

# IZRADA GEOMETRIJE I NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA FLUIDA U ODVODNOM KANALU HE RIJEKA TIP 2

---

Čuljat, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:190:298912>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-18**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U RIJECI**

**TEHNIČKI FAKULTET**

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

**IZRADA GEOMETRIJE I NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA FLUIDA U  
ODVODNOM KANALU HE RIJEKA TIP 2**

U Rijeci, srpanj 2024.

Luka Čuljat

0069084504

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**

**TEHNIČKI FAKULTET**

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

**IZRADA GEOMETRIJE I NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA FLUIDA U  
ODVODNOM KANALU HE RIJEKA TIP 2**

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

U Rijeci, srpanj 2024.

Luka Čuljat

0069084504

Rijeka, 15. ožujka 2022.

Zavod: Zavod za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo  
Predmet: Hidraulički strojevi  
Grana: 2.15.04 mehanika fluida

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

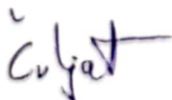
Pristupnik: **Luka Čuljat (0069084504)**  
Studij: Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Zadatak: **Izrada geometrije i numerička analiza strujanja fluida u odvodnom kanalu HE Rijeka tip 2 / Geometry creation and numerical analysis of flow of discharge system for HE Rijeka type 2**

### Opis zadatka:

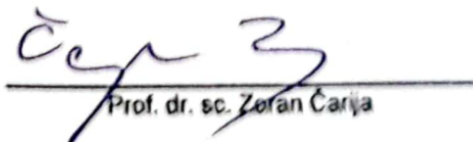
U radu je potrebno izraditi model odvodnog sustava HE Rijeka te te analizirati strujanje fluida upotrebom alata za numeričku analizu toka fluida. Numerički model analiziranog sustava mora obuhvatiti sve bitne elemente sustava koji utječu na tok fluida. Potrebno je provesti numeričke analize za različite uvjete strujanja fluida.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koja su objavljene na mrežnim stranicama studija.



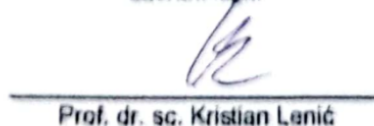
Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam završni rad naslova „Izrada geometrije i numerička analiza strujanja fluida u odvodnom kanalu HE Rijeka tip 2“ pod vodstvom prof. dr. sc. Zoran Čarija izradio samostalno, koristeći stečeno znanje tijekom prijediplomskog sveučilišnog studija Tehničkog Fakulteta u Rijeci te navedenu literaturu.

Rijeka, srpanj 2024.

Luka Čuljat

0069084504

## **ZAHVALA**

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

# Sadržaj

1.	UVOD .....	1
2.	OPĆENITO O HIDROELEKTRANAMA .....	3
2.1.	Podjela hidroelektrana .....	5
2.1.1.	Podjela prema instaliranoj snazi.....	7
3.	HIDROELEKTRANA RIJEKA .....	9
3.1.	Općenito o hidroelektrani Rijeka.....	9
3.1.1.	Tlačni cjevovod .....	10
3.1.2.	Vodna komora .....	10
3.1.3.	Strojarnica .....	11
3.1.4.	Odvodni kanal .....	14
4.	HEC-RAS.....	15
4.1.	Vladajući zakoni fizike .....	16
4.1.1.	Zakon o očuvanju mase.....	16
4.1.2.	Zakon o očuvanju količine gibanja .....	17
4.2.	Izrada geometrije odvodnog kanala u HEC RAS-u.....	20
4.2.1.	Definiranje profila u HEC RAS-u .....	22
4.3.	Izrada i postavke simulacije nestacionarnog strujanja.....	27
4.3.1.	Određivanje protoka .....	27
4.3.2.	Izrada simulacije u HEC RAS-u .....	28
5.	REZULTATI.....	33
6.	ZAKLJUČAK .....	40
7.	LITERATURA.....	41
8.	POPIS OZNAKA I KRATICA .....	42
9.	SAŽETAK .....	43
10.	ABSTRACT.....	44

# 1. UVOD

Obnovljivi izvori energije predstavljaju vrlo važnu komponentu u borbi protiv klimatskih promjena. Njihova široka primjena može značajno smanjiti emisije  $CO_2$ , čime se doprinosi održivoj budućnosti životne sredine. Na primjer, prema Međunarodnoj agenciji za obnovljivu energiju (IRENA), korištenjem obnovljivih izvora energije moguće je smanjiti globalne emisije stakleničkih plinova za oko 70% do 2050. godine. Globalno smanjenjem emisije  $CO_2$  moguće je dodatno poboljšati uz unaprjeđenje energetske učinkovitosti te tako direktno utjecati na izbjegavanje najgorih posljedica klimatskih promjena. Hidroenergija ili energija voda najzastupljeniji je obnovljivi izvor energije u Republici Hrvatskoj što znači da hidroelektrane trebamo unaprjeđivati što je više moguće. Hidroelektrane proizvode električnu energiju koristeći energiju vode bez emisije  $CO_2$  tokom rada. Mogu zamjeniti velike količine fosilnih goriva u proizvodnji električne energije iako izgradnja brane može uključivati emisije  $CO_2$ , operativna faza hidroelektrana je praktično bez štetnih plinova.

Hidroelektrane su pouzdan obnovljiv izvor energije u elektroenergetskom sustavu s velikom mogućnošću prilagođavanja potrebama sustava. Republika Hrvatska u svome pogonu ima 17 velikih i oko 20 malih hidroelektrana. Hidroelektrane u Hrvatskoj čine više od 50% ukupnog broja elektrana što i ne čudi s obzirom da Hrvatska ima veliki hidropotencijal.

Hidroelektrana Rijeka smještena je na rijeci Rječini, u gradu Rijeci, u Republici Hrvatskoj. Gradnja hidroelektrane započeta je 1919. godine, a završena je 1933. godine. Primarni cilj izgradnje elektrane bila je proizvodnja električne energije za industriju i kućanstva u Rijeci. Hidroelektrana iskorištava vodotok tj. prirodan pad rijeke Rječine za pokretanje turbina ukupne snage 20 MW. Hidroelektrana Rijeka, kao i svaka druga hidroelektrana sastoji se od osnovnih dijelova: akumulacije, brane, dovodnog tunela, strojarnice u kojoj se nalaze turbine i generatori, te odvodnog sustava.

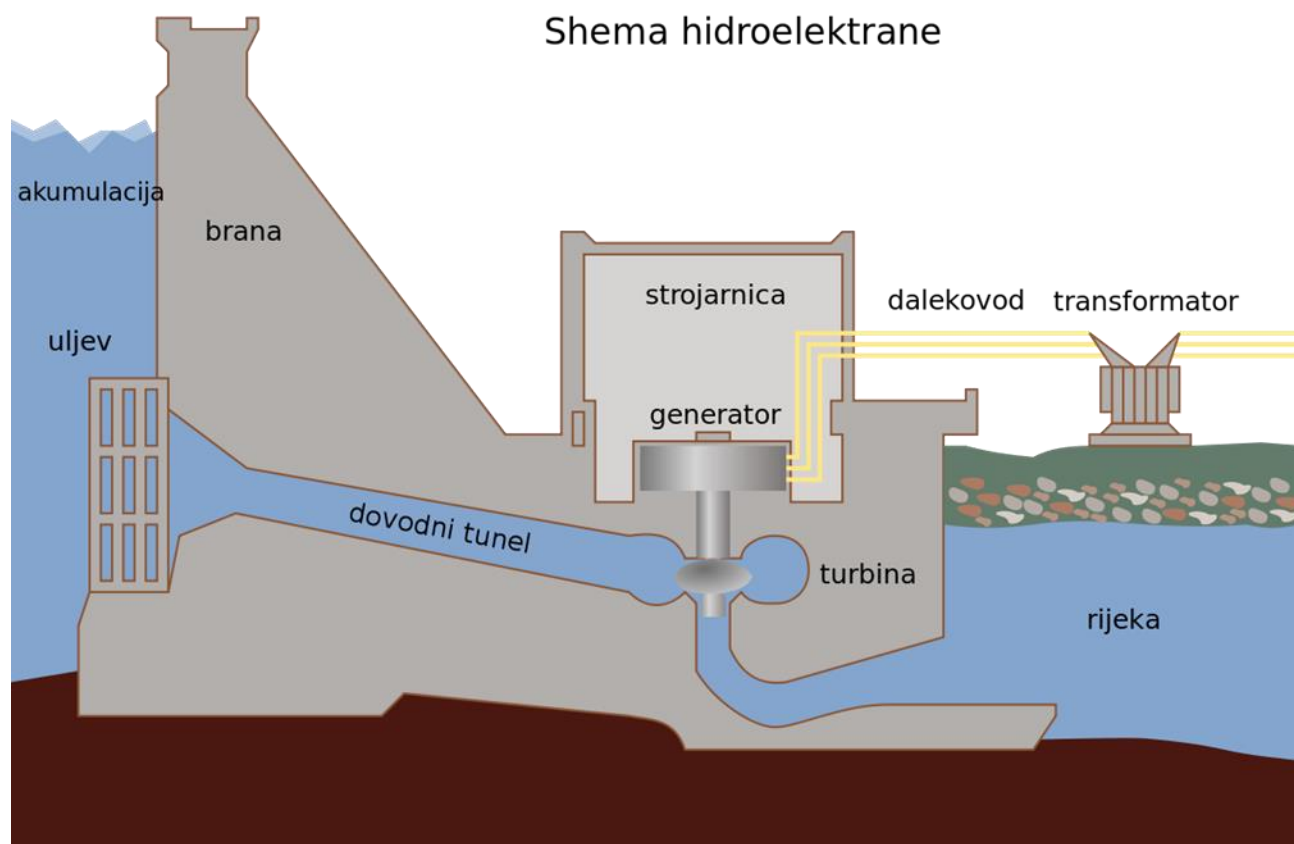


Temeljno promatranje ovoga Završnog rada je odvodni sustav HE Rijeka. U prvome dijelu rada opisane su hidroelektrane, a zatim detaljnije sama HE Rijeka. Ostatak rada opisuje izradu geometrije odvodnog kanala HE Rijeka te numeričku analizu tečenje fluida kroz isti. U radu su kao alat korišteni programi AutoCad i HEC-RAS. AutoCad je bio najadekvatniji alat za izradu geometrije u 2D obliku tj. za pronalazak x i y koordinata pomoću kojih je kasnije opisana geometrija u HEC RAS-u. U HECRAS-u je definirana geometrija odvodnog kanala (koja će biti korištena u samoj numeričkoj simulacija strujanja fluida ) i izvršena numerička analiza strujanja.

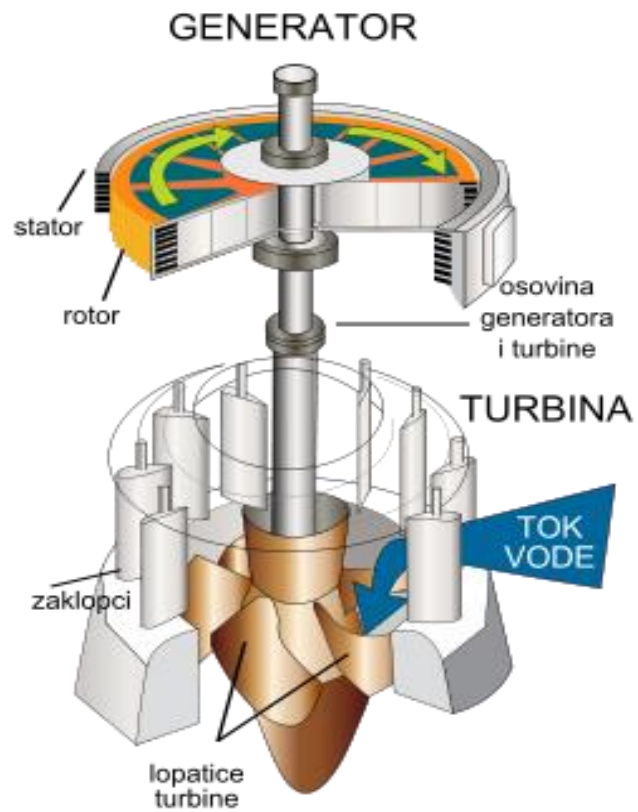
U drugom poglavlju rada napravljena je podjela hidroelektrana i prikazane su općenite informacije o načinu rada hidroelektrane kao i shema njezina postrojenja. Treće poglavlje opisuje HE Rijeka te dodatno pojašnjava dijelove iste uz pomoć teksta i grafičkih prikaza. Četvrto poglavlje opisuje računalni program za simulaciju strujanja HEC RAS, vladajuće fizikalne zakone koje koristimo prilikom promatranja strujanja fluida, opisuje izradu geometrije odvodnog kanala i simulaciju strujanja u HEC RAS-u. Peto poglavlje prikazuje dobivene rezultate simulacije. U završnom poglavlju dan je zaključak provedenog rada.

## 2. OPĆENITO O HIDROELEKTRANAMA

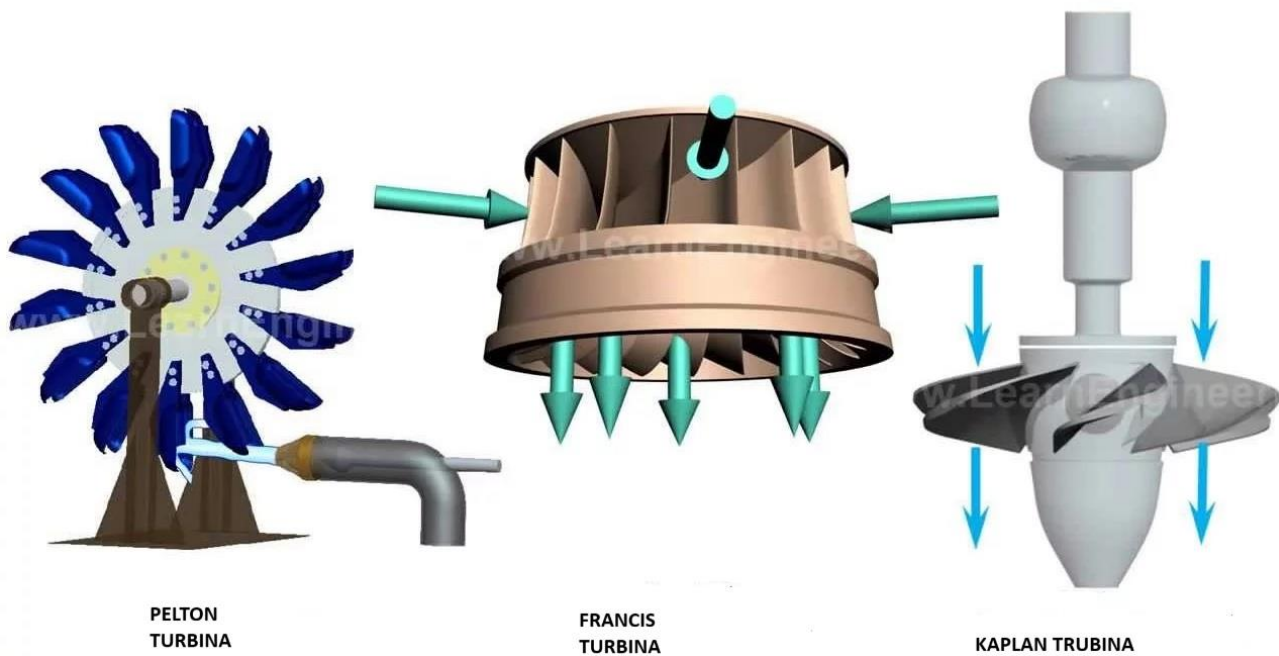
Hidroelektrana proizvodno je postrojenje čiji sastav čini barem jedna proizvodna jedinica za pretvorbu hidropotencijala u električnu energiju kao na slici 2.1. Transformacija potencijalne/kinetičke energije vode kod hidroelektrane odvija se korištenjem vodnih turbina. Vodne turbine pretvaraju energiju vode u mehaničku energiju koja se vratilom prenosi do generatora gdje prelazi u elektromagnetskom polju u električnu energiju kao na slici 2.2. U ovisnosti o visini pada hidroelektrana može imati jedan od tri različita tipa vodnih turbina koje su prikazane na slici 2.3. To su Kaplanova turbina za niske padove (do 40 metara), Francisova turbina za srednje padove (do 200 metara) i Peltonova turbina za visoke padove (preko 200 metara).



Slika 2.1. Shema hidroelektrane (Izvor: hr.wikipedia.org)



Slika 2.2. 3D prikaz spoja turbine i generatora (Izvor: hr.wikipedia.org)



Slika 2.3. Prikaz nastrujavanja vode na lopaticice vodnih turbina (Izvor: thoriumaplus.com)

## 2.1. Podjela hidroelektrana

Podjela hidroelektrana prema protoku sadrži dva osnovna tipa te jedan specifičan, a to su: protočne, akumulacijske i reverzibilne hidroelektrane. Protočne hidroelektrane su one čija se uzvodna akumulacija može isprazniti za manje od dva sata rada kod nazivne snage (Slika 2.4.). Sukladno tome direktno ovise o prirodnim tokovima rijeka te direktno iskorištavaju kinetičku energiju vode kako ona dotječe. Akumulacijske hidroelektrane imaju vodnu branu i akumulacijsko jezero u kojemu se skuplja voda (Slika 2.5.). Njihova snaga ovisi direktno o visini vodenog stupca u jezeru. Vodu je moguće pustiti u dovodni cjevovod po potrebi te samim time akumulacijske hidroelektrane ne ovise direktno o prirodnim tokovima rijeka. Reverzibilne hidroelektrane imaju reverzibilne turbine koje vodu iz donje akumulacije pumpaju nazad u gornju akumulaciju (Slika 2.6.). Proces pumpanja vode u gornju akumulaciju događa se u satima kada nema vršnog opterećenja zbog uštede energije i raspoloživosti opterećenja u vršnim satima.



*Slika 2.4. Protočna HE Brežice, Slovenija (Izvor: energetika-net.com)*



*Slika 2.5. Akumulacijska HE Lešće (Izvor: hep.hr)*



*Slika 2.6. Reverzibilna HE Velebit (Izvor: hep.hr)*

### 2.1.1. Podjela prema instaliranoj snazi

Prema instaliranoj snazi hidroelektrane dijelimo na: velike, male, mikro i piko. Velike hidroelektrane iznimno su velike građevine i obično imaju snagu od nekoliko stotina MW do više od 20 GW. Najsnažnija velika hidroelektrana nalazi se u Kini i proizvodi 22,5 GW (Slika 2.7.) dok se u ostatku svijeta nalazi još samo sedam postrojenja s kapacitetom većim od 10 GW. Velike hidroelektrane imaju štetan utjecaj na okoliš koji je nemoguće izbjeći. Štetnost velikih hidroelektrana prisutna je kroz promjenu ekosustava (gradnja velikih brana), utjecaj na tlo, poplavljanje područja koja su prirodno suha.

Svrstavanje hidroelektrana u male može varirati u ovisnosti o zemlji gdje se nalazi, međutim u Europi se najčešće prihvaća kapacitet od 10 MW kao gornja granica instalirane snage za malu hidroelektranu. U Republici Hrvatskoj mala hidroelektrana određena je instaliranom snagom od 10 kW do 10 MW. Male hidroelektrane nemaju štetan utjecaj na okoliš u odnosu na velike i iziskuju znatno manja početna ulaganja kao i troškove održavanja. Stoga se nameću kao optimalno rješenje za mnoga geografska područja.

Mikro i piko hidroelektrane u pravilu najčešće imaju privatni značaj u odnosu na velike i male hidroelektrane koje imaju državni. Mikro hidroelektrane imaju instaliranu snagu do 100 kW i grade se za manje zajednice ili industrijska postrojenja jer se vrlo dobro nadopunjuju s ostalim obnovljivim oblicima izvora električne energije kao npr. solarne fotonaponske elektrane (Slika 2.8). Piko hidroelektrane imaju snagu do 5 kW i grade se najčešće za jedno ili nekoliko domaćinstava.

Snaga dobivena u hidroelektranama računa se prema izrazu:

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

gdje je:

$P$  – dobivena snaga struje [W]

$q$  – volumni protok vode [ $m^3/s$ ]

$\rho$  – gustoća vode [ $kg/m^3$ ]

$g$  – ubrzanje sile teže [ $m/s^2$ ]

$h$  – visina vodenog stupca [m]

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



*Slika 2.7. Velika hidroelektrana Tri klanca (Izvor: Jutarnji.hr)*



*Slika 2.8. Mikro hidroelektrana (Izvor: hr.wikipedia.org)*

### 3. HIDROELEKTRANA RIJEKA

#### 3.1. Općenito o hidroelektrani Rijeka

Hidroelektrana Rijeka visokotlačna je derivacijska hidroelektrana koje razvija snagu od 36,8 MW što ju svrstava u veliku hidroelektranu prema europskim standardima (slika3.1.). Za pogonjenje agregata koristi se vodotok rijeke Rječine. Vodotok Rječine je bujičnog karaktera sa srednjim godišnjim protokom od  $7,85 \text{ m}^3/\text{s}$ . Hidroelektrana Rijeka sastoji se od: akumulacije i brane, tlačnog cjevovoda, vodne i zasunske komore, strojarnice te samog odvodnog tunela. Strojarnica hidroelektrane nalazi se na koti 5 m n.m. dok je zahvat vode smješten nekoliko kilometara uzvodnije u koritu Rječine na koti 229,5 m n.m.. U strojarnici se nalaze dva agregata, od kojih se svaki sastoji od generatora i Francis turbine koji su međusobno spojeni vertikalnom osovinom. Ukupna raspoloživa nazivna snaga po agregatu iznosi 18,4 MW te se njome godišnje proizvede prosječno 84,45 GWh električne energije.



*Slika 3.1. Akumulacija i brana HE Rijeka (Izvor: hep.hr)*



### 3.1.1. Tlačni cjevovod

Svrha tlačnog cjevovoda je usmjeriti vodu s potencijalnom energijom prema turbinama pod visokim tlakom (Slika 3.2.). Voda iz akumulacije ulazi u cjevovod te se u njemu uslijed djelovanja gravitacijske sile pod visokim tlakom kreće prema strojarnici tj. turbinama. Potencijalna energija vode uz pomoć turbine pretvara se u kinetičku energiju.

Tlačne cjevovode možemo razlikovati prema nagibu cjevovoda, debljini stijenke i materijalima od kojih je izrađena cijev te po unutrašnjosti koja ima specifične slojeve za smanjenje trenja i korozije.

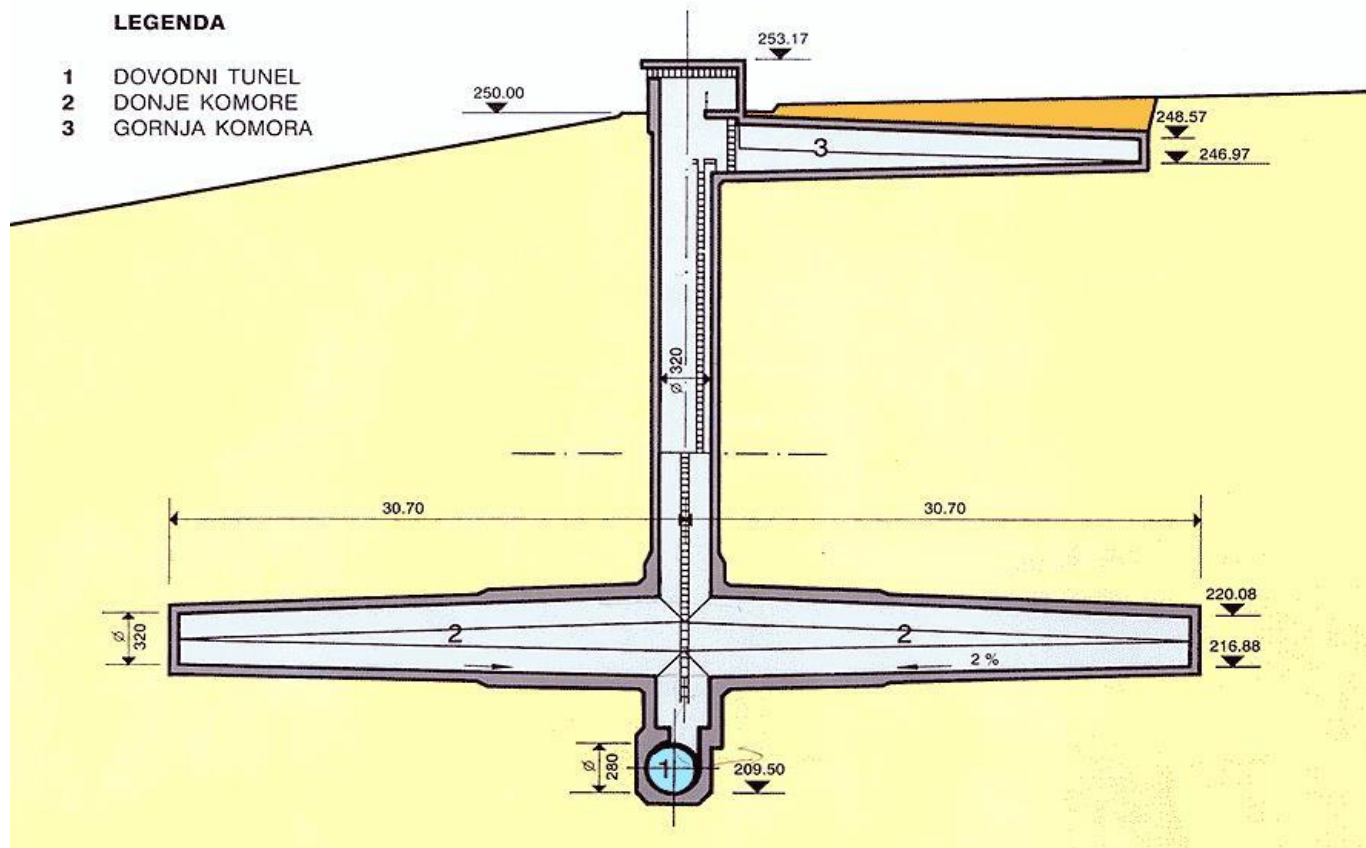


*Slika 3.2. Tlačni cjevovod HE Rijeka (Izvor: hr.wikipedia.org)*

### 3.1.2. Vodna komora

Funkcija vodne komore je održavanje sigurnosti i ravnoteže u sustavu (Slika 3.3). Nalazi se između dovodnog kanala i tlačnog cjevovoda. Namjena vodne komore je mogućnost postepenog reguliranja protoka i tlaka prije ulaska vode u tlačni cjevovod. Regulacija protoka i tlaka vrši se pomoću ventila i vrata koja u ekstremnim slučajevima mogu poslužiti kao bazen u kojemu se skladišti višak vode u sustavu. Bez mogućnosti prilagođavanja protoka i tlaka rad hidroelektrane bio bi podložan iznimno naglim promjenama tlaka koja mogu dovesti do havarije.

Postoji više vrsta vodnih komora kao npr. otvorene, zatvorene ili potpuno zatvorene komore. Otvorene vodne komore imaju otvore na vrhu pomoću kojih dolazi do izjednačavanja tlaka s okolinom, zatvorene komore su zapravo zatvorene strukture dok potpuno zatvorene komore imaju poklopac koji ih izolira od okoline tj. atmosfere.



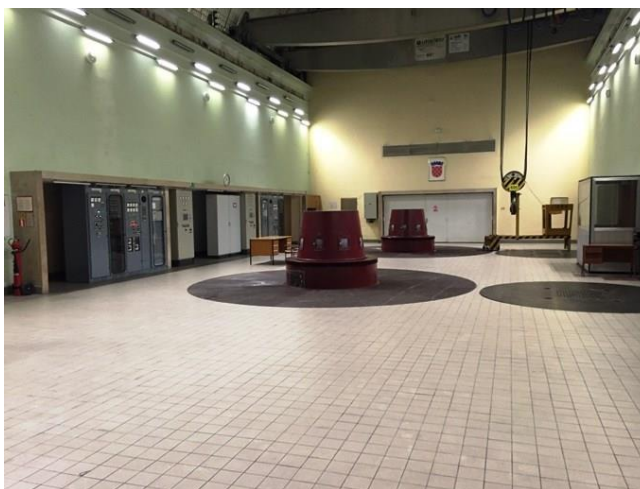
Slika 3.3. Vodna komora HE Rijeka (Izvor: hr.wikipedia.org)

### 3.1.3. Strojarnica

Strojarnica je centralno i najsloženije mjesto HE Rijeka (Slika 3.4.). Nalazi se na 5 m n.m. uz korito rijeke Rječine. Kao što je već navedeno strojarnica je opremljena s dvije Francisove turbine spojene na hidrogeneratore preko vertikalnog vratila. Važan dio strojarnice također je i kontrolna soba u kojoj se prate promjene tlaka, protoka vode, brzine vrtnje turbine, napona te ostalih parametara koje je nužno promatrati i korigirati po potrebi u svrhu neometanog i ispravnog rada hidroelektrane. Sustav upravljanja je automatiziran što znači da se mjerenja parametara mjere sensorima, a njihova korekcija radi se pomoću računala.

Francisova turbina najučestaliji je tip turbine koji se ugrađuje u pogone za proizvodnju električne energije. Kao i svaka druga vodna turbina, Francisova turbina hidraulički je gonjeni stroj koji potencijalnu energiju vode pretvara u kinetičku, a zatim tu kinetičku energiju u mehanički rad. Francisovu turbinu hidroelektrane Rijeka možemo svrstati u reakcijski tip turbine što znači da se dio pada tlaka odvija u statorskim lopaticama, a dio u rotorskim. Odnosno, tlak na ulazu u rotor veći je od tlaka na izlazu iz rotora. Osnovni dijelovi turbine su: spiralni dovod, stator, rotor ili radno kolo, difuzor ili odsisna cijev i ležajevi koji preuzimaju sile koje djeluju na vratilo turbine. Voda se dovodi tlačnim cjevovodom i jednolično se raspoređuje po obodu radnog kola pomoću spiralnog dovoda. Zakretanjem statorskih lopatica mijenja se protok kroz turbinu čime se vrši regulacija snage. Posljedica zakretanja statorskih lopatica jest promjena kuta strujanja fluida na lopatice rotora, što uzrokuje hidrodinamičke gubitke koje želimo izbjeći u što većoj mjeri.

Hidrogeneratori direktno spojeni vertikalnim vratilom na Francisovu turbinu brzinu vrtnje imaju određenu brzinom vrtnje turbine koja je uvjetovana količinom dolaznog fluida. Proces dobivanja električne energije se temelji na principu elektromagnetske indukcije koja započinje okretanjem magnetskog polja. Navedeno magnetsko polje stvara se pomoću magneta ili elektromagneta na rotoru. Pri okretanju rotora magnetsko polje se mijenja u odnosu na stator koji je nepokretan. Takva promjena magnetskog polja uzrokuje inducirane elektromotorne sile u statoru koja zatim uzrokuje cirkulaciju izmjeničnih električnih struja unutar statora. Količina potrebne proizvedene struje regulira se brzinom vrtnje turbine odnosno količinom fluida i određuje prema potrebama tržišta električne energije.



*Slika 3.4. Unutrašnjost strojarnice HE Rijeka (Izvor: hep.hr)*



### 3.1.4. Odvodni kanal

Kontrolirano ispuštanje vode koja prolazi kroz turbinu natrag u vodotok primarna je zadaća odvodnog kanala. Odvodni kanal ima važnu ulogu u sigurnosti hidroelektrane, pravilno dizajniran i održavan kanal sprječava havarije i štetu na vodnim turbinama i drugim hidromehaničkim dijelovima. Osim dizajna i materijal odvodnog kanala mora biti pravilno odabran. Najčešće se koriste beton ili čelik. Tijekom izgradnje odnosno projektiranja odvodnog kanala uvijek se u obzir uzimaju njegovi utjecaji na okoliš. Cilj je postići što manji štetni učinak na okoliš. Pomoću kontrole sedimentacije kroz odvodni kanal odvajamo teške čestice i tvari štetne za okoliš prije vraćanja u prirodni vodotok. Odvodni sustav HE Rijeka čini odvodni tunel ukupne duljine, od izlaza aspiratora do Rječine, 207 m. Prema karakterističnim profilima odvodni tunel se može podijeliti na tri dionice.

Prva dionica je izlazna račva strojarnice ukupne duljine 22,48 m. Radi se o dvokrakoj simetričnoj račvi obloženoj betonom čija niveleta započinje na koti -1,60 m n.m., dok se završna niveleta nalazi na +1,75 m n.m. i uvjetovana je niveletom samoga tunela. Debljina betonske obloge na početku račve iznosi 60 cm te 40 cm na kraju račve.

Druga dionica je tunel koji je kapastog profila. Takav profil odabran je zbog postizanja što optimalnijih hidrauličkih uvjeta tečenja, tako da nikad ne može doći do tečenja pod tlakom za instalirani protok elektrane. Tunel je dugačak 151,5 m a njegova betonska obloga varira između 30 i 40 cm. Radi ostvarivanja bolje veze obloge sa stijenom izvršeno je kontaktno injektiranje tunela.

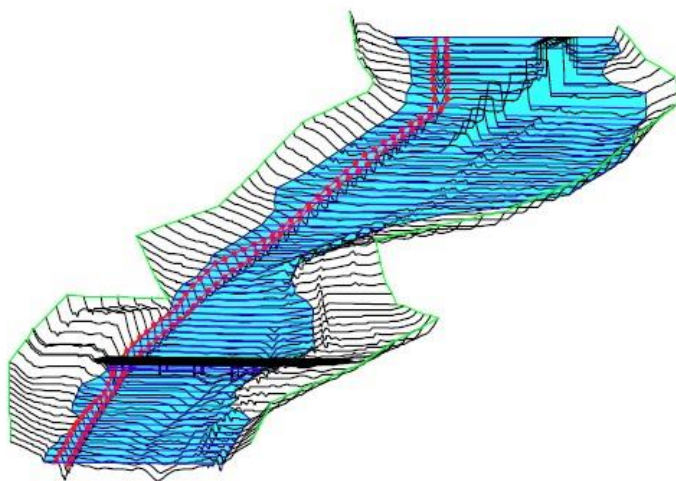
Treća dionica je izlazna račva tunela koja se sastoji od dva simetrična otvora odvojena vertikalnim zidom. Duljina izlazne račve iznosi 34 m. Debljina betonske obloge iznosi 30cm. Kako je tjeme izlazne račve za oko 1,35 m niže u odnosu na tjeme tunela, kod velikih voda Rječine ova dionica tunela dolazi pod tlak od oko 0,05 bar. Ova pojava je uvjetovala postavljanje otvora za odzračivanje ispred prijelaznog dijela.

## 4. HEC-RAS

HEC-RAS je softver za izradu računalnih simulacija u području fluida. Namjena ovog softvera je modeliranje hidraulike tečenja kroz prirodna korita rijeka ili pojedine jednostavnije građevine za dovod ili odvodnju fluida (kao npr. odvodni tunel u hidroelektrani), određivanje područja poplavljenosti te pohrane podataka s mogućnošću grafičkog prikazivanja istih. Program omogućava jednodimenzionalne stacionarne i jedno te dvodimenzionalne nestacionarne proračune tok u otvorenim koritima, proračune morfoloških promjena korita i modeliranje temperature i kvalitete vode duž toka.

Njegova primjena u praksi očituje se u simuliranju strujanja u rijekama kako bi se minimizirao rizik od poplava i očuvala hidraulička ravnoteža, te za procjenu rizika od poplava i erozije tla. HEC RAS ključan je alat za inženjere u vodnom sektoru jer im omogućuje bolje razumijevanje i modeliranje ponašanja vodenih tijela na temelju kojih donose odluke u vezi s upravljanjem vodnim resursima.

Hidraulički proračun tečenja u odvodnom kanalu HE Rijeka proveden je koristeći program HEC RAS. Za potrebe proračuna odvodnog kanala HE Rijeka korišten je modul za nestacionarni jednodimenzionalni proračun tečenja. U proračune je moguće uključiti građevine kao što su akumulacije, mostovi, propusti, ustave i tuneli složenih poprečnih presjeka.



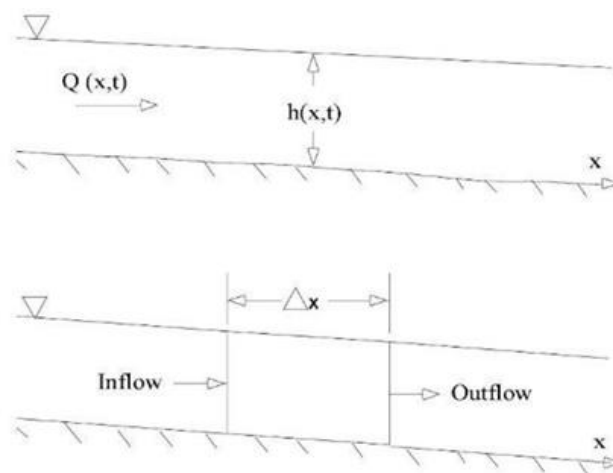
Slika 4.1. Prikaz modela poplave u HEC RAS-u (Izvor: wesslerengineering.com)

## 4.1. Vladajući zakoni fizike

Tok vode u otvorenim vodotocima opisuje se s dva fizikalna zakona. To su zakon o očuvanju mase i zakon o očuvanju količine gibanja. Navedeni zakoni bit će izraženi u formi parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koje se za potrebe proračuna tečenja rješavaju metodom konačnih razlika i slično.

### 4.1.1. Zakon o očuvanju mase

Razmatra se elementarni kontrolni volumen prikazan na slici 4.2. Udaljenost duž vodotoka označava se oznakom  $x$ . Na sredini kontrolnog volumena, protok i ukupna protočna površina su prikazani oznakama  $Q(x,t)$  i  $A_T$ . Ukupna protočna površina predstavlja sumu aktivne površine  $A$  i retencijske zapremnine  $S$ .



Slika 4.2. Elementarni kontrolni volumen za derivaciju jednadžbi očuvanja mase i količine gibanja

Očuvanje mase za kontrolni volumen kaže da vrijednost protoka koji ulazi u kontrolni volumen je jednak vrijednosti zapremnine unutar volumena. Vrijednost dotoka u kontrolni volumen možemo izraziti kao:

$$Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (4.1)$$

Dok ćemo smanjenje protoka izraziti kao:

$$Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \quad (4.2)$$

A promjenu zapremnine kao:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} \Delta x \quad (4.3)$$

Uz pretpostavku da je  $\Delta x$  dovoljno mali, promjena mase kontrolnog volumena jednaka je:

$$\rho \frac{\partial A_T}{\partial t} \Delta x = \rho \left[ \left( Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left( Q + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) + Q_l \right] \quad (4.4)$$

Gdje je  $Q_l$  dotok koji ulazi u kontrolni volumen, a  $\rho$  gustoća fluida.

#### 4.1.2. Zakon o očuvanju količine gibanja

Očuvanje količine gibanja izraženo preko drugog Newton-ovog zakona:

$$\sum F_x = \frac{dM}{dt} \quad (4.5)$$



Očuvanje količine gibanja za kontrolni volumen govori da vrijednost količine gibanja koja ulazi u kontrolni volumen, uključujući i sumu svih vanjskih sila koje djeluju na volumen, je jednaka vrijednosti akumuliranja količine gibanja. Ova zakonitost je vektorska jednadžba primjenjiva u x smjeru. Količinu gibanja predstavlja masa fluida pomnožena s vektorom brzine u smjeru toka. Tri sile utječu na promjenu količine gibanja, a to su sila trenja, sila gravitacije i sila tlaka.

Sila trenja može se izraziti kao:

$$F_{pn} = -\rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x \quad (4.6)$$

gdje je:

$\rho$  gustoća fluida

$g$  sila ubrzanja

$A$  površina poprečnog presjeka

$h$  dubina toka

Sila gravitacije može se izraziti kao:

$$F_g = -\rho g A \frac{\partial z_0}{\partial x} \Delta x \quad (4.7)$$

gdje  $z_0$  označava visinsku kotu dna provodnika.

Količinu gibanja koja ulazi odnosno koja izlazi iz kontrolnog volumena matematički možemo izraziti kao:

$$\rho \left[ QV \mp \frac{\partial QV}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right] \quad (4.8)$$

Sukladno tome razlika količine gibanja koja ulazi u kontrolni volumen iznosi:

$$-\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x \quad (4.9)$$

Kako znamo da količina gibanja u kontrolnom volumenu iznosi  $\rho Q \Delta x$ , vrijednost akumuliranja količine gibanja izrazit ćemo kao:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Q \Delta x) = \rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (4.10)$$

Primijenimo li definiciju zakona o očuvanju količine gibanja, možemo pisati sljedeće:

$$\rho \Delta x \frac{\partial Q}{\partial t} = -\rho \frac{\partial QV}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \rho g A \frac{\partial z_0}{\partial x} \Delta x - \rho g A S_f \Delta x \quad (4.11)$$

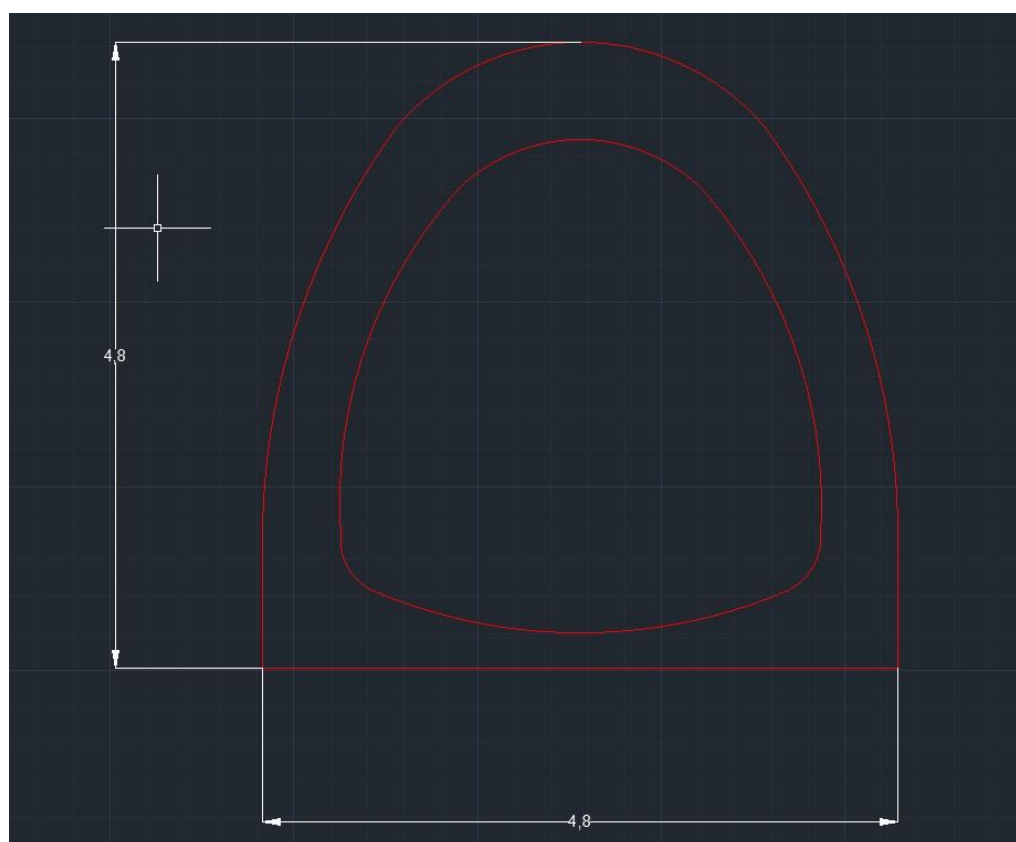
gdje je  $S_f$  pad energetske linije koji je direktno vezan uz promjenu protoka i razine vodnog lica.

Visina vodnog lica  $z$  jednaka je  $z_0 + h$ . Prema tome nagib vodnog lica  $\frac{\partial z}{\partial x}$  glavit će:

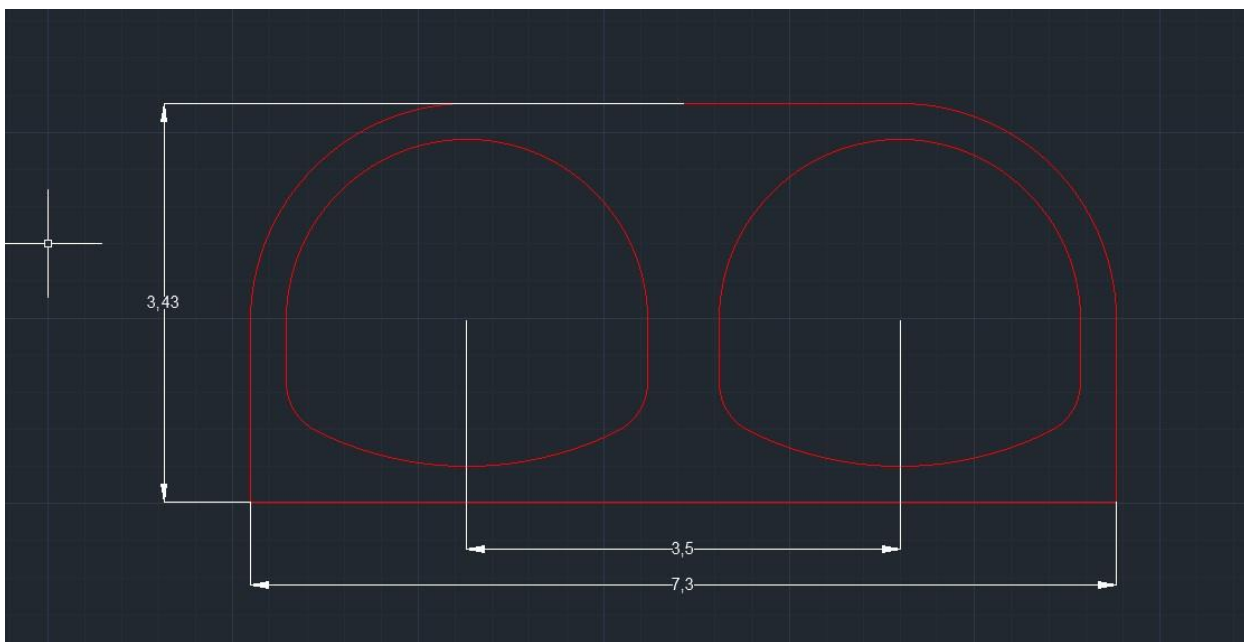
$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_0}{\partial x} \quad (4.12)$$

## 4.2. Izrada geometrije odvodnog kanala u HEC RAS-u

Odvodni kanal HE Rijeka kao što je već navedeno sastoji se od tri segmenta. To su izlazna račva strojarnice, tunel i izlazna račva tunela. Izlazna račva strojarnice biti će zanemarena zbog minimalnih gubitaka te će se geometrija odvodnog kanala sastojati od preostala dva dijela. Izrada geometrije odvijala se u dvije faze. Prva faza je bila izrada presjeka profila prema dobivenim podacima odnosno nacrtima iz originalnog projekta. Izrada nacрта presjeka profila napravljena je u CAD softveru AutoCad.



*Slika 4.3. Presjek profila tunela odvodnog kanala HE Rijeka (mjere kote izražene su u metrima)*



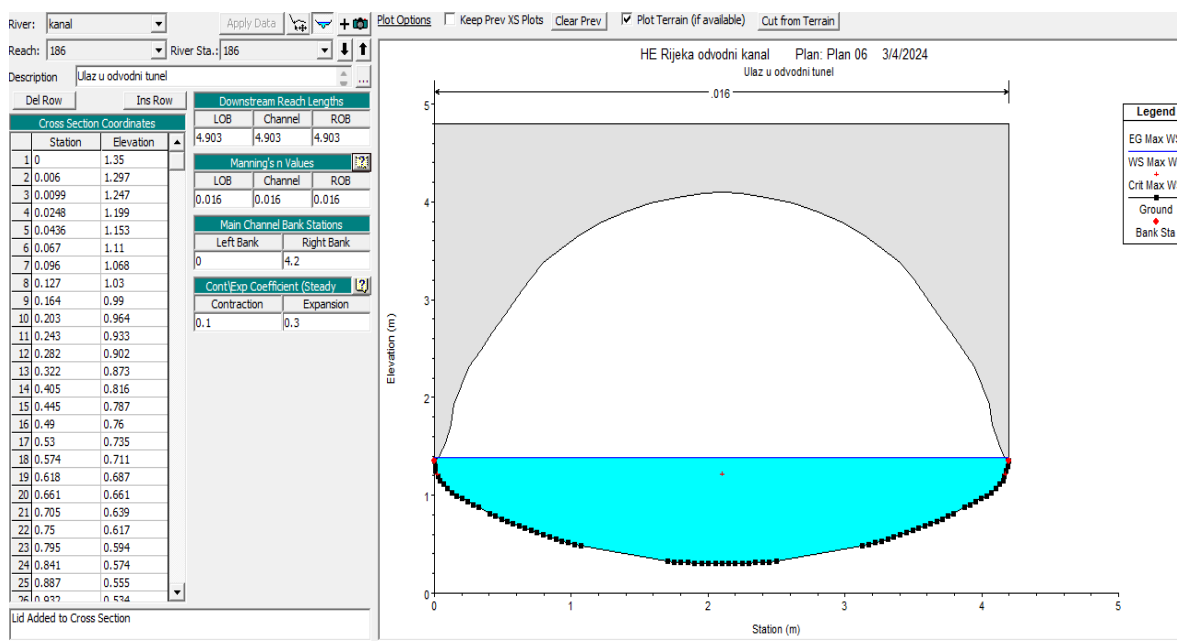
*Slika 4.4. Presjek profila izlazne račve tunela HE Rijeka (mjere kota izražene su u metrima)*

Na slikama 4.3. i 4.4. možemo vidjeti detaljne presjeke profila sa svim pripadajućim duljinama i radijusima koje je bilo potrebno prvo precrtati, a zatim aproksimirati uz pomoć naredbe Polyline koja će ostaviti puno koordinata točaka na obodu profila koje će biti prenesene u HEC RAS tablicu za definiranje profila. Naredba iz AutoCad-a koja je uvelika ubrzala proces prenošenja koordinata točaka i učinila ga maksimalno preciznim zove se List. Naredba List ispisuje sve koordinate točaka od prethodno označenog dijela za sve tri osi. U ovom slučaju korištene su samo x i y koordinate jer se radi o izradi 2D profila. Koordinate su prvo prenešene u Microsoft Excel radi uređenja podataka i promjenu mjernih jedinica, a nakon toga i u sam HEC RAS.

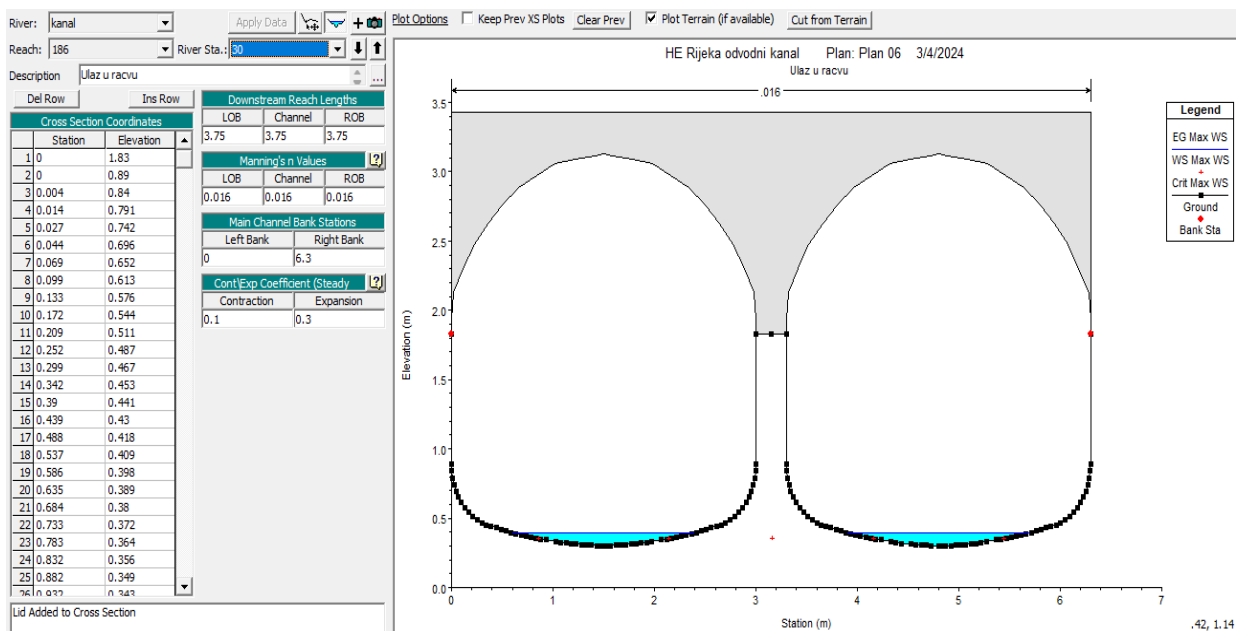
#### 4.2.1. Definiranje profila u HEC RAS-u

Definiranje geometrije započinje tako što u sučelju HEC RAS-a definiramo i spremamo novi projekt kao dokument na naše računalo. Zatim u alatnoj traci odabiremo naredbu Geometric Data koja nam otvara novi prozor u kojemu odabiremo naredbu Cross section. Cross section ponovno otvara novi prozor u kojemu se pojavljuje tablica za koordinate profila, vizualni prikaz koordinatama definiranog profila, njegov položaj u odnosu na ostale profile te podaci kao što su širina tunela i koeficijent trenja. Navedene parametere možemo vidjeti na slici 4.5. Nakon što su svi parametri upisani formira se donja polovica tunela odnosno račve.

HEC RAS za formiranje građevina u obliku tunela ili cijevi ima posebnu naredbu pomoću koje nadodajemo gornji dio na naše definirane profile kako bi oni bili kompletno zatvoreni odnosno formirali tunel. Naredba koja to omogućuje zove se Add a Lid to XS. Kada tu naredbu odaberemo otvara se novi prozor u kojemu je tablica za unos koordinata gornjeg dijela tunela. Formiranje profila gornjeg dijela odvija se po istom principu kao i donji dio. Važno je obratiti pažnju da kad su profili jednom formirani nemaju na sebi loše spojeve odnosno rupe koje se mogu pojaviti zbog aproksimacija originalnih radijusa tunela jer će to direktno utjecati na simulaciju puštanja vode kroz kanal.

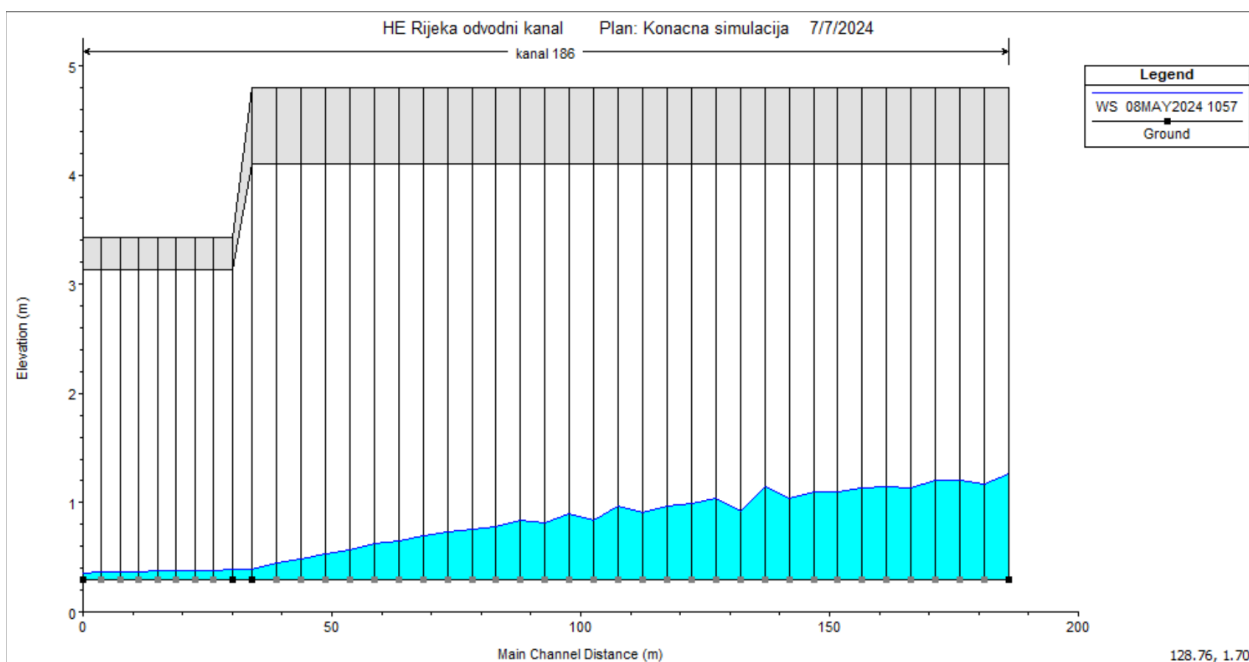


Slika 4.5. Definiranje geometrije tunelnog dijela odvodnog kanala



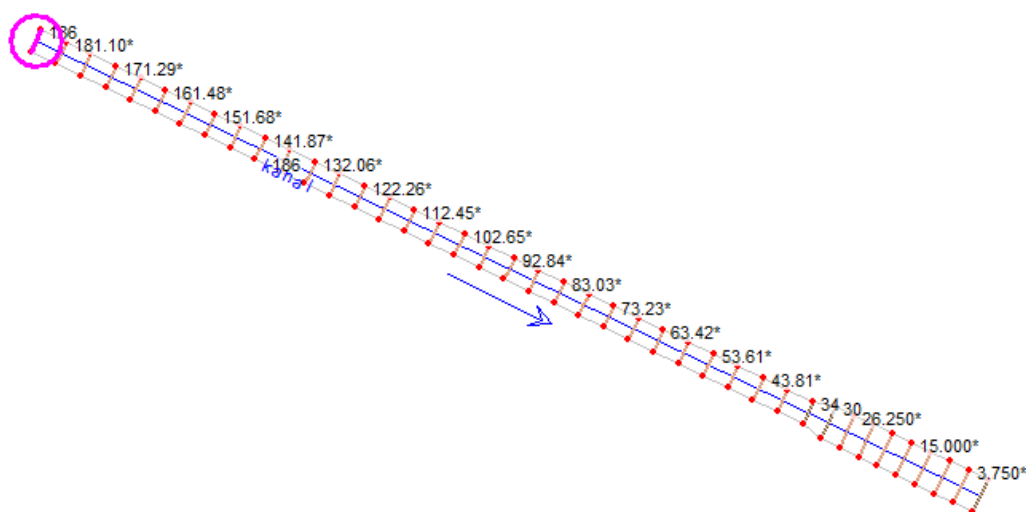
Slika 4.6. Definiranje geometrije izlazne račve odvodnog kanala

Odvodni kanal sastavljen od dva dijela (tunela i izlazne račve tunela) u simulaciji ima 4 karakteristična presjeka postavljene na stacionažama 0, 30, 34, 186. Ove stacionaže karakteristične su po tome što na njima dolazi do promjene geometrije odvodnog kanala a samim time uvjetovane su promjene u strujanju. Ukupna dužina definirane dionice iznosi 186 m.



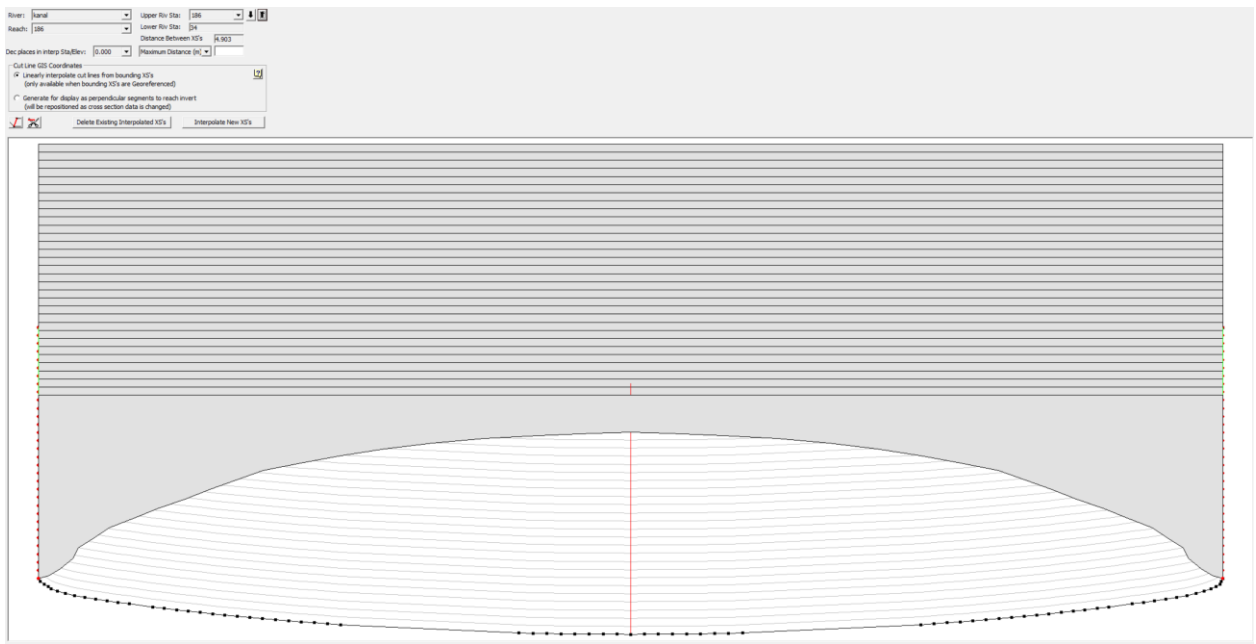
Slika 4.7. Prikaz uzdužnog profila odvodnog tunela u matematičkom hidrauličkom modelu

Zbog izrazito nestacionarnog i nejednolikog strujanja u tunelu, u modelu je bilo potrebno izvršiti interpolaciju dodatnih presjeka i dovoljno mali vremenski inkrement simulacije kako bi se osigurao stabilan i točan proračun. Interpolacija se vrši uz pomoć HEC RAS alata XS interpolation te u dodatan odabir stavljamo between 2 XS. U novom prozoru koji nam se otvori upisujemo između kojih stacionaža želimo interpolaciju te kolika će biti udaljenost između svakog profila. Interpolacija je napravljena tako da su poprečni presjeci međusobno udaljeni 4 m. Konačan ishod interpolacije vidimo na slici 4.8.

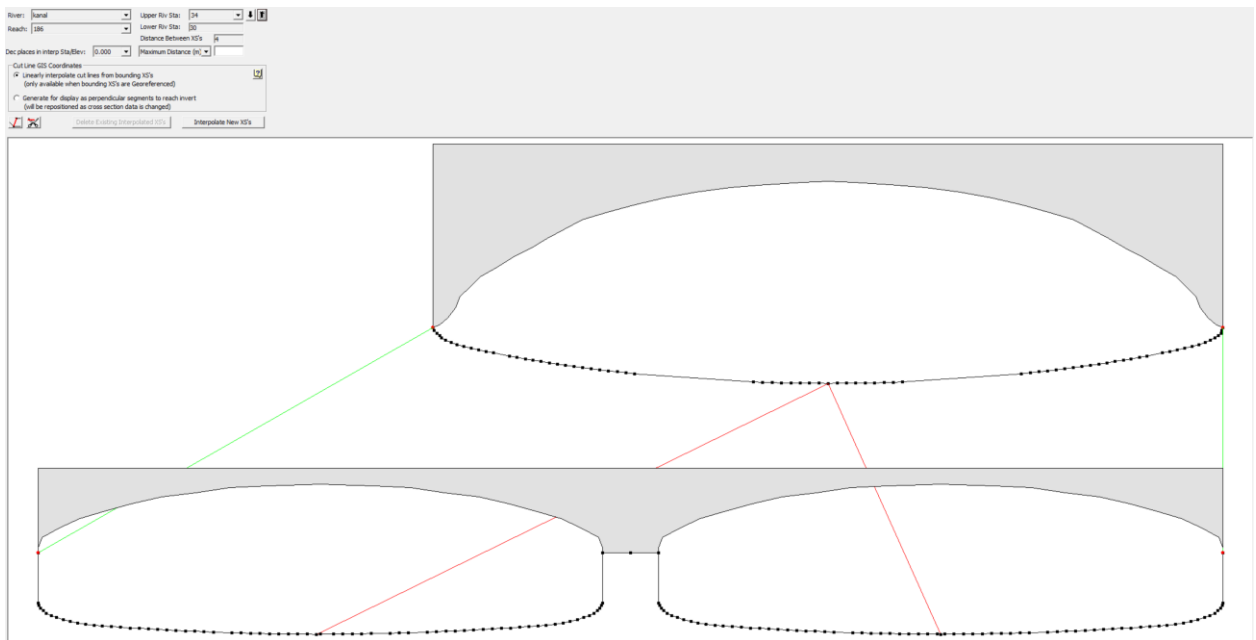


Slika 4.8. Shematski prikaz geometrije odvodnog kanla nakon interpolacije

U nastavku će na slikama 4.9., 4.10. i 4.11. biti detaljnije prikazana interpolacije između karakterističnih dijelova odvodnog kanala, odnosno stacionaža koje označavaju početak ili kraj istog tipa geometrije u kanalu.

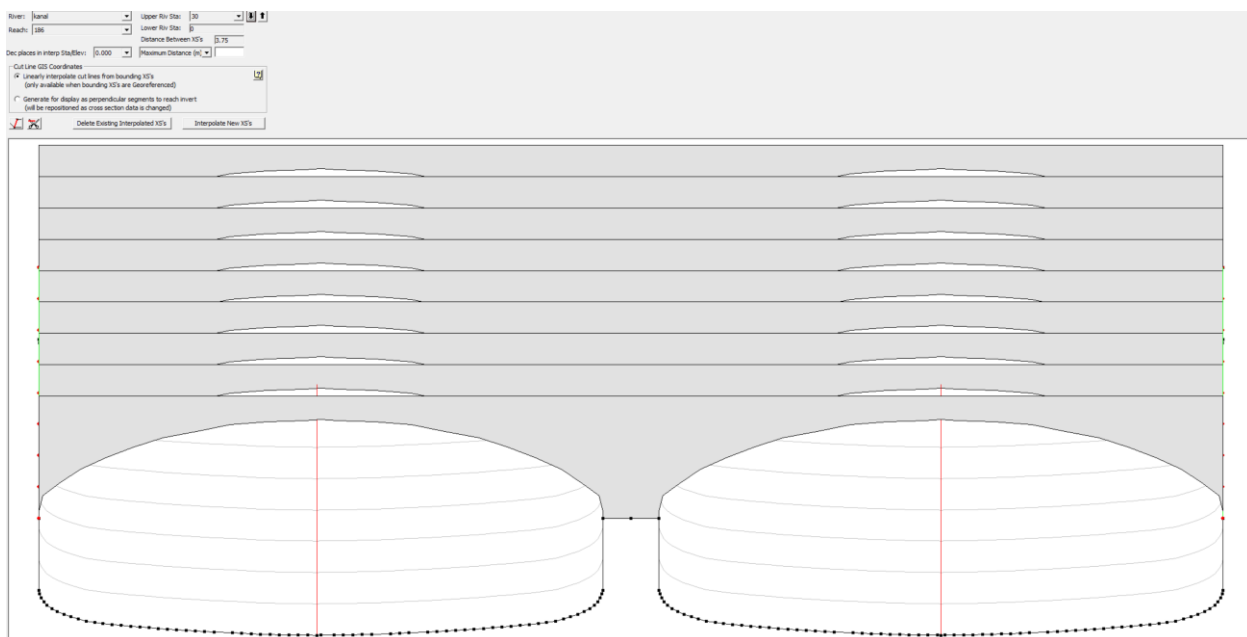


Slika 4.9. Prikaz interpolacije profila između stacionažama 186 i 34



Slika 4.10. Prikaz presjeka profila između stacionaža 34 i 30





Slika 4.11. Prikaz interpolacije presjeka između stacionaža 30 i 0

### 4.3. Izrada i postavke simulacije nestacionarnog strujanja

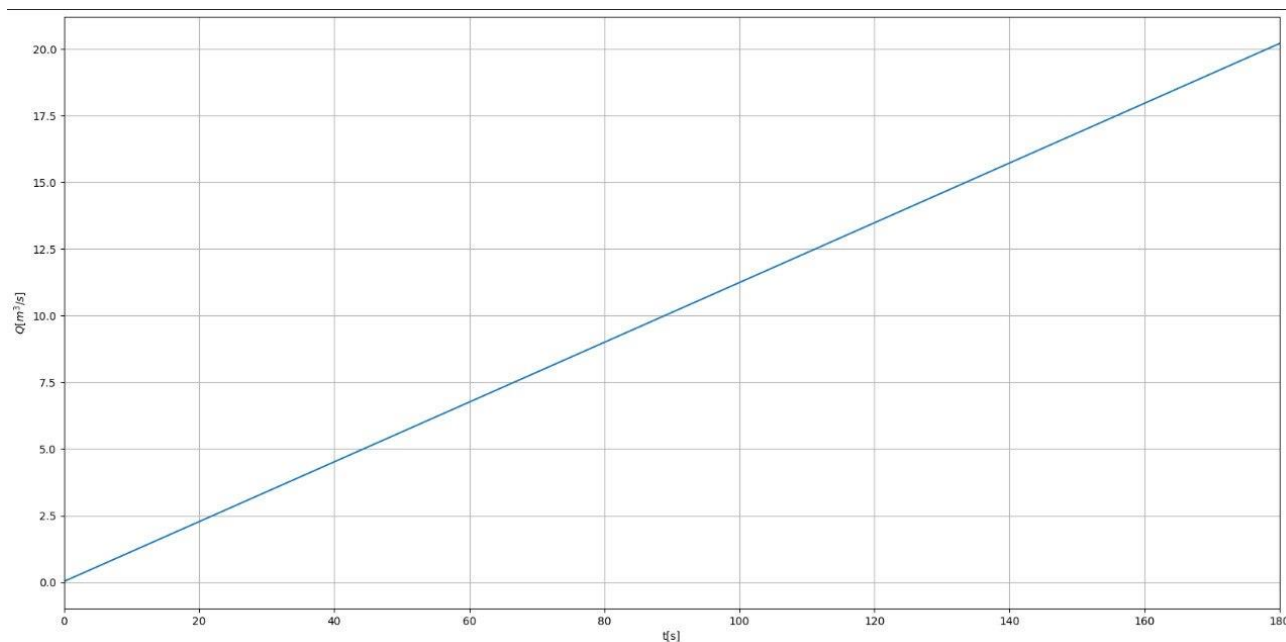
#### 4.3.1. Određivanje protoka

Jednadžba pravca je određena uz pomoć grafa protoka i vremena dobivenih iz projektne dokumentacije. Sukladno tome određeni su protoci za prve tri minute puštanja vode jer tada protok raste, a nakon treće minute postaje konstantan. Zbog lakše manipulacije podacima odnosno protocima korišten je MS Excel u kojemu su protoci određeni u ovisnosti o odmicanju vremena (Slika 4.12.) te su naknadno samo preneseni u tablicu protoka u HEC RAS-u.

Jednadžba za protok glasi:

$$Q = 0.112 * t + 0.038$$

gdje  $Q$  označava protok mjereno u  $m^3/s$ , a  $t$  vrijeme mjereno u sekundama.

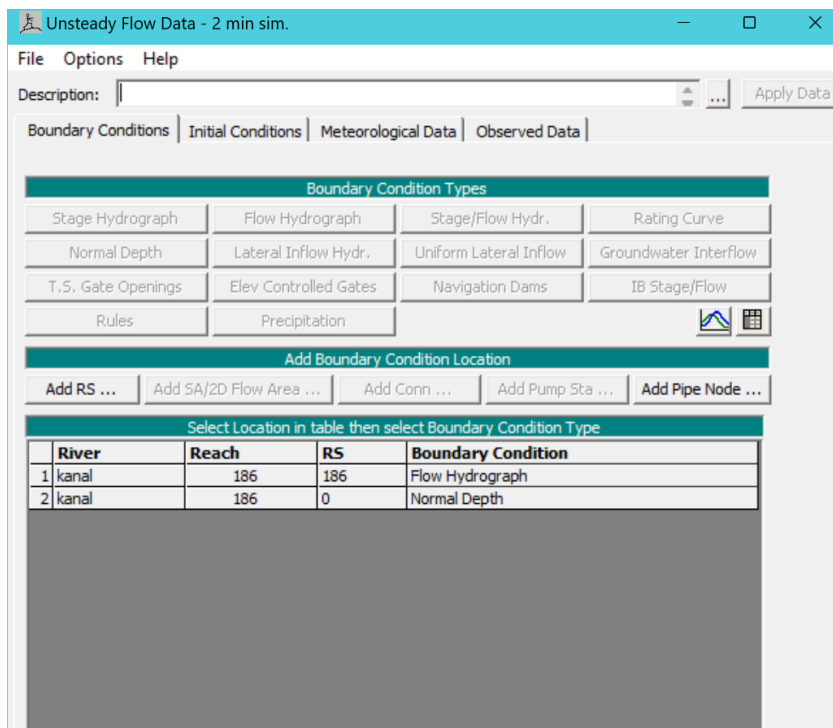


Slika 4.12. Prikaz grafa protoka u ovisnosti o vremenu u prvih 3 minute strujanja

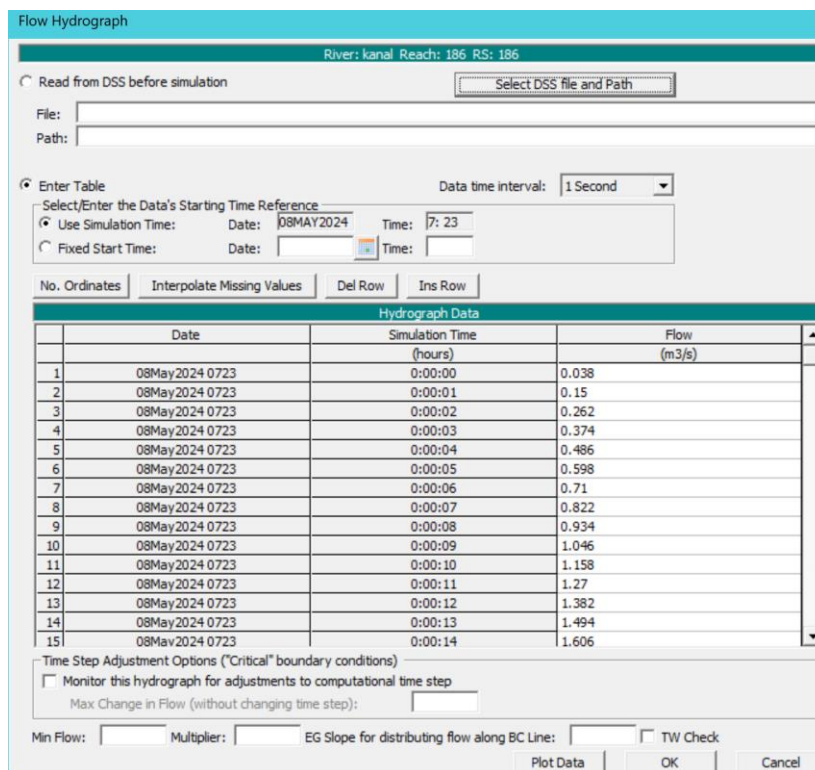
#### 4.3.2. Izrada simulacije u HEC RAS-u

Za početak je važno naglasiti da su u ovom radu izrađene tri pomoćne i jedna finalna simulacija odnosno prve tri minute puštanja vode u odvodni kanal raspodjeljene su na tri dijela. Prva simulacija izrađena je za prvu minutu strujanja vode, druga simulacija prikazuje strujanje u prve dvije minute strujanja dok treća simulacija prikazuje kompletne tri minute strujanja. Također je važno reći kako u modelu nisu korištene kalibracije s pravim mjerenjima te zato u trećoj simulaciji dolazi do prevelikog protoka u odvodnom kanalu. Dodatnim podešavanjem postavka lokalnih gubitaka, kritičnog i natkritičnog strujanja te postavljanjem poprečnih presjeka na njihove točne lokacije bez interpolacije izbjegava se prevelik dotok vode i odvodni kanala funkcionira sigurno. Tri simulacije korištene su kako bi se ustanovio najveći mogući protok koji će neometano moći teći kroz odvodni kanal odnosno kako bi simulacija bila uspješna jer cilj simuliranja je biti što bliži realnom slučaju odnosno strujanju u ovome slučaju.

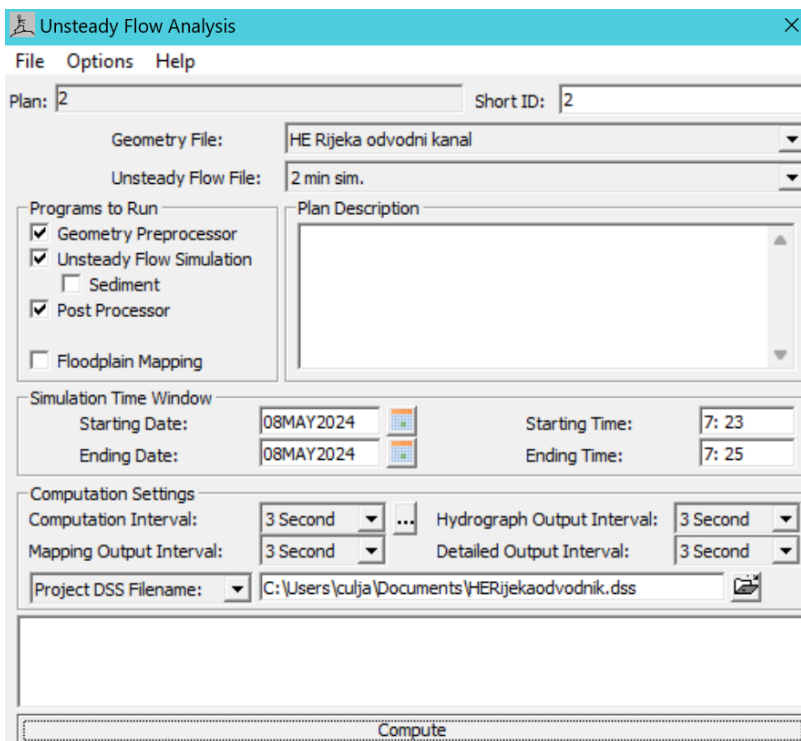
Izrada simulacija nestacionarnog strujanja započinje s odabirom opcije „Edit“ te zatim odabiremo „Unsteady flow data“. Otvara se novi prozor u kojem pod „Boundary Condition Types“ odabiremo „Flow Hydrograph“ i „Normal Depth“ kao na slici 4.12. Dvoklikom na „Flow Hydrograph“ otvara se prozor s tablicom koja u lijevom stupcu ima vremena izražena u sekundama, a u desni stupac unosimo vrijednosti protoka za svaku sekundu simulacije kao na slici 4.13. Odabiremo „Normal Depth“ otvara se novi prozor s prostorom za unos koeficijenta trenja koji u ovom slučaju iznosi 0.001. Nakon što su svi podaci uneseni i spremljeni odabiremo „Run“ i zatim „Unsteady Flow Analysis“. U prozoru za pokretanje simulacije nestacionarnog strujanja pod „Geometry File“ odabiremo željenu geometriju koju smo prethodno definirali, a pod „Unsteady Flow File“ odabiremo „File“ u kojemu su prethodno definirani protoci kao što je prikazano na slici 4.14..



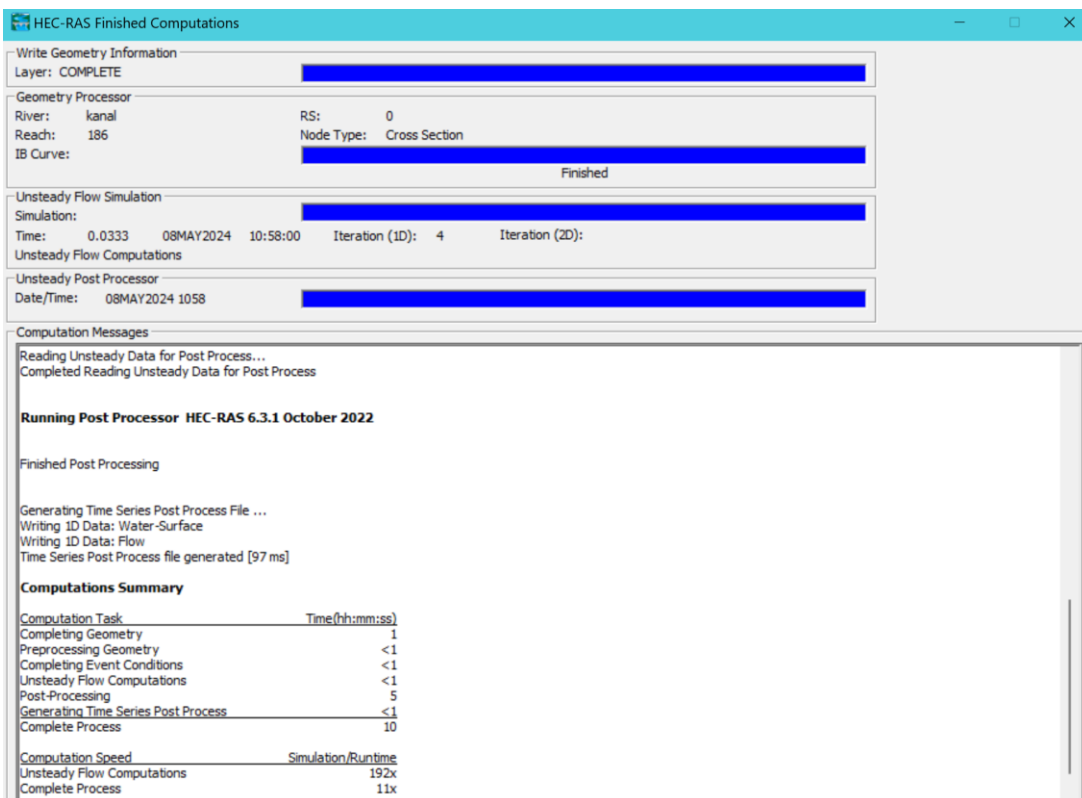
Slika 4.13. Prikaz sučelja za definiranje graničnih uvjeta



Slika 4.14. Prikaz tablice za unos vrijednosti protoka

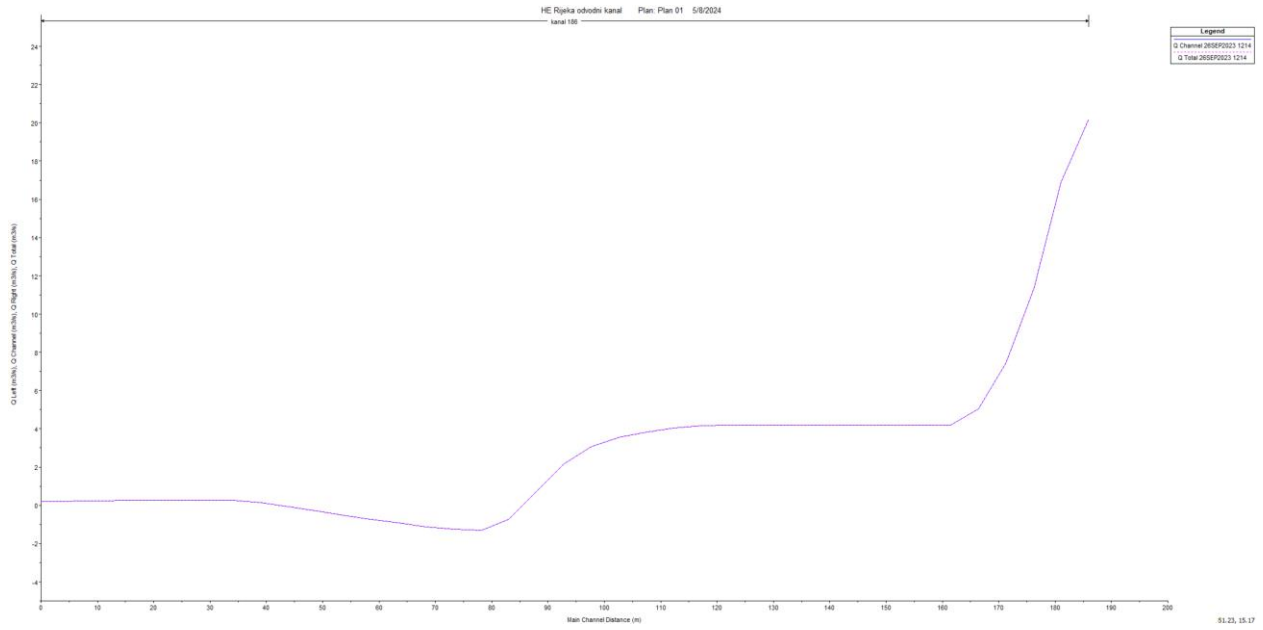


Slika 4.15. Prikaz prozora u kojemu pokrećemo simulaciju



Slika 4.16. Završni dio uspješno provedene simulacije

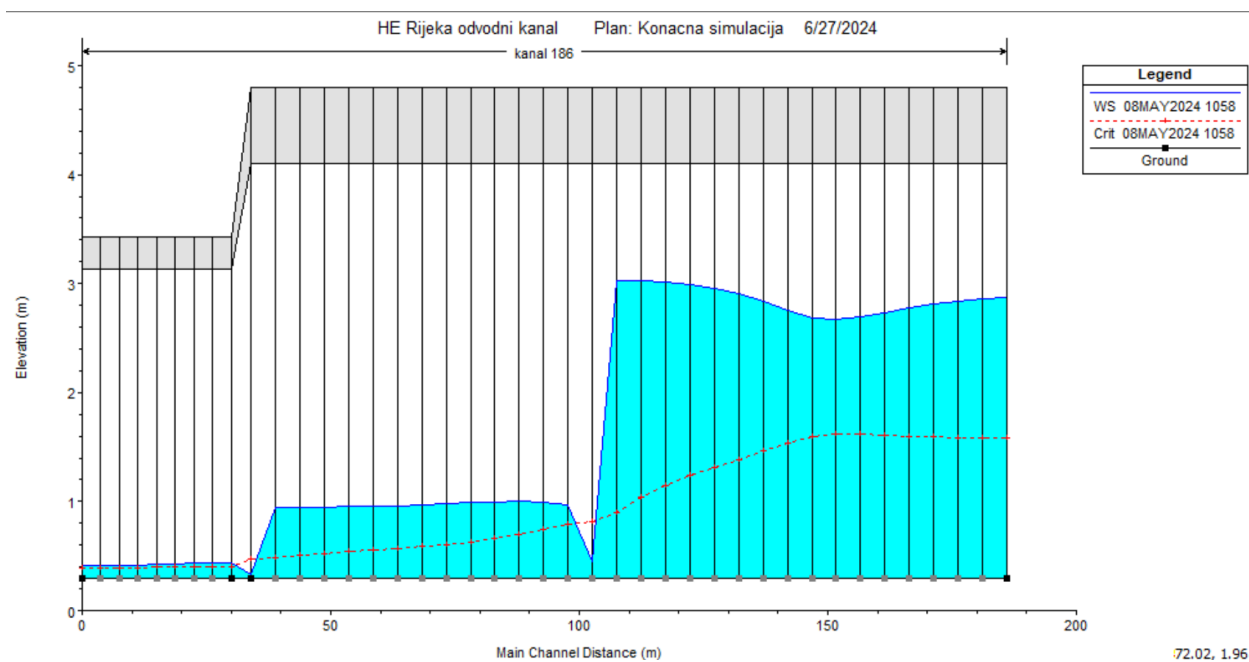
Finalna simulacija nestacionarnog strujanja u odvodnom kanalu traje 2.5 min što u smislu protoka znači da počinju od  $0.038 \text{ m}^3/\text{s}$  i sežu do  $16.838 \text{ m}^3/\text{s}$ . Daljnjim povećavanjem protoka dolazi do kritičnog slučaja što prikazuje graf na slici 4.16. Kritičan slučaj uzrokuje poplavljenje cijeloga kanala što može rezultirati havarijom.



*Slika 4.17. Prikaz grafa povećanja protoka u kritičnom slučaju*

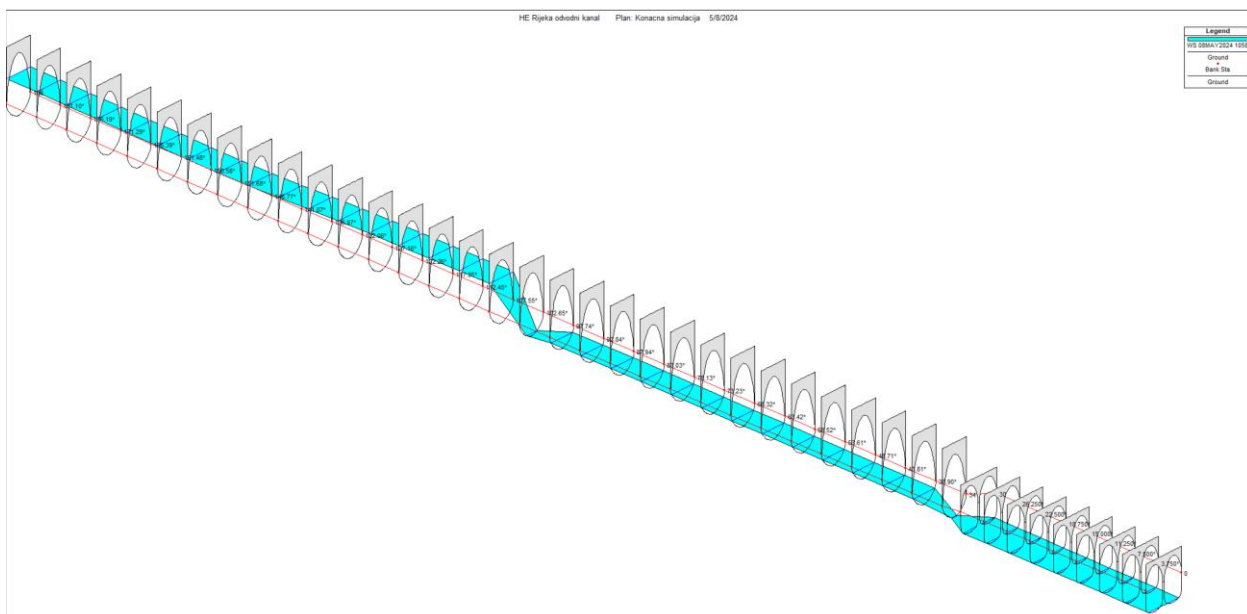
## 5. REZULTATI

Dobiveni rezultati prikazuju nestacionarno strujanje fluida kroz odvodni kanal. Bit će prikazan način kretanja i količina fluida koja struji kroz odvodni kanal. Slika 5.1. prikazuje izgled vodnog lica kroz cijeli kanal, dok slika 5.2. prikazuje kanal odnosno poprečne presjeke u 3D-u. Detaljno su prikazane razine vode na karakterističnim stacionažama odnosno poprečnim presjecima koji su početak ili kraj određenog tipa geometrije odvodnog kanala.



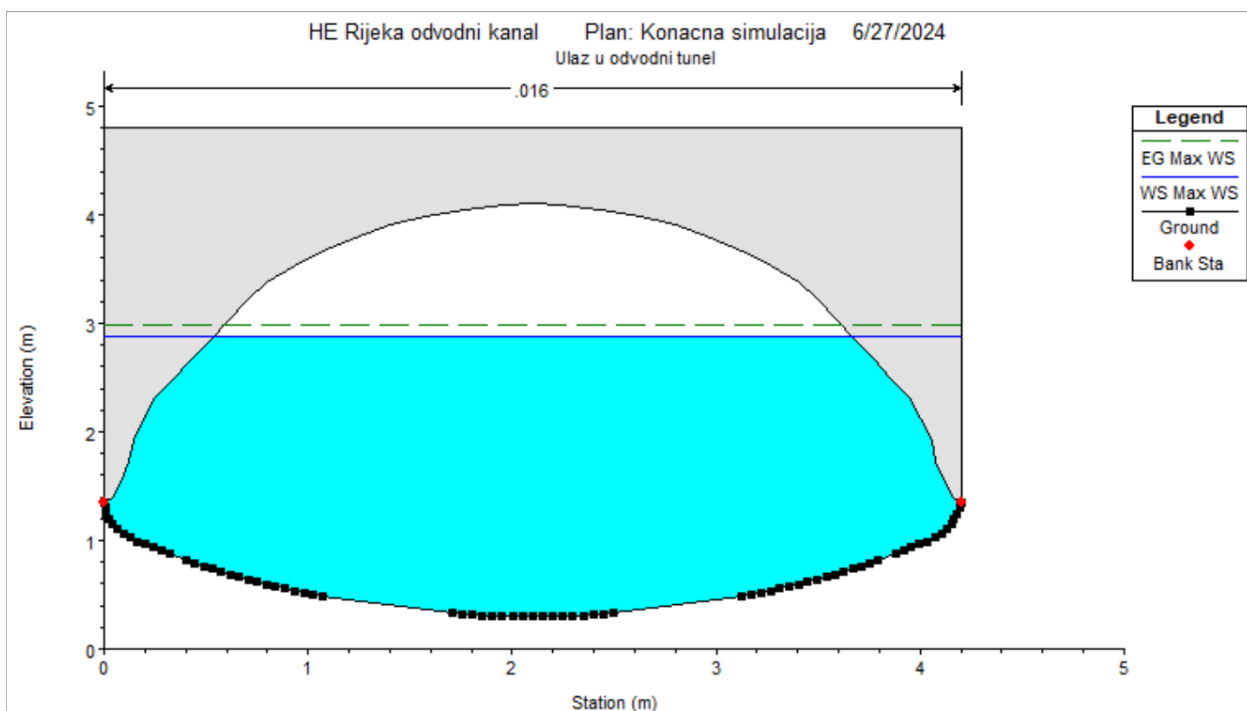
Slika 5.1. Prikaz vodnog lica duž cijelog kanala za slučaj nestacionarnog strujanja na kraju simulacije



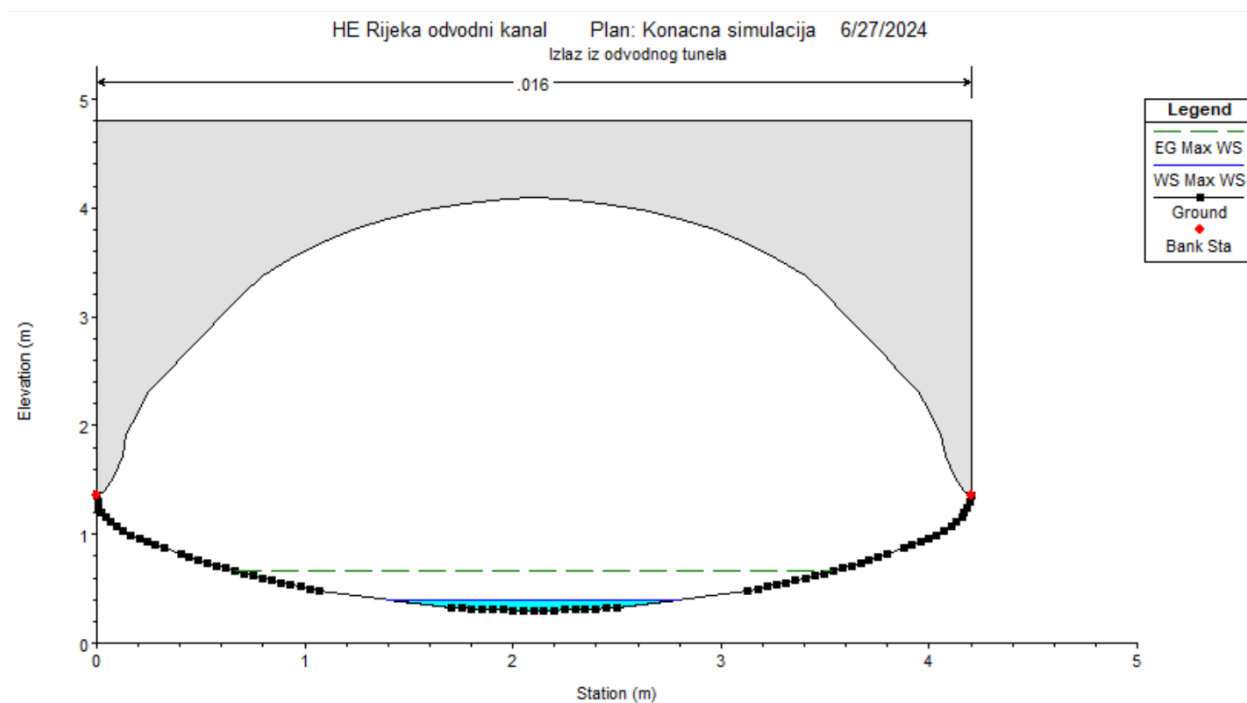


*Slika 5.2. Prikaz poprečnih presjeka i razine vode u odvodnom kanalu tijekom strujanja*

Slika 5.3. prikazuje početni poprečni presjek i označava početak geometrije tunela na stacionaži 186 m n.m., dok slika 5.4. prikazuje isto samo na posljednjem poprečnom presjeku geometrije tunela na stacionaži 34 m n.m..

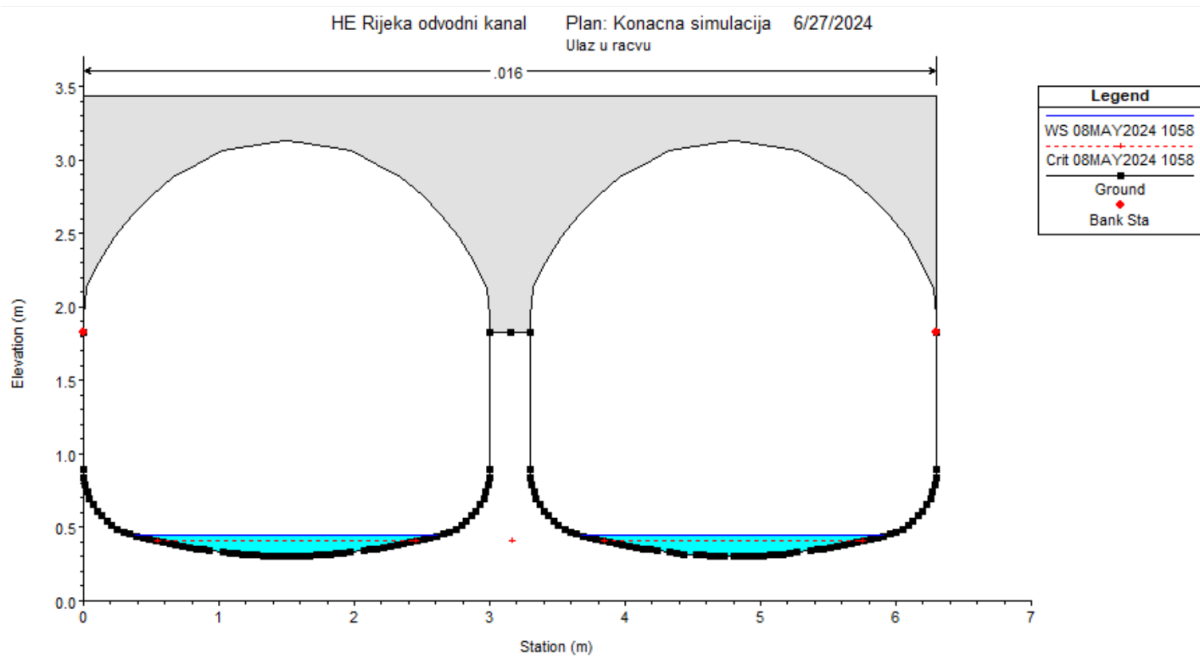


Slika 5.3. Poprečni presjek i razina fluida na najvišoj odnosno početnoj stacionaži

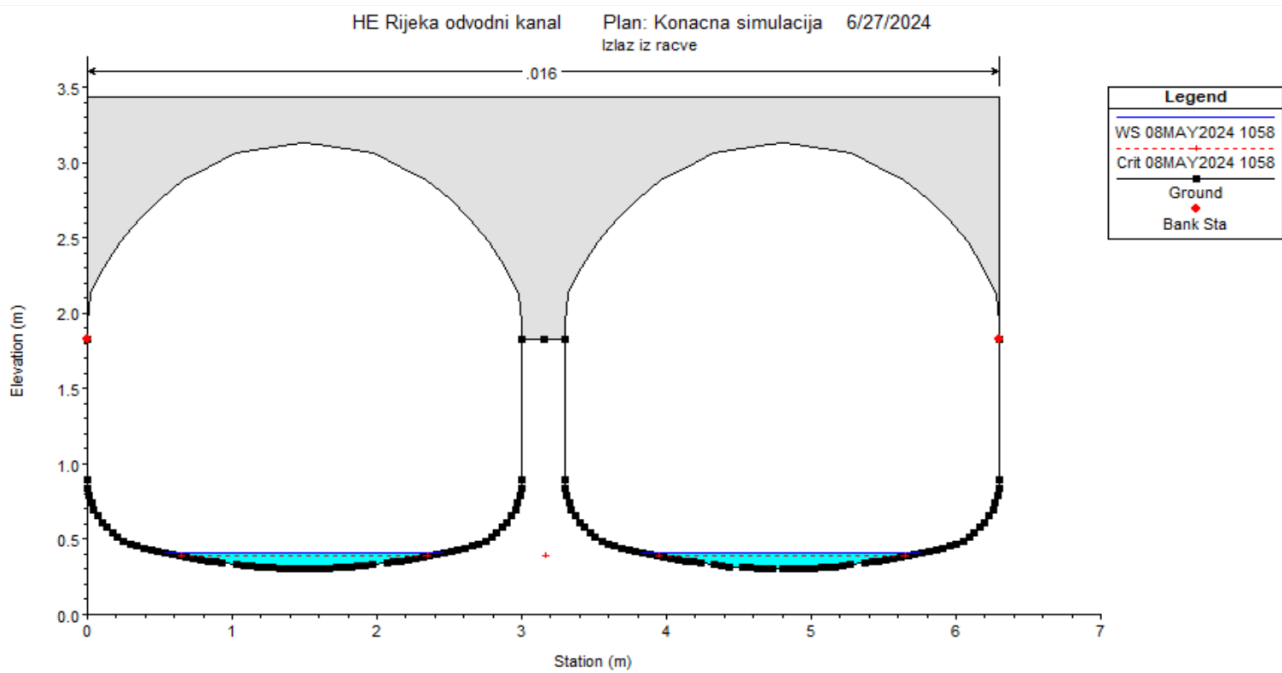


Slika 5.4. Prikaz poprečnog presjeka i razine fluida na stacionaži 34 m n.m.

Slika 5.5. prikazuje razinu fluida na početku ulaska u izlaznu račvu na stacionaži 30 m n.m., a slika 5.6. prikazuje posljednji poprečni presjek račve i razinu fluida u njemu na stacionaži 0 m n.m..

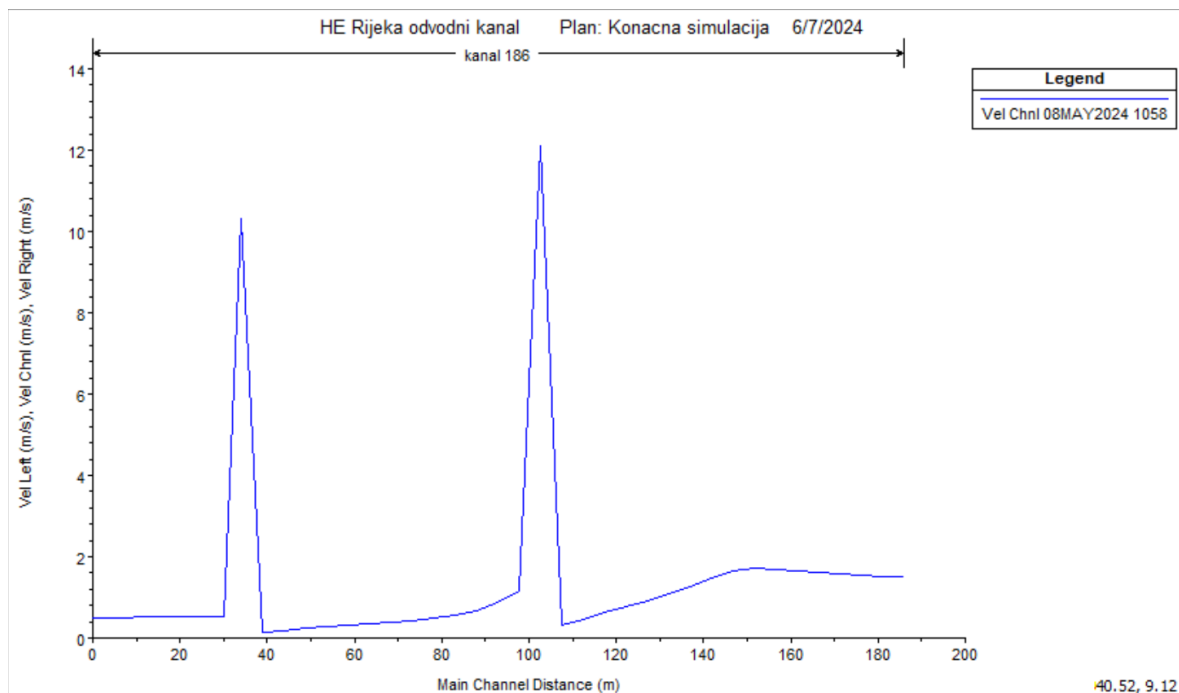


Slika 5.5. Prikaz ulaznog profila izlazne račve i razine fluida



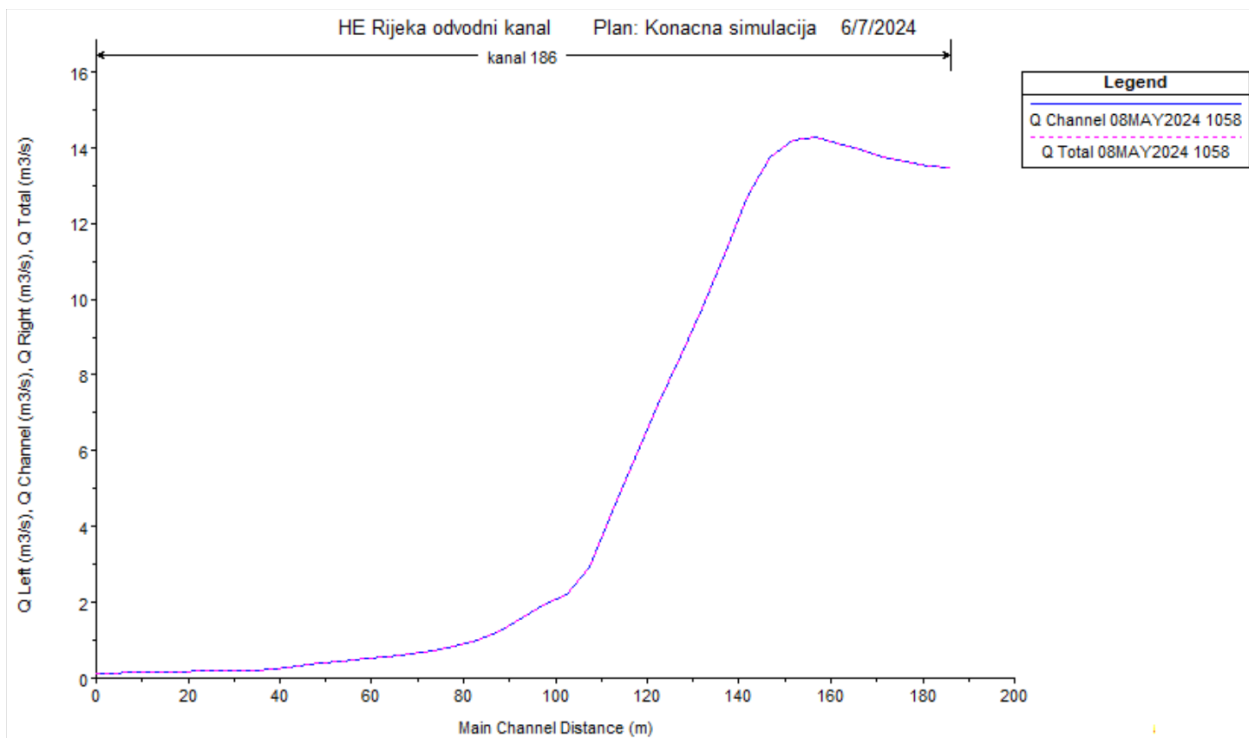
Slika 5.6. Prikaz izlaznog profila račve i razine fluida

U nastavku rada biti će prikazani grafovi brzine strujanja fluida, protoka fluida kroz kanal, dubina fluida tokom strujanja i snage strujanja. Brojčane vrijednosti dobivene u simulaciji biti će prikazane grafovima u svrhu dodatnog i točnijeg praćenja strujanja u odvodnom kanalu HE Rijeka.

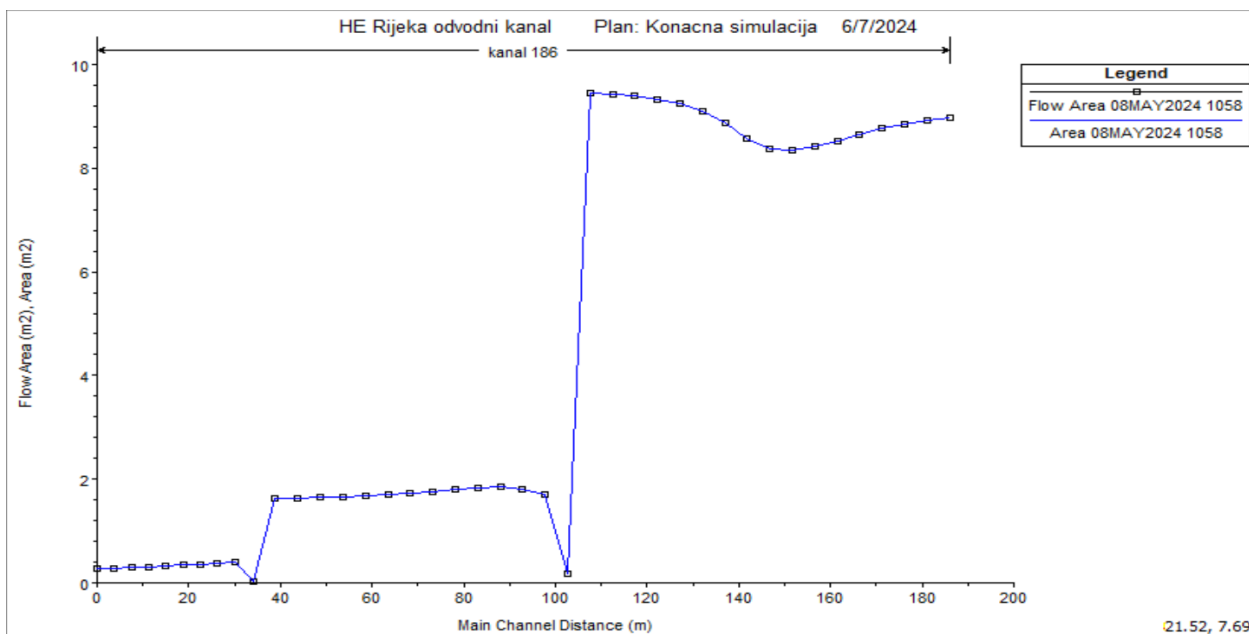


Slika 5.7. Prikaz grafa brzina strujanja

Slika 5.7. prikazuje brzinu strujanja koja ima dva nagla skoka prvi i najveći na središnjem dijelu tunela, a drugi na prijelazu geometrije iz tunela u račvu. Najveća brzina strujanja koja se postiže iznosi  $12.1 \text{ m/s}$ . Slika 5.8. prikazuje graf promjene protoka kroz odvodni kanal koji u početku tunela postupno raste i zatim naglo pada te se ujednačava prema izlazu iz račve.



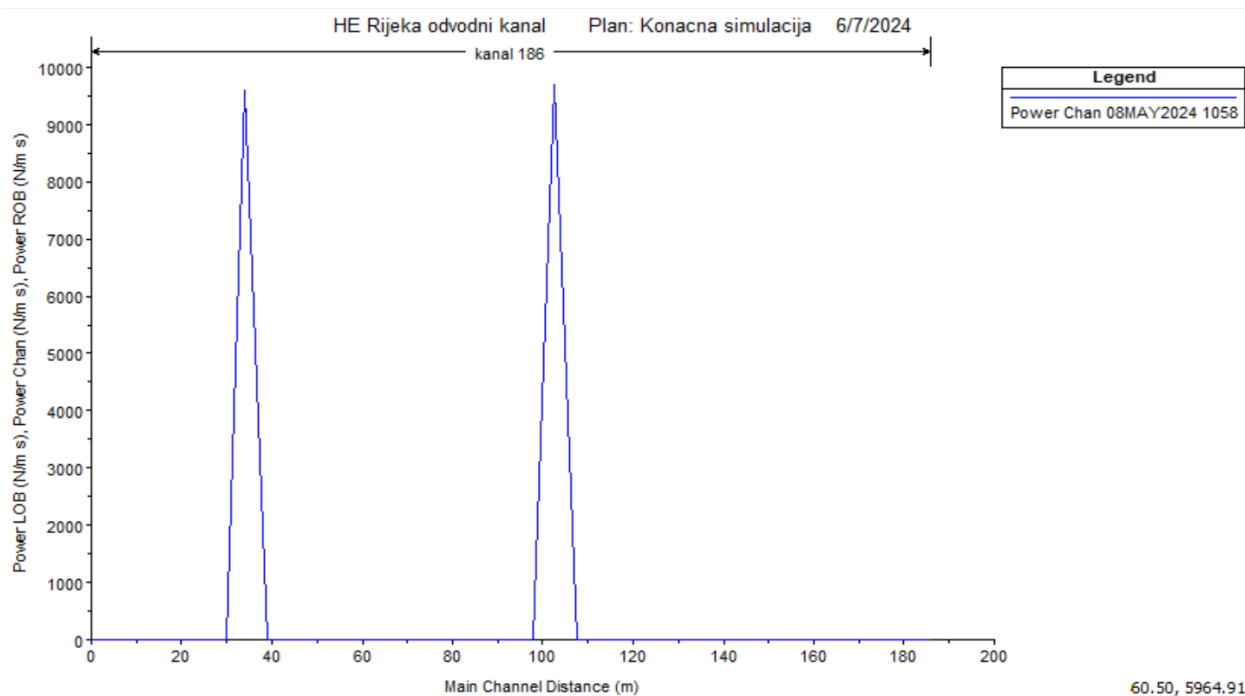
Slika 5.8. Prikaz grafa promjene protoka tijekom strujanja



21.52, 7.69

Slika 5.9. Prikaz grafa površine vode kroz odvodni kanal

Slika 5.9. prikazuje graf promjene površine vode tijekom strujanja u odvodnom kanalu. Površina vode najviše nagli pada ima na sredini tunelnog dijela dok na prijelazu u račvu čak dolazi do njenog maloga rasta. Slika 5.10. prikazuje graf snage strujanja okarakteriziran s dva nagla skoka približno istih vrijednosti. Najveći skok odnosno najveća snaga strujanja iznosi 9700 Nm/s i nalazi se na stacionaži od 105 m n.m..



Slika 5.10. Prikaz grafa promjene snage strujanja fluida

## 6. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad sastoji se od izrade geometrije odvodnog kanala HE Rijeka i računalne simulacije nestacionarnog strujanja u njemu. Početak rada obilježen je podjelom hidroelektrana prema njihovoj instaliranoj snazi i protoku koji koriste te ja slikama predočen realan primjer svakog pojedinog tipa hidroelektrane. Rad dalje obrađuje osnovni način rada hidroelektrana. Nakon što su osnovna načela rada hidroelektrana objašnjena slijedi detaljni opis najvažnijih dijelova HE Rijeka za koju je i direktno vezan ovaj rad. Glavni dio rada započinje predstavljanjem vladajućih zakona fizike, a to su zakon o očuvanju mase i zakon o količini gibanja. Zatim se opisuje način izrade geometrije odvodnog kanala HE Rijeka. Protoci za definiranje nestacionarnog strujanja uzeti su iz glavnoga projekta. Moguće izraditi i precizniju simulaciju no što je u ovome radu ali zahtjeva dodatne kalibracije i stvarna mjerenja te izbjegavanje interpolacije između poprečnih presjeka. Gotova simulacija omogućuje nam pogled na kretanje fluida kroz odvodni kanal iz kojeg proizlaze zaključci o brzini kretanja fluida, protoku, vodenoj površini, snagi strujanja, a i samoj geometriji kanal. Nestacionarno strujanje u odvodnom kanalu HE Rijeka okarakterizirano je naglim skokovima i padovima što posebice vidimo u snazi strujanja, brzini strujanja i vodenoj površini dok se protok ponaša malo stabilnije. Graf brzine strujanja i snage strujanja izgledaju prilično slično iz čega zaključujemo da povećanjem brzine strujanja automatski raste i snaga strujanja. Visina vodnog lica i vodena površina drastično variraju tokom strujanja no simulacijom je za u radu navedene protoke dokazano da geometrija odvodnog kanala HE Rijeka to može pretrpjeti što znači da je rad hidroelektrane neometan i siguran.

## 7. LITERATURA

- [1] S interneta, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana>
- [2] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana\\_Rijeka](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Rijeka)
- [3] S interneta, <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane1528/pp-he-zapad/he-rijeka/1535>
- [4] S interneta, <https://en.wikipedia.org/wiki/HEC-RAS>
- [5] S interneta, <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>



## 8. POPIS OZNAKA I KRATICA

HE - hidroelektrana

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

$\eta$  - stupanj iskoristivosti [%]

$P$  - dobivena snaga [W]

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

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

$x$  - udaljenost duž toka [m]

$h$  - dubina toka [m]

$V$  - volumen [ $\text{m}^3$ ]

$A$  - površina poprečnog presjeka [ $\text{m}^2$ ]

$A_T$  - ukupna protočna površina [ $\text{m}^2$ ]

$t$  - vrijeme [s]

## 9. SAŽETAK

U ovome završnom radu opisan je način rada hidroelektrana. Svrha i uloga najvažnijih dijelova hidroelektrane pojašnjeni su na primjeru HE Rijeka. Zatim su navedeni i objašnjeni vladajućí zakoni fizike koji su neizostavan dio za računalnu simulaciju strujanja fluida te sam program HEC RAS u kojemu je izrađena simulacija. Izrada geometrije odvodnog kanala i simulacije prikazane su korak po korak. Rezultati izrađene geometrije i računalne simulacije grafički su prikazani.

Ključne riječi: odvodni kanal, HE Rijeka, HEC RAS, nestacionarno strujanje fluida

## **10. ABSTRACT**

This final paper describes the operation of hydroelectric power plants. The purpose and role of the most important parts of a hydroelectric power plant are explained using the example of the Rijeka Hydroelectric Power Plant. Then, the governing laws of physics, which are an essential part of computational fluid dynamics simulation, are listed and explained, along with the HEC RAS program where the simulation was conducted. The creation of the drainage channel geometry and the simulation are presented step by step. The results of the created geometry and computer simulation are graphically displayed.

Keywords: Rijeka Hydroelectric Power Plant, Rijeka HEP drainage channel, HEC RAS, unsteady fluid flow