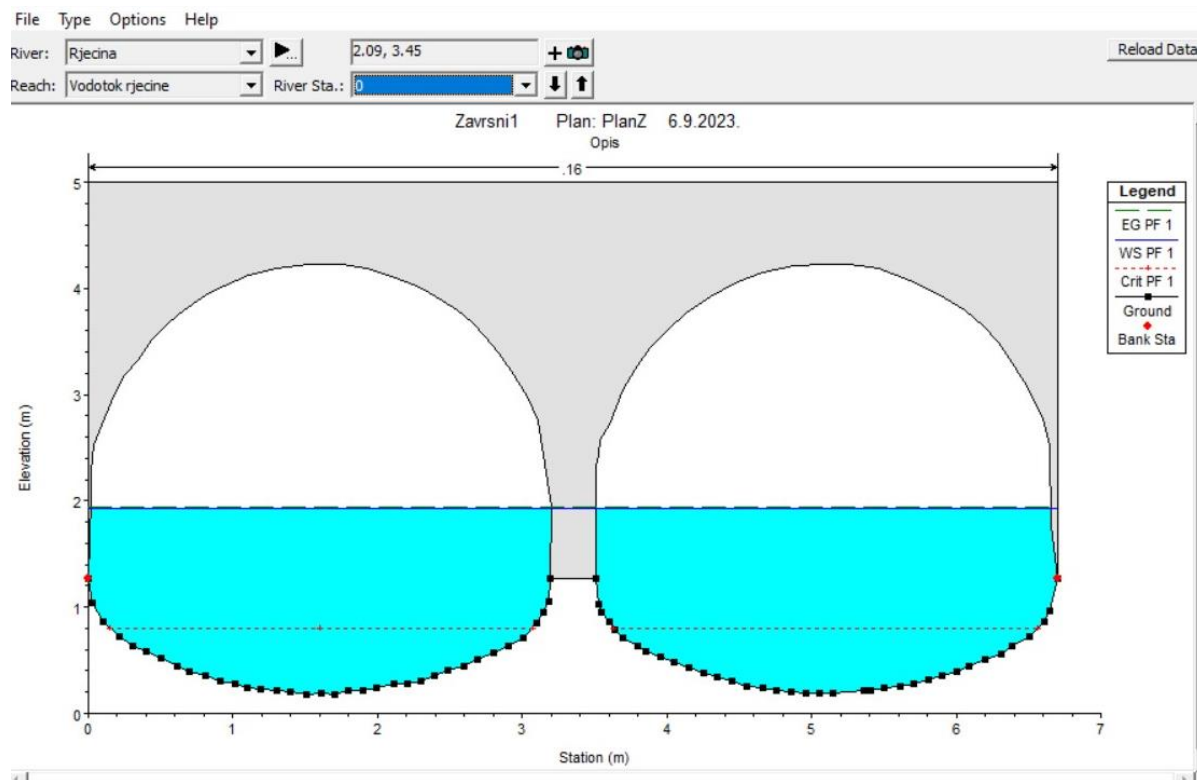


*Slika 6.4. Presjek profila 34*

Slika 6.5. i slika 6.6. prikazuju nastavak kretanja fluida kroz presjeke profila 30 do profila 0.



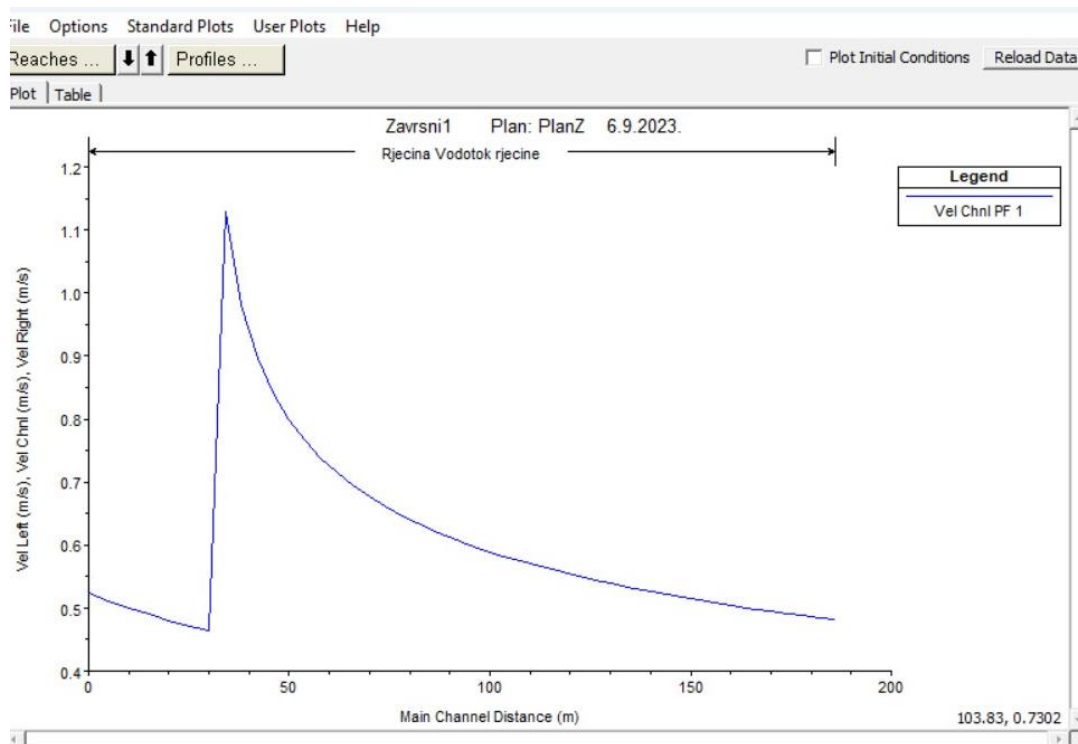
*Slika 6.5. Presjek profila 30*



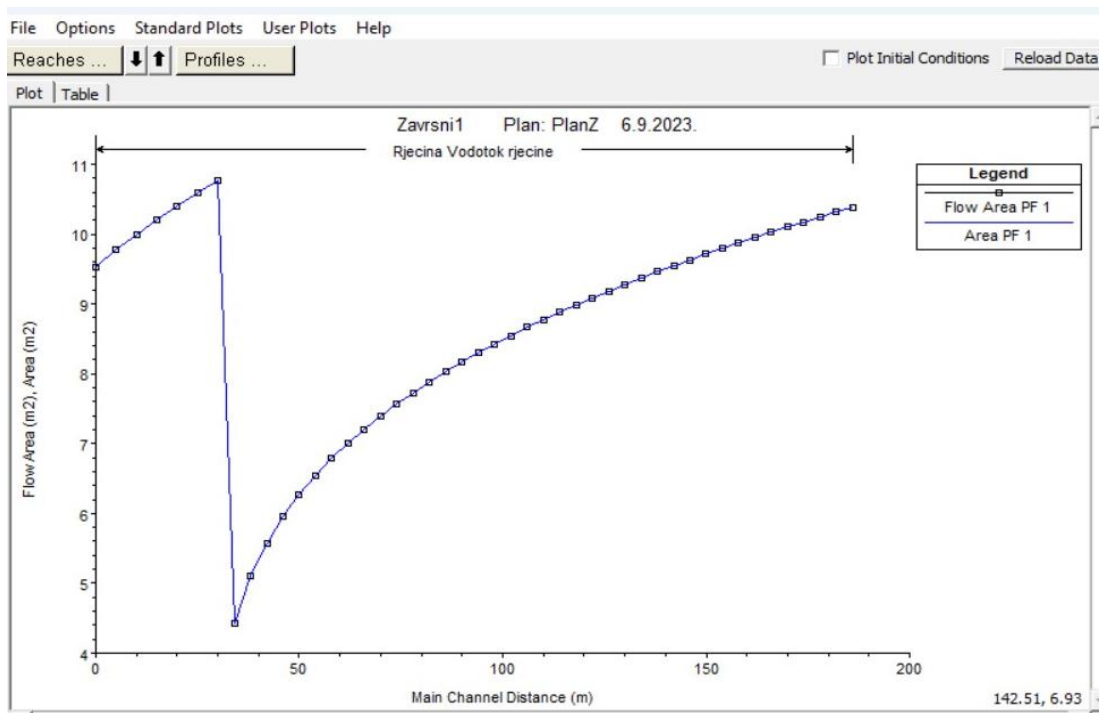
*Slika 6.6. Presjek profila 0*



Slike 6.7. prikazuju brzinu strujanja fluida kroz kanal gdje vidimo da brzina postepeno raste od profila 184 do profila 34 gdje naglo pada radi povećanja profila.



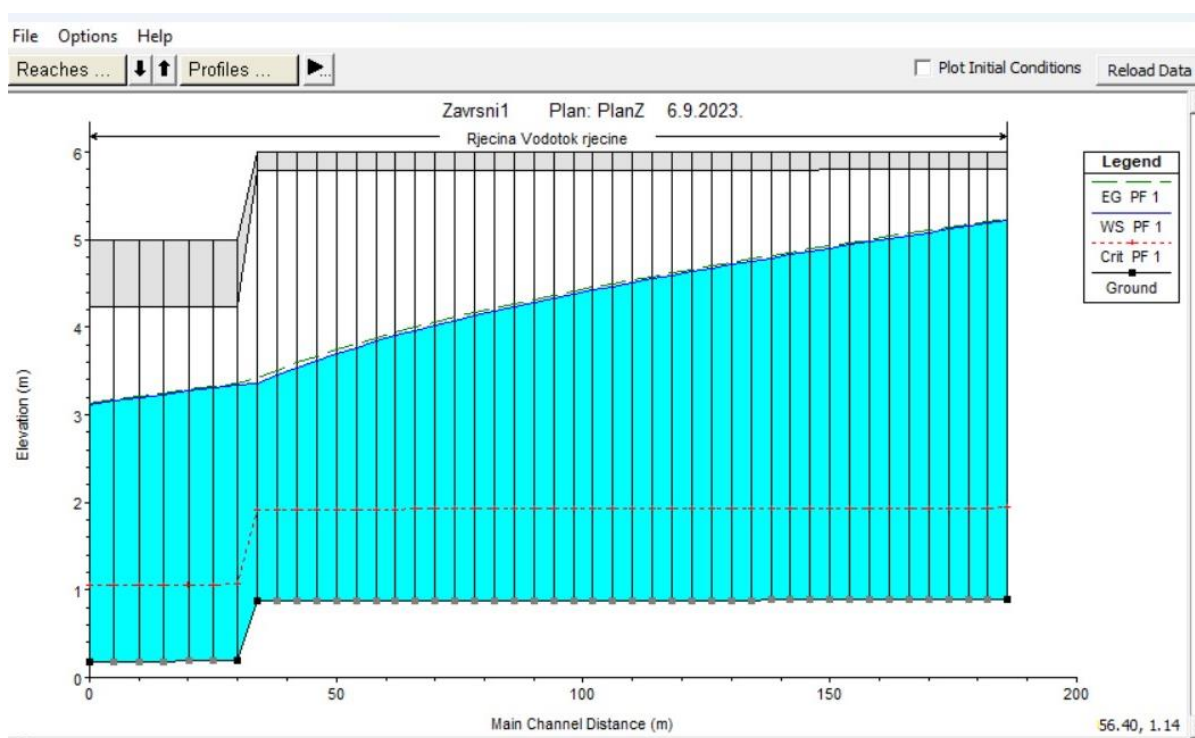
Slika 6.7. Graf strujanja fluida



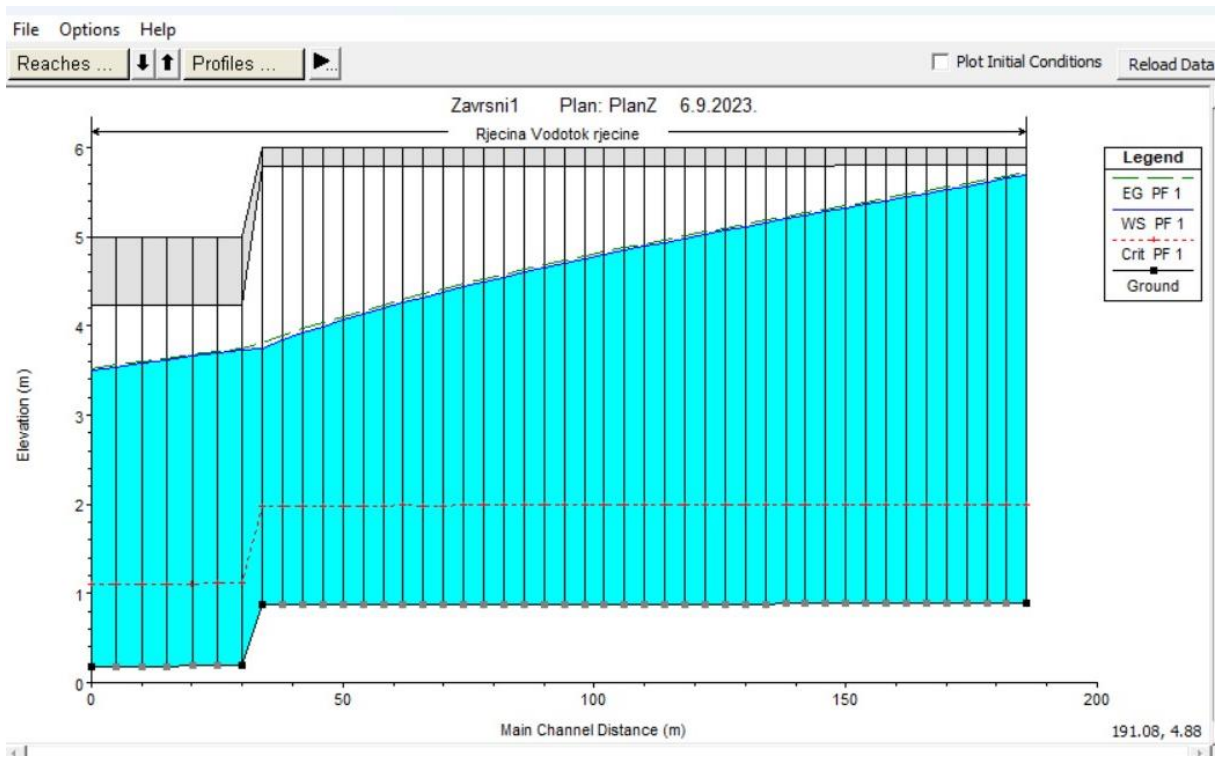
6.8. Graf površine vode kroz odvodni kanal

Iz grafa brzina prikazan na slici 6.7. zaključujemo da, brzina ulaznog fluida kroz kanal postepeno raste te dostiže maksimalnu vrijednost pred dolazak u izlazni dio kanala gdje brzina naglo pada te zatim sporo raste sve do izlaza. Graf površine vode prikazan na slici 6.8. te je obrnut grafu brzina fluida te sporo pada od ulaznog dijela i dostiže minimum u točki pred odvajanja odvodnog kanala gdje površina naglo raste što bi značilo da brzina naglo pada.

U slikama 6.9. i 6.10. je prikazana promjena vodnog lica kroz odvodni kanal. Visina odvodnog kanal se kreće od 0,85 m do 5,8 m, nakon visine od 5,8 m kanal ne može podnijeti veću količinu ulaznog fluida.



*Slika 6.9.Bočni prikaz pri protoku od 10 m/s*



*Slika 6.10.Bočni prikaz pri protoku od 11.2 m/s*

## 7. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog završnog rada bila je izrada geometrije i numerička analiza strujanja fluida u odvodnom kanalu HE Rijeka. U prvom dijelu rada napravila se podjela hidroelektrana prema njihovoj instaliranoj snazi i prema regulaciji protoku koji koriste hidroelektrane. Objasnjen je princip rada pojedine hidroelektrane te su navedene prednosti i mane za svaku. Zatim je napravljen teoretski pregled dijelova hidroelektrane te je objašnjena njihova uloga i svrha u sustavu. U zadnjem dijelu opisuje se korišteni program za ovaj završni rad, HEC RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System). Navedeni program omogućuje nam izradu geometrije i numeričke analize strujanja fluida. Simulacija nam omogućuje prikaz kretanja fluida kroz kreirani odvodni kanal na temelju čega dovodimo zaključke o količini ulaznog fluida u kanal, brzini fluida te o geometriji samog kanala. Brzina fluida je u obrnuto proporcionalnom odnosu sa površinom vode, tj. brzina vode je najviša u točki račvanja te zatim naglo pada dok površina vode se ponaša obrnuto. Utjecaj na brzinu fluida i površinu vode uzrokuje promjena poprečnog presjeka u odvodnom kanalu. Promjena poprečnog presjeka omogućava siguran i učinkovit rad postrojenja. Uz pomoć svih podataka kojih nam pruža simulacija, određujemo ponašanje fluida kroz odvodni kanal pod navedenim stacionarnim uvjetima protoka te vrlo brzo i efikasno ukoliko rezultati nisu prihvatljivi prilagođavamo uvjete analize i samu geometriju.

## 8. LITERATURA

- [1] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrane\\_u\\_Hrvatskoj](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrane_u_Hrvatskoj)
- [2] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana\\_Rijeka](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Rijeka)
- [3] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:HE\\_Rijeka\\_presjek\\_brane.pdf](https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:HE_Rijeka_presjek_brane.pdf)
- [4] S interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana>
- [5] S interneta. <https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana#/media/>
- [6] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana#Akumulacijske\\_hidroelektrane](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana#Akumulacijske_hidroelektrane)
- [7] S interneta, <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-jug/he-peruca/1551>
- [8] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Reverzibilne\\_hidroelektrane](https://hr.wikipedia.org/wiki/Reverzibilne_hidroelektrane)
- [9] S interneta, <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-jug/rhe-velebit/1546>
- [10] S interneta, <https://www.heritage.org/asia/commentary/what-the-potential-crisis-t>
- [11] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Velike\\_hidroelektrane](https://hr.wikipedia.org/wiki/Velike_hidroelektrane)
- [12] S interneta, <https://www.afrik21.africa/en/ghana-bpa-commissions-a-mini-hydroe>
- [13] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Male\\_hidroelektrane](https://hr.wikipedia.org/wiki/Male_hidroelektrane)
- [14] S interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/Micro\\_hydro](https://en.wikipedia.org/wiki/Micro_hydro)
- [15] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Male\\_hidroelektrane](https://hr.wikipedia.org/wiki/Male_hidroelektrane)
- [16] S interneta, <https://peeda.net/activity/pico-hydropower-promotion-project/>
- [17] S interneta, <https://peeda.net/activity/pico-hydropower-promotion-project/>
- [18] S interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana#/media/Datoteka>
- [19] S interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana>
- [20] S interneta, <https://www.ica.org/energy-system/renewables/hydroelectricity>
- [21] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Provodnici\\_vode](https://hr.wikipedia.org/wiki/Provodnici_vode)
- [22] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Provodnici\\_vode#/media](https://hr.wikipedia.org/wiki/Provodnici_vode#/media)
- [23] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Tla%C4%8Dni\\_cjevovod](https://hr.wikipedia.org/wiki/Tla%C4%8Dni_cjevovod)
- [24] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Tla%C4%8Dni\\_cjevovod](https://hr.wikipedia.org/wiki/Tla%C4%8Dni_cjevovod)

- [25] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodna\\_komora](https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodna_komora)
- [26] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodna\\_komora](https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodna_komora)
- [27] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Podzemna\\_strojarnica](https://hr.wikipedia.org/wiki/Podzemna_strojarnica)
- [28] S interneta, <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane>
- [29] S interneta, <https://www.techtarget.com/whatis/definition/turbine>
- [30] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Francisova\\_turbina](https://hr.wikipedia.org/wiki/Francisova_turbina)
- [31] S interneta, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=25402>
- [32] S interneta, <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=25402>
- [33] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Provodnici\\_vode](https://hr.wikipedia.org/wiki/Provodnici_vode)
- [34] S interneta, <https://www.hydro.org/policy/technology/small-hydro/>
- [35] S interneta, <https://www.researchgate.net/figure/Flood-simulation-durin>
- [36] S interneta, <https://en.wikipedia.org/wiki/HEC-RAS>

## 9. POPIS OZNAKA I KRATICA

HE - hidroelektrana

RHE - reverzibilna hidroelektrana

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

$\eta$  - stupanj iskoristivosti [%]

$P$  - dobivena snaga struje i električna [W]

$q$  - raspoloživi volumni protok vode [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$g$  - ubrzanje sile teže [ $\text{m/s}^2$ ]

$h$  - visina vodenog stupca, to jest raspoloživi vodeni pad [m]

$s$  - označava nagib [m]

$e_d$  - označava desnu visinu kanala [m]

$e_l$  - označava lijevu visinu kanala [m]

$l$  - označava duljinu kanala [m]

## **10. SAŽETAK**

U ovom završnom radu opisan je princip rada hidroelektrana, te svrha i uloga pojedinih dijelova hidroelektrane. Navedene su i objašnjene podjele hidroelektrana prema instaliranoj snazi te prema regulaciji protoka. Zatim je opisan korišteni program HEC RAS, u kojem je kreirana geometrija odvodnog kanala te provedena analiza strujanja fluida. Prikazan je proces kreiranja geometrije kanala, te proces izrade simulacije uz unošenje i izračun odgovarajućih parametara. Rezultati simulacije su grafički prikazani.

Ključne riječi: Hidroelektrane, odvodni kanal, HEC RAS



## **11. ABSTRACT**

This final paper describes the principle of operation of hydroelectric power plants, as well as the purpose and role of individual parts of the hydroelectric power plant. The divisions of hydropower plants according to installed power and according to flow regulation are listed and explained. Next, the used HEC RAS program is described, in which the drainage channel geometry was created and the fluid flow analysis was carried out. The process of creating the geometry of the channel, as well as the process of creating a simulation with entering and calculating the appropriate parameters, are shown. The simulation results are shown graphically.

Keywords: Hydropower plants, drainage channel, HEC RAS