

# Optimizacija poprečnog presjeka zaštitne rešetke u dovodnom kanalu hidroelektrane

---

**Martan, Ivor**

**Master's thesis / Diplomski 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:190:892712>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-08**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**OPTIMIZACIJA POPREČNOG PRESJEKA ZAŠTITNE  
REŠETKE U DOVODNOM KANALU HIDROELEKTRANE**

Rijeka, rujan 2023.

Ivor Martan

0069084642

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**OPTIMIZACIJA POPREČNOG PRESJEKA ZAŠTITNE  
REŠETKE U DOVODNOM KANALU HIDROELEKTRANE**

Mentor: prof. dr. sc. Zoran Čarija

Komentor: v. asist. dr. sc. Ivana Lučin

Rijeka, rujan 2023.

Ivor Martan

0069084642

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Rijeka, 14. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo**  
Predmet: **Računarska dinamika fluida**  
Grana: **2.15.04 mehanika fluida**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Ivor Martan (0069084642)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**  
Modul: **Računarska mehanika i inženjerstvo**

Zadatak: **Optimizacija poprečnog presjeka zaštitne rešetke u dovodnom kanalu hidroelektrane / Optimization of trash-rack cross section in hydroelectric power plant intake**

### Opis zadatka:

Upotrebom dostupnih CAD alata potrebno je definirati geometriju dovodnog kanala hidroelektrane s zaštitnom rešetkom. Za definiranu geometriju potrebno je generirati numeričku mrežu, pripremiti simulaciju i provesti numeričku analizu. Potrebno je napraviti optimizaciju poprečnog presjeka zaštitne rešetke u svrhu smanjenja gubitaka strujanja. Potrebno je izvršiti usporedbu strujanja fluida u originalnoj izvedbi i u poboljšanoj izvedbi.

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

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

---

Prof. dr. sc. Zoran Carija

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

---

Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## **IZJAVA**

Sukladno članku 13. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta, Sveučilišta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad u razdoblju od 6. ožujka 2023. godine do rujna 2023. godine uz pomoć mentora prof. dr. sc. Zorana Čarije i komentorice v. asist. dr. sc. Ivane Lučin, znanja stečenog tijekom fakultetskog obrazovanja, te koristeći navedenu literaturu.

Zadatak je bio zadan 6. ožujka 2023.

U Rijeci, rujna 2023.

---

Ivor Martan

## ZAHVALA

*Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Zoranu Čariji te posebice komentorici v. asist. dr. sc. Ivani Lučin na stručnom vođenju i usmjeravanju prilikom izrade diplomskog rada.*

*Zahvaljujem se svojoj obitelji na bezuvjetnoj potpori, razumijevanju i strpljenju.*

*Također se želim zahvaliti svojim prijateljima, kolegama i djevojci koji su mi olakšali studiranje i učinili ga ljepšim.*

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. VODNA ENERGIJA I HIDROELEKTRANE .....	3
2.1. Hidroelektrane u Europi.....	4
3. VRSTE ZAŠTITNIH REŠETKA.....	5
3.1. Zaštitna rešetka s krajnjim nosačem.....	5
3.2. Zaštitna rešetka s bočnim nosačem .....	6
3.3. Integralna zaštitna rešetka .....	7
3.4. Zaštitna rešetka za obilaženje hidroelektrane.....	8
4. ZAŠTITA RIBA .....	10
4.1. Učinci ispusta .....	17
4.2. Utjecaj različitih poprečnih presjeka zaštitne rešetke .....	17
5. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA.....	20
5.1. Zakon očuvanja i ravnoteže u dinamici fluida .....	20
5.1.1. Zakon ravnoteže količine gibanja .....	24
5.1.2. Zakon ravnoteže energije.....	26
5.1.3. Jednadžba momenta .....	27
5.2. Navier-Stokesove jednadžbe .....	28
5.3. Numeričke mreže .....	29
6. IZRADA NUMERIČKE SIMULACIJE .....	32
6.1. Izrada domene .....	32
6.2. Izrada numeričke mreže .....	35
6.3. Postavke simulacije.....	41
6.4. Usporedba hidrauličkih gubitaka .....	42
6.5. Normalizirani hidraulički gubici .....	43

7.	REZULTATI .....	44
7.1.	Rezultati za različite nagibe rešetke .....	44
7.2.	Rezultati za različite poprečne presjeke rešetke .....	46
7.3.	Hidraulički gubici pri različitim nagibima .....	47
7.4.	Srednja vrijednost hidrauličkih gubitaka .....	52
7.5.	Normalizirani hidraulički gubici .....	54
8.	ZAKLJUČAK .....	57
9.	LITERATURA .....	58
10.	POPIS SLIKA .....	60
11.	POPIS TABLICA .....	62



## 1. UVOD

Zaštitne rešetke su konstrukcije koje se često koriste u dovodnom kanalu ispred hidroelektrane kako bi spriječile ulazak raznih nepoželjnih stvari poput plutajućeg bilja, grana, sedimenta, riba i drugih velikih predmeta koji bi mogli naštetiti radu hidroelektrane. Tradicionalne zaštitne rešetke koje se nalaze ispred hidroelektrane, često predstavljaju prepreke za ribe, što može dovesti do ozljeda ili smrtnosti. Riba koje prolaze kroz ovakve strukture susreću se s promjenama tlaka i turbulentnih tokova, što može imati štetne učinke na njihovo zdravlje. Jedan od bitnih primjera jest kako se kroz dugi niz godina znatno smanjio broj migrirajućih riba selica kao što su ugrožena vrsta katadromne europske jegulje (*Anguilla Anguilla*) te anadromni atlantski losos (*Salmo salar*). Ove dvije vrste često nailaze na problem prilikom prolaska kroz umjetno izrađene prolaze kao što je zaštitna rešetka. Jedan od velikih razloga visoke smrtnosti riba jest taj da kada su ribe vrlo malene, mogu proći kroz razmak između zaštitne rešetke čime ulaze u turbinu hidroelektrane. Smrtnost malenih riba je vrlo velika ne samo zbog ulaska u turbinu hidroelektrane, već i zbog slučajeva kada voda pritišće ribu na zaštitnu rešetku te ona nije u mogućnosti isplivati jer tok vode velike brzine nadjačava njezine sposobnosti plivanja. Jedan od načina da se navedeni problemi riješe je kroz optimizaciju dizajna samih rešetki, odnosno blažim naginjanjem zaštitne rešetke, odvođenjem riba u zaobilazni kanal ili korištenjem različitih poprečnih presjeka.

Česti problem s kojim se susreće zaštitna rešetka je nakupljanje onečišćenja koje blokira protok fluida. Ovakav problem rješava se čišćenjem zaštitne rešetke ili postavljanjem rešetke s kutom nagiba kako bi se otpad preusmjerio. Optimizacija zaštitne rešetke uključuje pronalaženje najefikasnijeg dizajna koji postiže ravnotežu između zadržavanja ili preusmjeravanja otpada i riba i minimizacije hidrauličkih gubitaka koji se pojavljuju. Glavni cilj je maksimizirati otvorenu površinu za protok vode, a istovremeno učinkovito zadržavajući ili odvođajući otpad i ribe. Ovaj proces optimizacije ključan je za poboljšanje energetske učinkovitosti postrojenja, minimizaciju oštećenja te smanjenje troškova održavanja. Prilikom optimizacije zaštitne rešetke postoji mnogo čimbenika. Neki od njih su veličina i vrsta otpada i riba koji se očekuje na ulazu, hidrauličke karakteristike protoka vode, zahtjeve za strukturalni integritet i troškovne faktore. Kroz pristup iterativne analize, operateri hidroelektrana mogu uzeti u obzir različite oblike presjeka i dimenzija otvora kako bi se odabrao dizajn koji nudi najbolju ravnotežu između sprječavanja ulaska otpada

i riba i hidrauličkih performansi. Optimizacijom poprečnog presjeka zaštitne rešetke, operateri hidroelektrana mogu osigurati pouzdani i učinkovit rad sustava za unos vode, što rezultira poboljšanom proizvodnjom električne energije, smanjenim troškovima održavanja i smanjenim utjecajem na okoliš.

Cilj ovog diplomskog rada je detaljna analiza i uvid u proces minimizacije hidrauličkih gubitaka za različite poprečne presjeke zaštitne rešetke. Napraviti će se četiri poprečna presjeka zaštitne rešetke na kojima će se provoditi računalne simulacije u svrhu izračuna padova tlaka te hidrauličkih gubitaka kako bi se dobio uvid u najefikasniji poprečni presjek zaštitne rešetke.

## 2. VODNA ENERGIJA I HIDROELEKTRANE

Vodna energija spada u obnovljivi izvor energije koji koristi kinetičku energiju vode za proizvodnju električne energije. Snaga vode se vodnim turbinama pretvara u rotacijski mehanički pokret, koji se potom koristi za generiranje električne energije. Kako bi se energija pohranila za kasniju upotrebu, koristi se tehnika akumulacije. Uobičajeni način akumulacije je izgradnja brane na rijeci ili planinskom jezeru. Kada je potražnja za električnom energijom visoka, voda se pušta nizvodno, prolazeći kroz vodne turbine te se proizvodi električna energija. U slučaju kada je potražnja niska, voda se zadržava u akumulaciji, stvarajući rezervoar energije koji se može koristiti kada je potrebno. Hidroelektrane se često postavljaju u prirodni tok rijeke kako bi se iskoristili prirodni padovi vode te protok. Rijeke s većim padom i protokom su pogodnije za izgradnju hidroelektrana zbog veće iskoristivosti kod pretvorbe energije. Drugi oblik korištenja vodne energije jest uz pomoć prirodnih procesa plime i oseke [1]. Ovakav način generiranja električne energije iz energije vode koristi specifično oblikovane spremnike za hvatanje i ispuštanje vode, čime se generira energija koja se zatim koristi za proizvodnju električne energije.

Velika prednost dobivanja električne energije iz kinetičke energije vode jest da se količina vode stalno obnavlja putem oborina i prirodnog vodnog ciklusa te hidroelektrane mogu pružiti konstantan izvor električne energije i imati fleksibilnost u reguliranju proizvodnje energije prema potrebama potrošača. Također, hidroelektrane ne emitiraju značajne količine stakleničkih plinova, što ih čini relativno čistim izvorom energije. Međutim, postoje i veliki izazovi povezani s vodnom energijom. Izgradnja hidroelektrana često ima veliki utjecaj na okoliš i ekosustav rijeke. Prilikom izgradnje brane za hidroelektranu potrebno je pripremiti veliku površinu zemljišta koja često rezultira gubitkom staništa za mnoge životinje. Izgradnjom brane može doći do promjene prirodnih tokova vode i protoka rijeke. Ovakve promjene mogu poremetiti ekosustav te smanjiti kvalitetu vode i poremetiti prirodne procese. Brane predstavljaju velike prepreke za migraciju riba koje se obično kreću nizvodno ili uzvodno te ovo ima veliki utjecaj na reprodukciju ribljih vrsta kao što su europske jegulje i atlantski losos [2]. Da bi se ublažio problem kod migracija riba, osim novih načina izrade zaštitnih rešetki s kanalom za obilaženje, koriste se i riblje ljestve te srodne metode za omogućavanje ribama da preskaču brane i prelaze rijeku. Bazični primjer ribljih ljestvi prikazan je na slici 2.1. Dok hidroelektrane samo po sebi ne proizvode emisije stakleničkih plinova, izgradnja brana i akumulacija može rezultirati otpuštanjem stakleničkih plinova kada biljke,

drveće i biomasa budu potopljeni pod vodom, proces raspadanja proizvodi metan, koji spada u snažne stakleničke plinove.



*Slika 2.1. Riblje ljestve [3]*

## **2.1. Hidroelektrane u Europi**

U Europi je trenutno 21387 aktivnih hidroelektrana te je planirano kako bi se taj broj povećao u bliskoj budućnosti za dodatnih 8785 hidroelektrana. Gotovo polovica hidroelektrana nalazi se na području Balkana te istoku Mediterana. 33% od ukupnog broja hidroelektrana u Europi nalazi se na zaštićenim područjima poput nacionalnih parkova i parkova prirode. Više od 90% postojećih hidroelektrana u Europi su relativno malene, što znači da svaka elektrana proizvodi najviše 10 MW električne energije [4].

Aktivne hidroelektrane u Hrvatskoj predstavljaju čak više od polovice elektrana hrvatskog elektroenergetskog sustava. Trenutno u Republici Hrvatskoj nalazi se 37 hidroelektrana. Od toga je 17 velikih i 20 malih hidroelektrana te nekolicina mini hidroelektrana koje imaju malu proizvodnju električne energije u usporedbi s velikim. Najveća hidroelektrana u Hrvatskoj je HE Zakučac koja ima instaliranu snagu od 486 MW te je odgovorna za trećinu ukupne hidroenergije u Republici Hrvatskoj.

### 3. VRSTE ZAŠTITNIH REŠETKA

Konstrukcija zaštitne rešetke u dovodnom kanalu hidroelektrane znatno varira ovisno o različitim uvjetima koji se pojavljuju. Detalji i konstrukcija ovise o različitim konfiguracijama strukture rešetke, dubini vode i dostupnosti za zamjenu te održavanje. Zaštitne rešetke obično su izrađene od pravokutno oblikovanih, vertikalnih šipki koje su povezane bočnim, horizontalnim šipkama ili nekim drugim oblicima. Iako okrugle ili hidrodinamičke šipke, odnosno lamele mogu smanjiti hidraulički gubitak tlaka, one se rjeđe koriste zbog dodatnih troškova te sklonosti vibriranju. Rešetke izrađene s fiksnim okruglim šipkama i cijevima su podložnije začepljenju jer predmeti mogu djelomično proći kroz zaštitnu rešetku, a zatim se čvrsto zaglaviti, što otežava čišćenje. Zaštitne rešetke obično se izrađuju od konstrukcijskog čelika, iako se u novije vrijeme izrađuju i od staklo plastike, plastike, kovanog željeza i nehrđajućeg čelika [5]. Kada su potrebni vrlo mali otvori, često se koriste prefabricirane rešetke, perforirane ploče te rešetke s kosim žicama.

Zaštitne rešetke mogu se podijeliti na četiri vrste prema zahtjevima konstrukcije i instalacije, a to su rešetke s krajnjim nosačem, rešetke s bočnim nosačem, integralna rešetka te rešetka za obilaženje hidroelektrane. Zadnja vrsta je u današnje vrijeme posebice zanimljiva zbog očuvanja živog svijeta.

#### 3.1. Zaštitna rešetka s krajnjim nosačem

Zaštitna rešetka s krajnjim nosačem je najjednostavnija i najjeftinija vrsta zaštitne rešetke. U ovoj rešetki, šipke su postavljene u uspravan položaj s osloncima na krajevima kako je prikazano na slici 3.1. Ovakve rešetke koriste se često za male hidroelektrane u rijekama s malim protokom gdje rešetke nisu previše uronjene u stupac vode [6]. Šipke su obično postavljene pod kutom te pojedinačno prenose opterećenje. Zahvaljujući karakterističnim krajnjim nosačima, ove rešetke mogu se postaviti jedna do druge kako bi se dobila potrebna površina. Ovakav tip zaštitne rešetke je idealan u situacijama kada je potrebno pokriti veće površine, ali pri manjim protocima. U slučajevima kada je veća dubina te su potrebne duže šipke, postavljaju se dodatne potporne grede koje su okomite na vertikalne šipke kako ne bi došlo do pucanja uslijed nagomilavanja otpada.

Ovakve rešetke nerijetko imaju ugrađen automatski sustav za čišćenje te odčepljivanje otpada koji se nakuplja.



*Slika 3.1. Zaštitna rešetka s krajnjim nosačem [5]*

### **3.2. Zaštitna rešetka s bočnim nosačem**

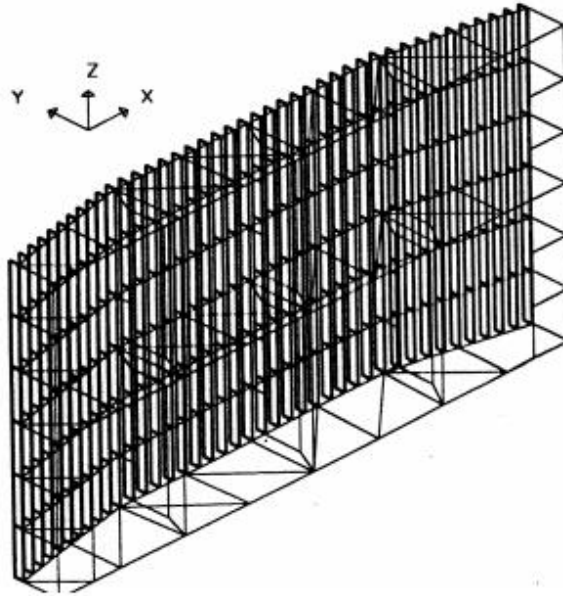
Zaštitna rešetka s bočnim nosačem obično ima šipke postavljene u horizontalni položaj te se podupire s oba kraja. Rešetke se podržavaju ili zadržavaju pomoću vodilica ili utora. Rešetke s bočnim nosačem mogu se postavljati i u uspravan položaj, poduprte bočnim šipkama ili gredama, a mogu se koristiti u nagnutom ili ležećem položaju. Ova vrsta rešetke se koristi kada dolazi do velikih opterećenja i momenta savijanja koji ne bi bili prihvatljivi za zaštitnu rešetku s krajnjim nosačem. Do takvih slučajeva dolazi kada se veliki dio rešetke nalazi duboko pod vodom. Glavno ograničenje kod konstruiranja rešetke s bočnim nosačem je raspon, koji je izravno povezan s troškovima izrade. Na slici 3.2. prikazana je bočna rešetka nagnuta pod kutom. Vidljivo je kako ova rešetka ima dodatne potporne grede kako ne bi došlo do pucanja.



*Slika 3.2. Zaštitna rešetka s bočnim nosačem [5]*

### **3.3. Integralna zaštitna rešetka**

Integralne zaštitne rešetke su kombinacija tankih pločastih panela ili šipka s bočnim potpornim gredama ili elementima. Integralne zaštitne rešetke mogu biti kružnog, trokutastog ili najčešće kutijastog oblika. Mogu biti dizajnirane tako da imaju ojačane panele koji su zavareni ili spojeni vijcima kako bi mogli prenositi veće opterećenje. Ove rešetke se obično koriste za potpuno uronjene ulaze u hidroelektrane te su izrađene u obliku čeličnog kaveza. Ova vrsta rešetke je poželjna kada se ne želi ili ne može koristiti betonska potpora ili kada nije namjeravano zamjenjivanje. Ovakva rešetka je također korisna kada se za čišćenje koristi povratno ispiranje. Primjer integralne zaštitne rešetke prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3. Integralna zaštitna rešetka [7]

#### 3.4. Zaštitna rešetka za obilaženje hidroelektrane

Unatoč velikoj efikasnosti trenutno najraširenijih vrsta zaštitnih rešetka postoji jedan vrlo veliki problem, a to je očuvanje živog svijeta. Ova vrsta zaštitne rešetke u hidroelektrani obavlja dvostruku ulogu. Služi kao sakupljač otpada i neželjenih predmeta, dok istovremeno pruža ribama i velikim neželjenim objektima put oko hidroelektrane. Ovakva vrsta zaštitne rešetke prikazana je na slici 3.4. Zaštitne rešetke za obilaženje hidroelektrane sastoje se od zasebnog kanala ili prolaza uz glavni tok vode, koji omogućuje preusmjeravanje otpada pored primarnog ulaznog kanala i usmjerava ga prema odvojenom području za odlaganje ili prikupljanje dok ribe mogu slobodno nastaviti nizvodno kretanje. Ovakav tip rešetke sprječava česta začepjenja glavnog ulaznog kanala te oštećenja turbine dok istovremeno osigurava bioraznolikost rijeke. Ovakav tip zaštitne rešetke ima mnogo varijacija ovisno o flori u kojoj se postrojenje nalazi te ga je potrebno pažljivo konstruirati kako bi se optimizirali hidraulički gubici uz očuvanje živog svijeta.





*Slika 3.4. Zaštitna rešetka za obilaženje hidroelektrane [8]*

## 4. ZAŠTITA RIBA

Dizajn, instalacija i rad zaštitnih rešetki mogu značajno povećati operativne i kapitalne troškove hidroelektrana. Važno je da operateri hidroelektrana prepoznaju potencijalno opasne utjecaje na ribu i riblje zajednice kao i cijeli ekološki sustav.

Dijadromne ribe su migracijske vrste koje se kreću iz slatkih voda u more i obrnuto. Dijadromne ribe mogu se podijeliti na anadromne, katadromne te amfidromne. Anadromne ribe provode veći dio života u moru, ali odlaze u slatke vode kako bi se mrijestile (Losos, Šaran). Katadromne ribe za razliku od anadromnih provode veći dio života u slatkoj vodi, ali radi mriještenja odlaze u more (Jegulje). Amfidromne ribe putuju iz mora u slatku vodu i obrnuto neovisno o mriještenju (Bas). Ove vrste migracijskih riba posebice su u opasnosti jer nailaze na brojne prepreke, pregrade i druge opasnosti prilikom putovanja između rijeka i mora. Zbog sve većeg rizika s kojim se susreću ove vrste riba, prve su postale zakonom zaštićene. Unatoč uvedenim zakonima veliki broj hidroelektrana na području Engleske i Walesa i dalje zbog svoje strukture i funkcionalnosti predstavlja veliku opasnost za ovu vrstu riba, ali zbog velikih ekonomskih zahtjeva nisu u mogućnosti promijeniti svoj način funkcionalnosti

Iz navedenog razloga znanstvenici iz Environment Agency izradili su opsežno istraživanje Screening for Intake and Outfalls: a best practice guide u sklopu kojeg su proveli niz ispitivanja u svrhu identifikacije ponašanja različitih vrsta riba ovisno o tipu rešetke na koju nailaze. Provedeno putem analize globalnih primjera prikazuju se metode koje su poznate kao najučinkovitije za različite vrste riba i njihove životne faze u različitim situacijama. Također je obuhvaćen pregled širokog spektra tehnologija koje se često koriste za zaštitu riba, uz pružanje statističkih podataka o smrtnosti riba pod različitim uvjetima [8]. Ulazi vode na elektranama koje se nalaze na estuariju vrlo često su smatrani jednom od potencijalno najvećih prijetnji za migraciju lososa i morskih pastrva. Divlja populacija atlantskog lososa na rijeci Usk koja se nalazi u južnom Walesu varira između  $8,4 \cdot 10^4$  i  $3 \cdot 10^5$ . Hidroelektrana Uskmouth koja se nalazi na estuariju rijeke zabilježila je kako godišnja stopa smrti lososa zbog turbina hidroelektrane iznosi 0.1%, što odgovara smrti oko 200 lososa godišnje. Na hidroelektrani Fawley koja crpi vodu iz rijeke Itchen i rijeke Test zabilježeno je kako godišnje u turbini zapne oko 203 atlantskih lososa i 42 morske pastrve. Nakon provedenih istraživanja na brojnim hidroelektranama na području Ujedinjenog Kraljevstva

dobiveni su rezultati kako u kišnim godinama smrtnosti atlantskog lososa iznosi manje od 5%, u godinama umjerenih oborina oko 15% te u godinama iznimne suše može iznositi i do 80%. Kao rezultat toga neke hidroelektrane instalirale su zaštitne rešetke na ulazima te postavile akustične odbijače kojim se tjeraju ribe. Druga migratorna vrsta riba koja je također bila uhvaćena u mnogim turbinama hidroelektrane je jegulja. S obzirom na sve manji broj jegulja u svijetu, hidroelektrane postaju veliki ekološki problem. Najveći problem pojavljuje se kod hidroelektrana koje koriste prirodni protok vode. Unatoč postavljenim zaštitnim rešetkama vrlo često se događa kako mladunci atlantskog lososa i jegulja zalutaju između rešetke te završe u turbini. Prolaskom kroz turbinu, jegulja ima tri puta veći rizik od udarca turbine za razliku od drugih vrsta.

Veliki korisnici vode iz obalnih i estuarijskih područja su termoelektrane. Termoelektrane su smještene kako bi bile u mogućnosti koristiti velike količine rashladne vode. Protoci vode koje koristi termoelektrana za hlađenje iznose između 0,5 do  $5 \cdot 10^3$  megalitara vode dnevno. Osim termoelektrana, veliki korisnici vode na obalama mora te estuarijama rijeka su rafinerije, postrojenja za proizvodnju energije iz plime i oseke, postrojenja za desalinizaciju vode, nuklearne elektrane te brodogradilišta. Velik broj luka i pristaništa za brodove zahtijevaju crpljenje vode te takve aktivnosti mogu rezultirati smrću riba. Ukupan broj riba prikazan u tonama po godini koje uđu u usisni kanal postrojenja elektrane prikazan je u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Ukupan broj riba ulovljenih u elektranama u ovisnosti o lokaciji postrojenja [8]

Elektrana	Lokacija	Ukupni broj ulovljenih riba (tona/godini)
Dungeness A	otvorena obala	93
Sizewell	otvorena obala	43
Gravelines	otvorena obala	240
Dungeness B	otvorena obala	20,6
Hinkley B	estuarij	24
Dunkirk	estuarij	13
Fawley	estuarij	6,4
Wylfa	otvorena obala	2,4
Kingsnorth	estuarij	6,6
Shoreham	estuarij	0,68

Iako je energetska industrija nastojala staviti ove brojeve stradalih i ozlijeđenih riba u kontekst drugih uzroka smrtnosti riba, glavni cilj industrije bio je poboljšati tehnologije na ulazu u elektranu kako bi se povećao usis vode potrebne za hlađenje te kako bi što manje riba ušlo u postrojenje. Nakon vidljivo loših rezultata podneseni su prigovori te nakon izgradnje nove nuklearne elektrane Sizewell B postavljeni su uvjeti koji reguliraju protok na ulazu. Nuklearno postrojenje je pomaknulo svoj usis dalje od čestih pristaništa riba te ga moraju pomno čistiti kako ne bi došlo do stvaranja algi i živog svijeta što bi privlačilo ribe. Također su izrađeni i sustavi povratka ribe koji sakupljaju ribu koja je zapela i vraćaju je u prirodu. Nakon izrađene usporedbe nuklearne elektrane Sizewell B s Sizewell A dobiveni rezultati su prikazani u tablici 4.2. Prvi stupac prikazuje vrstu riba koje dolaze u susret s usisom postrojenja, drugi stupac prikazuje umanjen postotak riba u odnosu na postrojenje Sizewell A dok treći stupac prikazuje smrtnost ribe u povratnom sustavu. Iz tablice je vidljivo kako najveću stopu preživljavanja ima Iverak koji se u potpunosti uspije vraćati kroz povratni sustav za ribe dok Haringe imaju najveću smrtnost u povratnom sustavu jer su previše osjetljive. Ulazak Basa i Bakalara smanjuje se za više od 90% u usporedbi s postajom Sizewell A.

Tablica 4.2. Omjer ulaska i preživljavanja riba postrojenja Sizewell B u odnosu na Sizewell A [8]

Vrsta	Ulaz u postrojenje	Povratni sustav
Iverak	54%	0%
Morski list	63%	4%
Bakalar	100%	6%
Limanda	46%	20%
Bas	91%	11%
Bjelica	79%	52%
Haringa	74%	100%

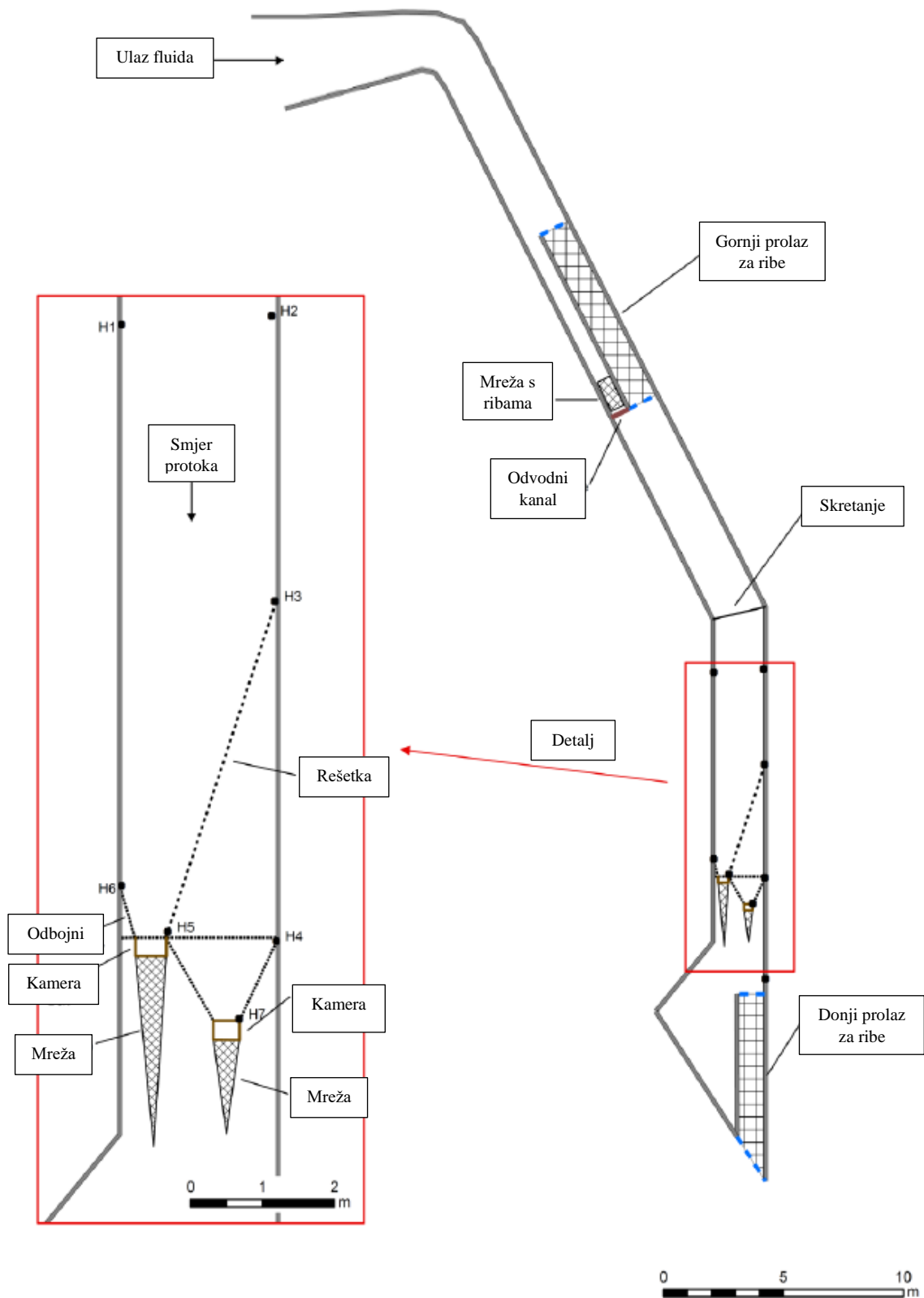
Na novijim postrojenjima bilo ona na estuariju rijeke ili obale uvedena su dodatna poboljšanja u obliku akustičnih sustava ili dodatnih rešetka koje će spriječiti ulazak ribe te ih odvoditi u drugom smjeru.

Prema eksperimentalnom istraživanju izvedenom na rijeci Test u gradu Romsey [9] dobiveni su zapanjujući rezultati na temelju dvije ugrožene vrste riba, anadromnom atlantskom lososu te katadromnoj europskoj jegulji. Obje ribe spadaju u grožene vrste riba selica. Ove vrste riba putuju na velike udaljenosti te se koriste osjetilima za navigaciju poput mirisa i magnetskih polja.

Kako bi se simulirala selidba napravljeno je umjetno korito koje ima širinu 2,2 m, dubinu 1,5 m te dužinu 15 m. Rešetka je izrađena od tankih šipki razmaka 12 mm te pod kutom od 75 stupnjeva. Istraživanja su napravljena s prosječnom brzinom vode u kanalu od 0,91 m/s. Zaštitna rešetka postavljena je kao na slici 4.1. Prema napravljenoj skici prikazanoj na slici 4.2. jedna mreža simulira ulaz u turbinu hidroelektrane dok druga mreža simulira zaobilazni kanal koji bi koristile ribe.

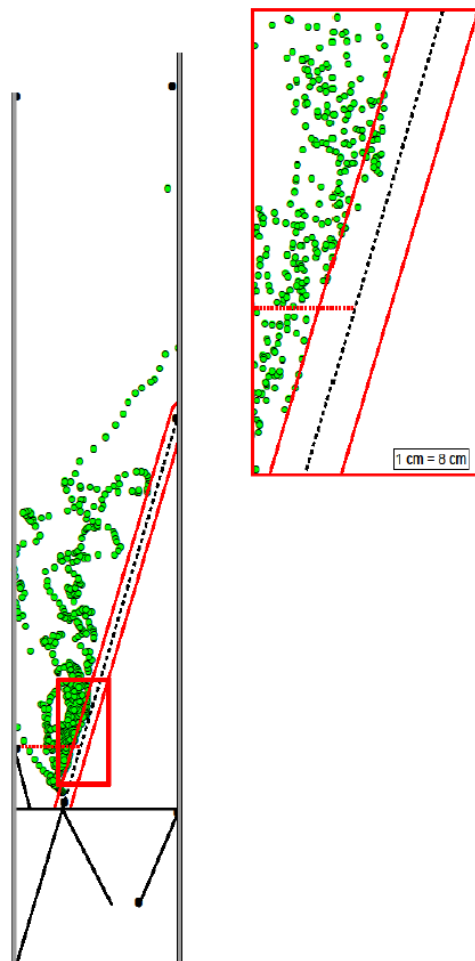


*Slika 4.1. Izrada eksperimentalne rešetke [9]*



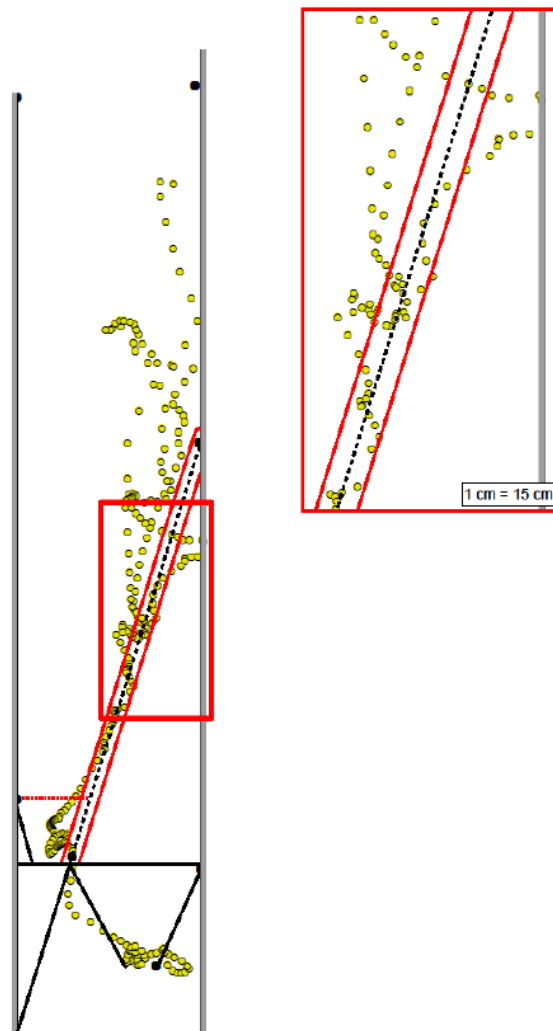
Slika 4.2. Skica eksperimentalnog ispitivanja [9]

Istraživanje je provedeno s veličinama lososa od 105 mm pa do 170 mm te su ribe nasumično puštene u kanal neovisno o veličini. Anadromni atlantski losos kretao se nizvodno te je zabilježeno da je 99% posto riba imalo interakciju s rešetkom. Ribe su pokušale proći kroz rešetku, zalijetale se u nju, ali zbog malenog razmaka nisu bile uspješne u tome. Uspješnost lososa da zaobilazi rešetku je izuzetno velika jer se od svega puštenih 294 lososa tek jedan zaglavio u njoj. Unatoč tek jednoj ribi koja je zaglavila u rešetki bila je nekolicina slučajeva gdje su ribe privremeno zaglavile te bi se okrenule i uspješno izvukle. Unatoč tome, iz rezultata je dobiveno kako ni jedna riba nije prošla kroz rešetku te su sve uspješno ušle u zaobilazni kanal. Kretanje anadromnog atlantskog lososa praćeno je posebnim kamerama te mikrofonima koji su zabilježavali zvukove u slučaju sudara s rešetkom. Putanja kretanja prikazana je na slici 4.3.



Slika 4.3. Putanja kretanja anadromnog atlantskog lososa [9]

U istraživanju su korištene jegulje dužina od 335 mm do 555 mm te su ribe također nasumično puštane iz mreže u eksperimentalni kanal. Eksperiment je pokazao da su jegulje općenito pustolovne i istraživačke prirode, krećući se uz zidove kanala ili u blizini rešetke. Zabilježeno je kako su sve ribe imale interakciju s zaštitnom rešetkom. U ovom slučaju nije došlo do nijednog zaglavlivanja od svih 67 puštenih jegulja. U eksperimentu je primijećeno kako su neke jegulje zbog svoje strukture bile u mogućnosti proći kroz rešetku. Također je zapaženo kako jegulje mogu prolaziti kroz vrlo uske prostore ovisno o protoku vode. Što je manji protok vode one imaju veću kontrolu i preciznost prilikom plivanja. Putanja kretanja katadromne europske jegulje prikazana je na slici 4.4.



Slika 4.4. Putanja kretanja katadromne europske jegulje [9]



#### **4.1. Učinci ispusta**

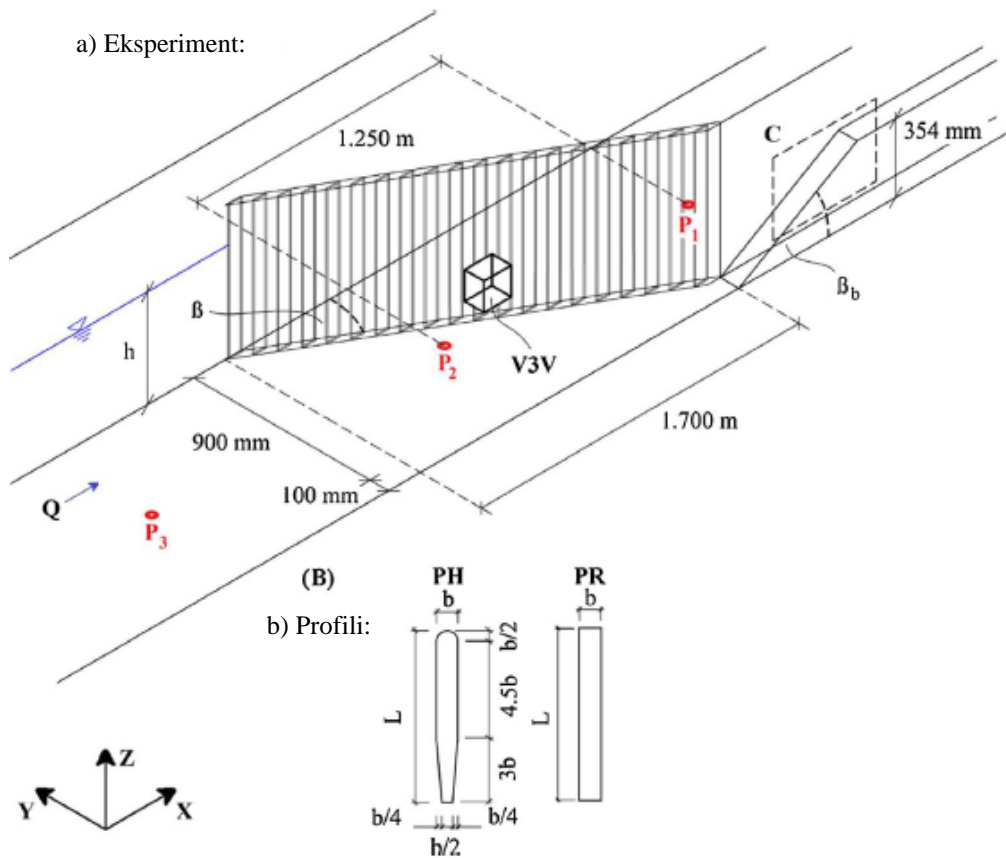
Sezonske migracije prema uzvodnim područjima kao što su rijeke i jezera okupiraju razne vrste riba kao i mrjestove. U ovakvim migracijama često se nalazi veliki broj malih riba koje su u ranjivim fazama te odlaze u ispuste hidroelektrana, ribnjaka i drugih industrijskih otpadnih voda. Ovakvi slučajevi ne samo da odvlače ribe te usporava njihov napredak uzvodno, već se mogu i ozlijediti pokušavajući ući u ispuste. Ispuštanje može stvarati značajne poteškoće kada se obavlja u blizini donjeg ulaza ribljih ljestvi ili staza. Zabilježeno je kako ispusti stvaraju veliki problem za losose i morske pastrve jer vrlo često mogu proći kroz loše održavane rešetke. Vrlo je važno da rešetke koje se nalaze na ispustu ostanu učinkovite i kada ispust nije aktivan. Inače, moguće je da ribe tijekom mirnih razdoblja uđu u ispust i kasnije riskiraju da ostanu zarobljene ili ozljeđene. Aktivno migrirajuće ribe privlači rezidualni protok iz cijevi kada turbina nije u funkciji te nakon pokretanja, ribe koje su ušle u turbinu postaju izložene udarcu lopatica turbine.

#### **4.2. Utjecaj različitih poprečnih presjeka zaštitne rešetke**

U svrhu zaštite živog svijeta koriste se različite izvedbe zaštitnih rešetka. Kako bi se istraživali učinci različitih izvedbi zaštitnih rešetka koriste se numeričke simulacije. Numeričke simulacije temeljni su dio računarske dinamike fluida te omogućavaju rješavanje zahtjevnih jednadžba i problema. Glavni cilj računarske dinamike fluida je razumjeti i modelirati ponašanje fluida u različitim slučajevima uz pomoć raznih numeričkih metoda koje se temelje na iterativnom postupku. Korištenjem numeričkih simulacija dobiva se uvid u ponašanje fluida oko tijela ili struktura kao što je zaštitna rešetka te se mogu dobiti pouzdani rezultati bez provođenja stvarnog eksperimenta. Samim time one omogućavaju testiranje različitih scenarija i dizajna bez potrebe za izradom fizičkih prototipa. Ovo značajno utječe na troškove istraživanja i omogućuje moguću optimizaciju proizvoda, a može i ubrzati proces razvoja proizvoda.

Jedan od istraživačkih radova koji je temeljio svoje istraživanje na numeričkim simulacijama različitih izvedbi zaštitne rešetke u svrhu očuvanja živog svijeta je rad *Experimental hydraulics on fish-friendly trash racks: an ecological approach*. *Ecological Engineering*. U navedenom radu

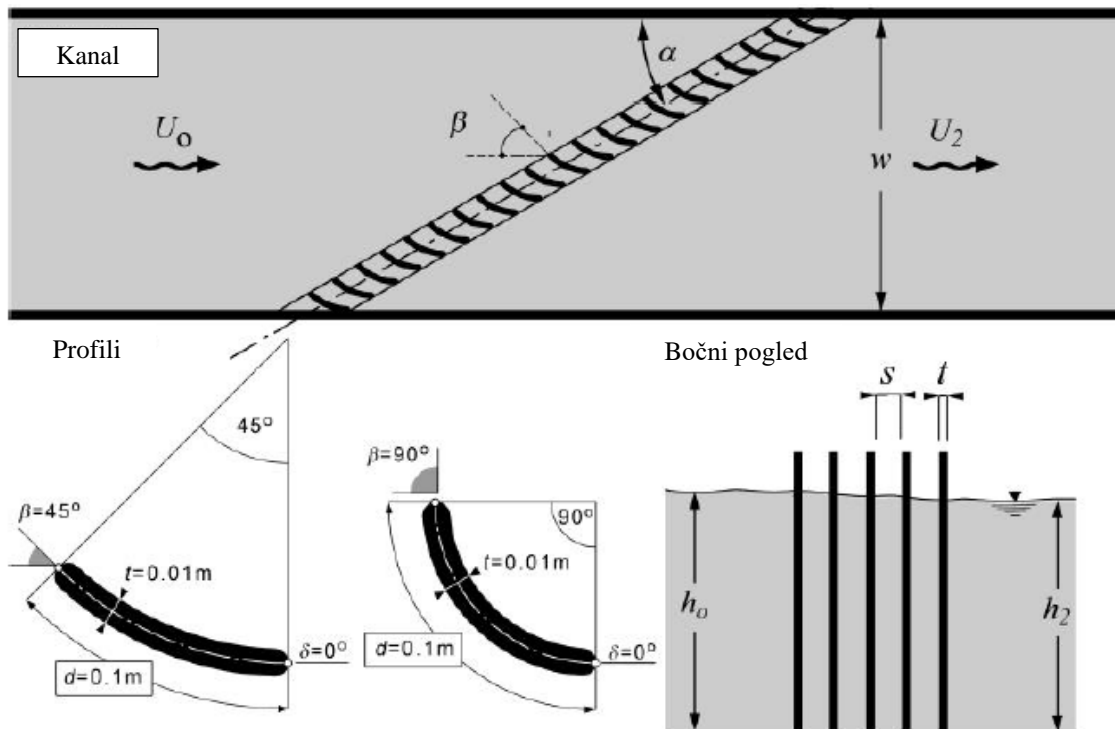
istražio se utjecaj nagnute zaštitne rešetke s razmacima lamela od 15 mm za različite nagibe u uvjetima stacionarnog strujanja. Nagnutost rešetke i profili prikazani su na slici 4.5.a te su eksperimentalnim istraživanjem zabilježeni rezultati koji pokazuju da rešetke s okomitim usmjerenjem i horizontalnim lamelama imaju vrlo slične padove tlaka neovisno o poprečnom presjeku. Također je izmjereno kako rešetke s vertikalno orijentiranim lamelama postižu 3 do 8 puta veće padove tlaka u odnosu na druge konfiguracije. U radu se također promatrao i utjecaj dvije vrste različitih poprečnih presjeka zaštitne rešetke (Slika 4.5.b).



Slika 4.5. Primjer istraživanja za dva poprečna presjeka zaštitne rešetke [10]

I u ostalim istraživačkim radovima osim klasičnih pravokutnih profila, počeli su se promatrati i različiti novi profili u svrhu smanjivanja hidrauličkih gubitaka. Prema provedenom istraživanju [11], profili s izuzetno malim hidrauličkim gubicima su profili oblika kao na slici 4.6. b). Ovakvi profili smatraju se hidrodinamičnim tijelima na koja djeluju manje sile te u slučaju turbulentnog strujanja dolazi do veće količine gibanja te je zbog toga granični sloj duže slijepljen uz stijenu

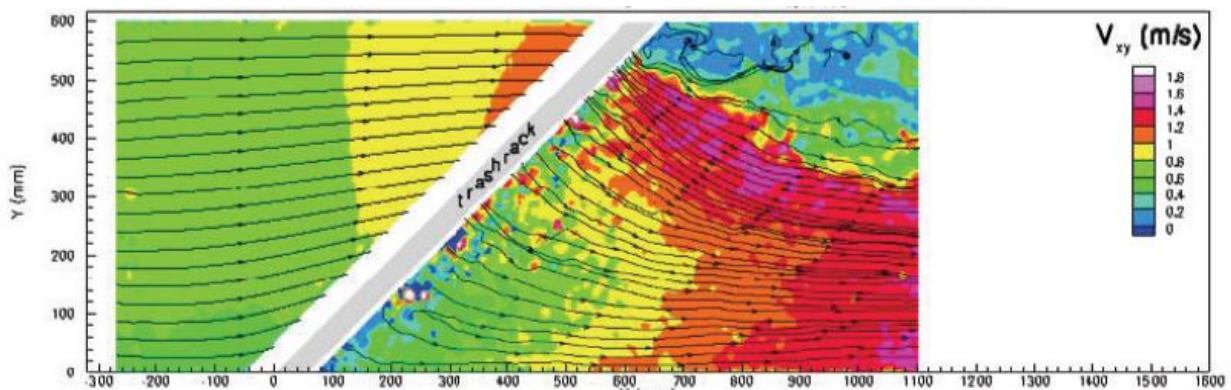
samog tijela. Ovakva pojava uzrokuje kasniju točku separacije zbog čega dolazi do manjeg vrtloženja nakon tijela, a samim time i manjim hidrauličkim gubicima. Eksperiment je napravljen s skaliranim stvarnim modelom koji je imao kanal širine 0,5 m, dubine 0,6 m te dužine 12 m. Istraživanje je napravljeno za različite kutove nagiba, razmake i zakrivljenosti lamela u rešetki. Rezultati dobivenog istraživanja pokazuju kako su hidraulički gubici znatno manji s obzirom na pravokutne poprečne presjeke. Ovakvi poprečni presjeci imaju veliki potencijal za zaštitu i usmjeravanje riba dok istovremeno osiguravaju hidroelektranama bolju učinkovitost.



Slika 4.6. Novi dizajn lamela [11]

## 5. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA

Računalna dinamika fluida je analiza sustava koji uključuju protok fluida, prijenos topline i sve vezane fenomene putem simulacija temeljenih na računalu. Ova tehnika je vrlo korisna te obuhvaća širok spektar industrijskih područja [12]. Pri proučavanju zaštitne rešetke, računalna dinamika fluida ima vrlo bitnu ulogu. Pomoću računalne dinamike fluida moguće je napraviti vizualizaciju polja strujanja oko zaštitne rešetke. Vizualizacija polja strujanja igra ključnu ulogu u dubljem razumijevanju ponašanja fluida. Dok su numeričke simulacije odgovorne za kvantitativne podatke o brzinama, tlakovima te drugim parametrima, vizualizacija omogućava prikaz kompleksnih strujanja i turbulencije. Primjer korištenja računalne dinamike fluida prikazan je u doktoratu *Hydraulik und fischbiologische Effizienz*. U ovom doktoratu prije provođenja mjerenja na stvarnom eksperimentu napravljene su numeričke simulacije u kojima je promatrano nastajanje fluida na zaštitnu rešetku. Primjer vizualizacije pomoću kontura brzina te strujnica prikazan je na slici 5.1.



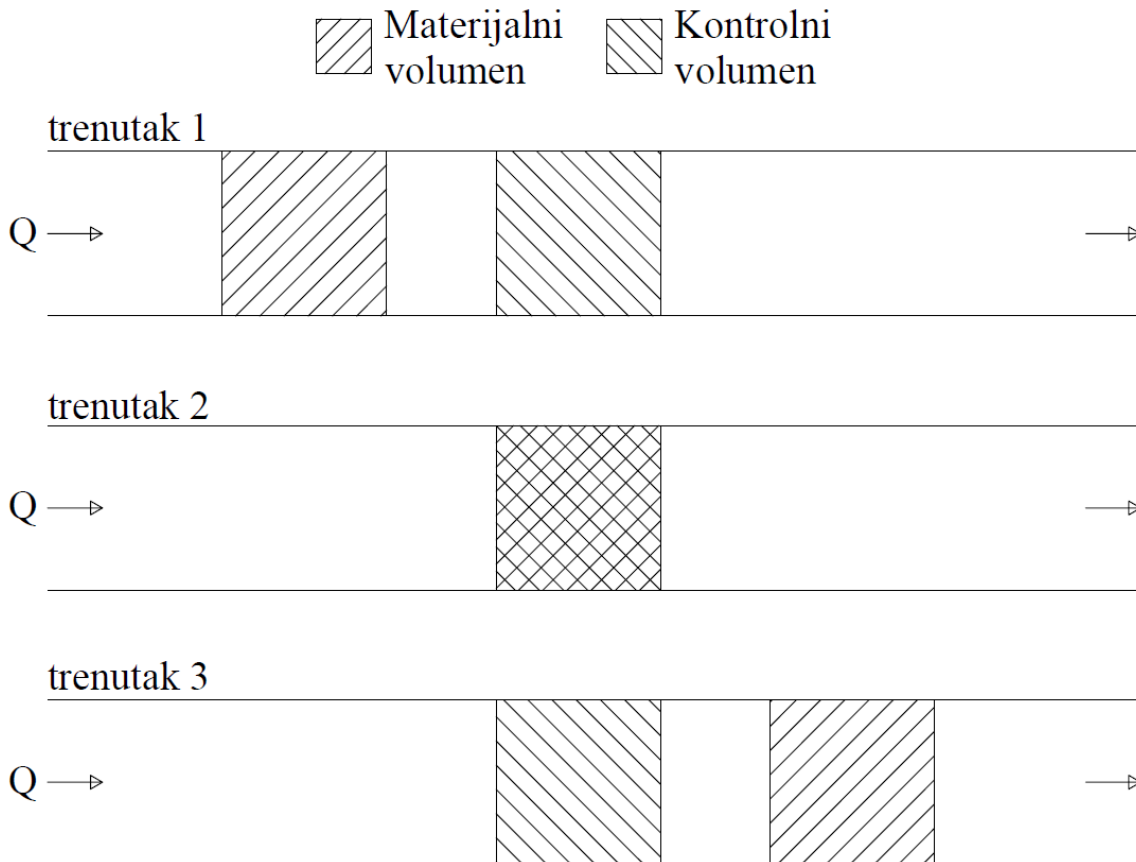
Slika 5.1. Vizualizacija polja strujanja [13]

### 5.1. Zakon očuvanja i ravnoteže u dinamici fluida

Zakoni očuvanja i ravnoteže predstavljaju temeljne principe koji opisuju očuvanje fundamentalnih principa kod fluida. Ovi zakoni omogućavaju razumijevanje i analizu raznih procesa i fenomena koji se pojavljuju u dinamici fluida, ali i drugim granama fizike.

Radi shvaćanja zakona očuvanja u dinamici fluida potrebno je poznavati fizikalna svojstva fluida. Fluidi kao što su voda, zrak, ulje i dr. imaju vlastita svojstva zbog kojih ih je moguće razlikovati od čvrstih tvari. Fluid je materija koja se deformira pri beskonačno malenom tangencijalnom naprezanju. Jedno od glavnih svojstva fluida je gustoća. Gustoća se može opisati kao masa fluida po jedinici volumena te ima vrlo velik utjecaj na ponašanje fluida kao što su njegova sposobnost prijenosa energije i mase. Također vrlo bitno svojstvo je i viskoznost koja predstavlja unutarnje trenje fluida, odnosno mogućnost fluida da se odupire smičnom naprezanju. Kako je viskoznost usko povezana s trenjem fluida, ono je svojstvo koje je odgovorno za gubitke koji nastaju pri strujanju. Fizikalna svojstva su izuzetno važna u dinamici fluida jer su usko povezana s zakonima očuvanja. Razumijevanje fizikalnih svojstva i zakona očuvanja i ravnoteže je ključno jer se problematika proteže sve do najmanjih čestica.

Kako bi se opisao zakon očuvanja mase, prvo je potrebno opisati što je kontrolni, a što materijalni volumen. Kontrolni volumen može se objasniti kao proizvoljan volumen koji je ograničen nekom kontrolnom površinom u kojem se promatra strujanje fluida. Kroz kontrolni volumen u vremenu prolaze različiti materijalni volumeni, stoga postoji pretpostavka da materijalni volumen i kontrolni volumen u jednom trenutku koincidiraju. Ova teorija prikazana je na slici 5.2. Kontrolna površina zauzima dio promatranog prostora i u proizvoljno odabranom koordinatnom sustavu može biti statična, gibati se, kontrahirati ili ekspanzirati kako god promatrač želi.



Slika 5.2. Materijalni i kontrolni volumen

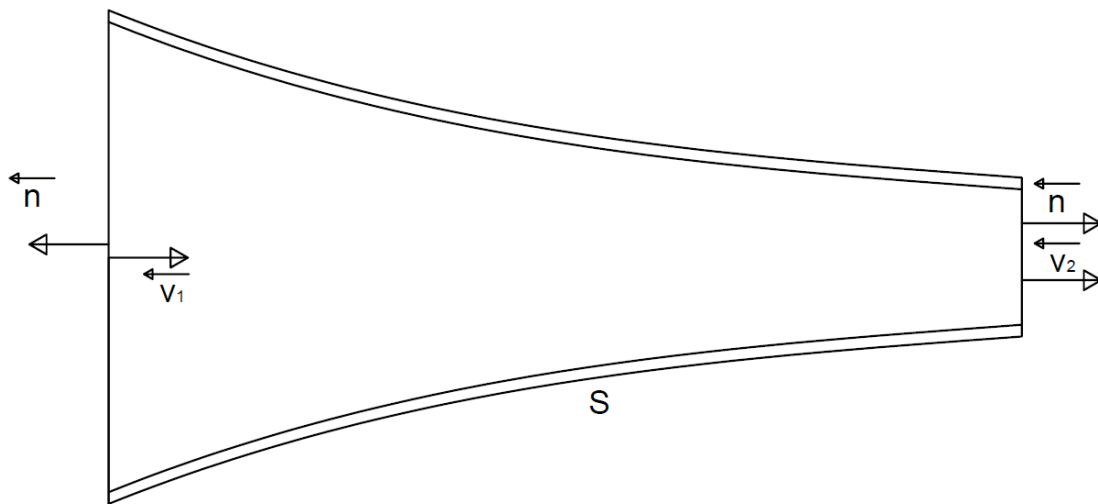
Kako bi se mogao opisati zakon očuvanja gibanja potrebno je napraviti transformaciju materijalnog volumena u promatrani kontrolni volumen. Ova transformacija izvršiti će se pomoću Reynoldsovog transportnog teorema. Reynoldsov transportni teorem omogućava transformaciju temeljnih zakona za materijalni volumen na kontrolni volumen. Kako bi se transformacija mogla izvesti, mora vrijediti pretpostavka da materijalni i kontrolni volumen u određenom vremenskom trenutku koincidiraju kako je prikazano na slici 5.1. u drugom trenutku. Nakon trenutka poklapanja volumena, materijalni volumen će odstrujiti dok će kontrolni volumen mirovati ili se gibati, ovisno o odluci promatrača. Matematički zapis slučaja koincidencije opisan je jednadžbom (5.1) gdje  $\varphi$  predstavlja općenitu veličinu.

$$\frac{D}{Dt} \int_{MV} \varphi dV = \int_{KV} \frac{\partial \varphi}{\partial t} dV + \int_{GKV} \varphi \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} dS. \quad (5.1)$$

Sada je moguće primijeniti Reynoldsov transportni teorem za materijalni volumen. Veličina  $\varphi$  zamjenjuje se gustoćom  $\rho$  te se dolazi do formulacije zakona očuvanja mase za kontrolni volumen opisano jednačbom 5.2.

$$\int_{\text{KV}} \frac{\partial \varphi}{\partial t} dV + \int_{\text{GKV}} \varphi \vec{v} = 0. \quad (5.2)$$

Osnovna teza zakona očuvanja mase govori kako sva masa koja uđe tijekom vremena u kontrolni volumen poveća se neto unosom mase u taj volumen ili se smanjuje neto izlazom mase iz njega. Ova definicija pomnije se može prikazati slikom 5.3.



Slika 5.3. Promatrani kontrolni volumen

S obzirom da treba svesti plošni integral na volumni, koristi se teorem o divergenciji na drugi član jednačbe (5.2) te se dobije izraz (5.3):

$$\int_{\text{KV}} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} dV + \text{div}(\rho \vec{v}) \right) dV = 0 \quad (5.3)$$

te kako se u izrazu (5.3) radi o proizvoljnom volumenu integracije, izraz se izjednačava s nulom pa se dobi izraz (5.4):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0. \quad (5.4)$$

Izraz (5.4) opisuje zakon očuvanja mase, ali u diferencijalnom obliku. Za slučaj nestlačivog fluida i stacionarnog strujanja, izraz se pojednostavljuje kako je prikazano jednačbom (5.5)

$$\operatorname{div}(\vec{v}) = 0. \quad (5.5)$$

U slučaju kada se promatra problem nestlačivog fluida te stacionarnog strujanje, moguće je prvi član u izrazu (5.2) izjednačiti s nulom te se izraz zapisuje kao (5.6):

$$\int_{\text{GKV}} \rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{n} dS. \quad (5.6)$$

Kako je već prije rečeno, u slučaju strujanja fluida kroz cijev, neto ulaz mase u kontrolni volumen mora biti jednak izlazu neto mase iz kontrolnog volumena te se ovo može opisati izrazom (5.7):

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 = \dot{m}. \quad (5.7)$$

U izrazu (5.7)  $\rho$  označuje gustoću,  $v$  brzinu,  $A$  površinu, a  $\dot{m}$  maseni protok u kg/s. Ako se uvede varijabla protoka  $Q$ , izraz (5.7.) može se prikazati jednadžbom (5.8):

$$\rho_1 \cdot Q_1 = \rho_2 \cdot Q_2 = \dot{m} \quad (5.8)$$

te za stacionarno strujanje fluida koji ima konstantu gustoću unutar promatranog kontrolnog volumena, vrijedi tvrdnja da je volumni protok konstantan kroz sve poprečne presjeke. Ova teorija opisana je izrazom (5.9):

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = \text{konst.} \quad (5.9)$$

### 5.1.1. Zakon ravnoteže količine gibanja

Zakon ravnoteže količine gibanja za materijalni volumen definira kako u svakom zatvorenom sustavu, ukupna količina gibanja je uvijek konstanta. Ovaj zakon se primjenjuje na sustav koji je izoliran od vanjskih sila. Prema ovom zakonu, kada unutar zatvorenog sustava djeluje sila na jedan dio sustava, na drugi dio sustava mora djelovati jednaka ili suprotna sila. Kao rezultat toga, ukupna količina gibanja sustava je zbroj količina gibanja svih dijelova te ostaje nepromijenjena tijekom vremena. Zakon ravnoteže količine gibanja prikazan je jednadžbom (5.10):

$$\frac{D}{Dt} \int_{\text{MV}} \varphi \cdot \vec{v} dV = \int_{\text{MV}} \vec{f} \cdot \rho dV + \int_{\text{MV}} \vec{\sigma} dS. \quad (5.10)$$

Ako se iz izraza (5.10) drugi član transformira u volumni integral pomoću teorema o divergenciji dobije se izraz (5.11):



$$\int_{MS} \vec{\sigma}_n dS = \int_{MV} \text{div}(T_Q) dV. \quad (5.11)$$

Zbog zakona očuvanja mase te ako se postavi oznaka totalne derivacije u prvom članu, dobiveni izraz će biti prikazan kao jednačba (5.12):

$$\int_{MV} \left( \rho \frac{D}{Dt} - \rho \cdot \vec{f} - \text{div}(T_Q) \right) dV = 0 \quad (5.12)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \cdot \vec{v} \cdot \nabla(\vec{v}) = \rho \cdot \vec{f} + \text{div}(T_Q).$$

Tenzor naprezanja  $T_Q$  za idealan fluid kod kojeg ne postoje smična naprezanja prevodi se u  $T_p$  te se dobije Eulerova jednačba gibanja (5.13):

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \rho \cdot \vec{f} - \text{grad}(p). \quad (5.13)$$

Pod pretpostavkom da se radi o stacionarnom strujanju fluida koji se nalazi u gravitacijskom polju, Eulerova jednačba u smjeru strujnice može se zapisati prema izrazu (5.14):

$$-\rho \cdot v \frac{\partial v}{\partial s} = \rho \cdot g \frac{\partial z}{\partial s} + \frac{\partial p}{\partial s} \quad (5.14)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \frac{\partial z}{\partial s} - v \frac{\partial v}{\partial s} = 0.$$

Ako se izraz (5.13) pomnoži s izrazom (5.14) te se primjene pretpostavke promjene tlaka, visine i brzine po strujnici, formulirani izraz može se prikazati kao (5.15)

$$\frac{dp}{\rho} + v dv + g dz = 0 \quad (5.15)$$

te izraz (5.15) vrijedi samo duž strujnice, a integracijom tog izraza dobije se izraz Bernoullijeve jednačbe (5.16):

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{konst.} \quad (5.16)$$

Bernoullijeva jednačba je fundamentalna jednačba koja se koristi u radu s fluidima. Bernoullijeva jednačba opisuje vezu između tlaka, gustoće, brzine i visine fluida. Ova jednačba vrijedi za strujanje idealnog te nestlačivog fluida i ne uzima u obzir gubitke energije uslijed trenja ili turbulencije.

### 5.1.2. Zakon ravnoteže energije

U dinamici fluida zakon ravnoteže energije predstavlja upotrebu prvog zakona termodinamike na fluid koji struji. Prvi se zakon termodinamike primjenjuje na sustav koji je prvo bio u stanju mirovanja te nakon određenog procesa, ponovno uspostavlja stanje mirovanja. Materijalni volumen s poznatom masom fluida može se proučavati kao dinamički sustav iako nikad nije u stanju mirovanja. Fluid koji struji može se smatrati termodinamičkim sustavom u stanju ravnoteže, pa prema prvom zakonu termodinamike vrijedi jednadžba (5.17) [14]:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_H + \dot{W} \quad (5.17)$$

te se jednadžba može opisati tako da je promjena energije nekog sustava jednaka zbroju topline i snage koja je predana sustavu.

Ukupan rad u vremenu može se zapisati kao zbroj rada uzrokovan tlačnim silama na pomičnoj granici i rad u tangencijalnih sila.

$$\dot{W} = \dot{W}_p + \dot{W}_s,$$

gdje se rad uzrokovan tlačnim silama može opisati jednadžbom (5.18):

$$\dot{W}_p = - \int_{S_t} p(\vec{v}\vec{n})dS. \quad (5.18)$$

Zakon ravnoteže energije koji se odnosi na kontrolni volumen može se zapisati kao izraz (5.19):

$$\frac{dE}{dt} = \int_{MV} \frac{\partial}{\partial t}(\rho e)dV + \int_{MV} \rho e(\vec{v}\vec{n})dS. \quad (5.19)$$

Kombinacijom prvog zakona termodinamike opisanog izrazom (5.17) i izraza (5.19) dobi se jednadžba (5.20):

$$\int_{MV} \frac{\partial}{\partial t}(\rho e)dV + \int_{GKV} \rho \left( \frac{p}{\rho} + e \right) \cdot (\vec{v}\vec{n})dS = \dot{Q}_H + \dot{W}_s. \quad (5.20)$$

Prvi član u jednadžbi (5.20) predstavlja promjenu cjelokupne energije sustava u određenom vremenu. Drugi član opisuje zbroj rada uzrokovan tlačnim silama na pomičnu granicu i protoka ukupne energije kroz tu granicu.  $e$  označava totalnu energiju po jedinici mase koja predstavlja

unutarnju energiju, odnosno energiju molekularnih sila po jedinici mase te se može izračunati prema izrazu (5.21):

$$e = u + \frac{v^2}{2} + g \cdot z \quad (5.21)$$

Kroz kontrolni volumen koji se sastoji od jednog ulaza i jednog izlaza, jednadžbu (5.20) može se pojednostaviti uz pomoć izraza (5.21) Pojednostavljen zakon ravnoteže energije primijenjen na kontrolni volumen opisan je jednadžbom (5.22):

$$\dot{m} \cdot \left[ u_2 - u_1 + \frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g \cdot (z_2 - z_1) \right] = \dot{Q}_H + \dot{W}. \quad (5.22)$$

Ako se jednadžba (5.22) podijeli s masenim protokom, formulira se izraz (5.23):

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + h_g - h_s \quad (5.23)$$

te ovaj izraz predstavlja jednadžbu mehaničke energije. Također kako postoji velika sličnost s Bernoullijevom jednadžbom, često se naziva i proširena Bernoullijeva jednadžba. Veličina  $h_s$  predstavlja gubitke visine hidrauličkog stroja ili crpke dok  $h_g$  predstavlja sve ostale gubitke.

### 5.1.3. Jednadžba momenta

Jednadžba momenta implicira da promjena momenta fluida unutar kontrolnog volumena mora težiti ravnoteži između tlakova, viskozni sila te drugih vanjskih i gravitacijskih sila koje djeluju na fluid. Jednadžbe momenta su dio Navier-Stokesovih jednadžba koje opisuju očuvanje momenta u fluidu te s opisuju pomoću izraza (5.24):

$$\rho \left( \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \right) \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \cdot \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (5.24)$$

Gdje:

- $t$  predstavlja vrijeme
- $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$  predstavlja vektor brzine u smjerovima osi
- $\mathbf{F}$  predstavlja bilo koje dodatne sile kojima je fluid opterećen
- $\nabla$  predstavlja matematički operator gradijenta dok
- $\nabla^2$  predstavlja Laplaceov operator brzine fluida

## 5.2. Navier-Stokesove jednadžbe

Navier-Stokesove jednadžbe skup su parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koje opisuju gibanje fluida. Ove jednadžbe čine temeljne jednadžbe dinamike fluida. Navier-Stokesove jednadžbe mogu se izraziti pomoću zakona o očuvanju mase koji je definiran jednadžbom 5.4. i Zakonom ravnoteže količine gibanja koji je opisan jednadžbom 5.24. Kao i za bilo koji kontinuirani medij, očuvanje momenta iz jednadžbe 5.24. može se zapisati putem Cauchyjevog tenzora naprezanja prema izrazu (5.25):

$$\rho \cdot \mathbf{a} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_i, \quad i = 1,2,3. \quad (5.25)$$

U jednadžbi (5.25)  $\mathbf{a}$  predstavlja vektor akceleracije u smjerovima osi,  $F$  predstavlja sile koje djeluju na fluid, a  $\sigma$  predstavlja Cauchyjev tenzor naprezanja na mjestu  $x$  u vremenu  $t$ . Vektor ubrzanja čestice  $\mathbf{a}$  na mjestu  $x$  u vremenu  $t$ , kinematičkim argumentima može se zapisati prema izrazu (5.26):

$$\mathbf{a} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{v} \quad (5.26)$$

ili prema izrazu (5.27):

$$\mathbf{a}_i = \frac{\partial v_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + F_i, \quad i = 1,2,3. \quad (5.27)$$

Umetanjem jednog od ova dva izraza u lijevu stranu jednadžbe (5.25) dobiva se član  $\rho \cdot (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}$ . Ovaj član je jedini ne linearan član u Navier-Stokesovim jednadžbama te se naziva inercijskim članom. Navier-Stokesove jednadžbe su među rijetkim jednadžbama matematike i fizike u kojima nelinearnost ne proizlazi iz fizičkih pretpostavki, već samo iz matematičkih, odnosno kinematičkih argumenata. Na primjer u slučaju Newtonovog fluida tenzor naprezanja može se zapisati preko tenzora vektora brzine i tlaka prema izrazu (5.28):

$$\sigma_{i,j} = \mu \cdot \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + (\varphi \cdot \text{div}(\mathbf{u}) - \mathbf{p}) \cdot \delta_{i,j}, \quad (5.28)$$

gdje  $\delta$  predstavlja Kroneckerov simbol, a  $\varphi$  predstavlja koeficijent dilatacije viskoznosti. Za slučaj kada vrijedi  $\varphi > 0$  i  $\mu > 0$  jednadžba očuvanja momenta u može se zapisati prema izrazu (5.29):

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = \mu \Delta \mathbf{v} + (\mu + \varphi) \nabla \operatorname{div}(\mathbf{v}) - \nabla p + \mathbf{F}. \quad (5.29)$$

Jednadžbe (5.26), (5.27) i (5.28) su opće Navier-Stokesove jednadžbe za Newtonovski kompresibilni ili stlačivi fluid. U Eulerovoj reprezentaciji, obično se smatra da su zrak i voda Newtonovski fluidi i njihovo kretanje se modelira ovim jednadžbama [15]. U slučaju kada je brzina znatno manja od brzine zvuka u fluidu, on se smatra nestlačivim. Nestlačivost se opisuje izrazom (5.30):

$$\operatorname{div}(\mathbf{v}) = 0. \quad (5.30)$$

U slučaju kada se radi o nestlačivom fluidu konstante viskoznosti, Navier-Stokesova jednadžba može se opisati izrazom (5.31):

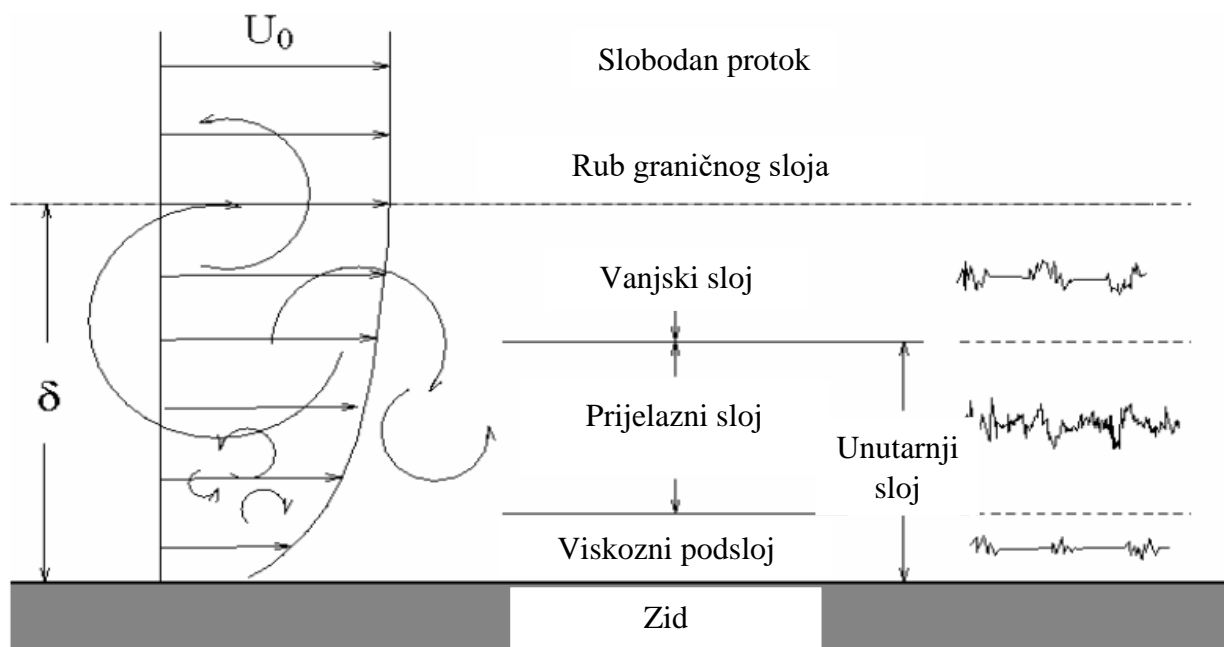
$$\rho \cdot \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \mu \Delta \mathbf{v} - \operatorname{grad}(p) + \rho \cdot \mathbf{F}, \quad (5.31)$$

gdje član na lijevoj strani predstavlja silu inercije, prvi i drugi članovi s desne strane opisuju kontaktne smične i normalne sile dok zadnji član s desne strane predstavlja masenu silu.

### 5.3. Numeričke mreže

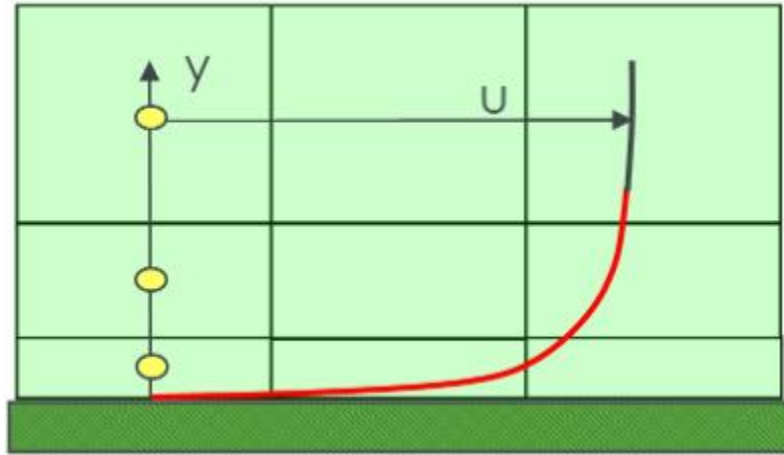
Numeričke mreže predstavljaju temelj u suvremenom pristupu rješavanja složenih inženjerskih, znanstvenih te matematičkih problema. Numeričkim mrežama se problematika svodi na diskretne oblike te se na taj način omogućuje rješavanje pomoću računalnih algoritama. Numeričke mreže su ključne za simulaciju raznih fizičkih procesa, a pogotovo kod strujanja fluida. Jedan od najbitnijih dijelova mreže je onaj koji se nalazi uz rubove domene, a naziva se granični sloj.

Granični sloj odnosi se na područje fluida u blizini zida gdje su viskozne sile značajne. Prilikom razlučivanja graničnog sloja u blizini zida pruža se točan prikaz profila, što dovodi do preciznih predikcija smičnog naprezanja, tlaka na površini te učinka nepovoljnih gradijenta tlaka i sila. Granični sloj može se podijeliti na viskozni sloj, prijelazni sloj i vanjski sloj. Viskozni podsloj koji je najbliži zidu opterećen je viskoznom silama, gdje su gradijenti brzine značajni. Prijelazni sloj je prijelazno područje između viskoznog i vanjskog sloja, gdje se svojstva počinju približavati svojstvima vanjskog sloja. Vanjski sloj je najudaljeniji sloj od zida i predstavlja područje u kojem su svojstva protoka relativno konstantna te je minimalan utjecaj zida. Slika 5.4. prikazuje razliku između opisanih slojeva.



Slika 5.4. Podjela graničnih slojeva [16]

Visina prvog sloja definirana je kako bi se održala vrijednost bezdimenzijske značajke  $Y^+ > 30$  te su korištene zidne funkcije. Skalabilne zidne funkcije su vrsta modeliranja koja se koristi za simuliranje ponašanja graničnog sloja blizu zida, bez eksplicitnog razlučivanja cijelog sloja granice. U ovakvim simulacijama, razlučivanje cijelog sloja granice s finom mrežom može biti izuzetno zahtjevno i dugotrajno. Skalabilne funkcije omogućuju alternativu aproksimiranjem karakteristika protoka blizu zida pomoću pojednostavljenih modela. Primjer graničnog sloja na kojem je korištena skalabilna funkcija za vrijednosti  $Y^+ > 30$  prikazan je na slici 5.5.



Slika 5.5. Skalabilna zidna funkcija [16]

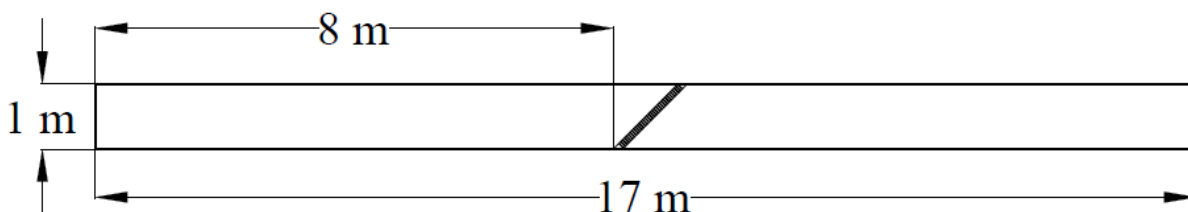
## 6. IZRADA NUMERICKE SIMULACIJE

Kako bi se uspješno izradila numerička simulacija, potrebno je kreirati model i domenu gdje će se promatrati problem. Nakon izrade domene, izrađuje se numerička mreža koja je ključna u provođenju numeričkih simulacija.

### 6.1. Izrada domene

U sklopu ovog rada cilj je kreirati zaštitnu rešetku prema eksperimentalnim ispitivanjima provedenih u radu *An experimental investigation on louvres and angled bar racks*. Kako bi se geometrija rešetke pripremila za optimizacijski proces, geometrija će biti izrađena korištenjem programskog jezika Python. U programskom jeziku Python koristi se knjižnica otvorenog koda FreeCAD koja služi za modeliranje. Ovim načinom napravljena je skripta koja samostalno modelira domenu i zaštitnu rešetku te kasnije provodi simulaciju.

Numerička simulacija napravljena je na domeni duljine 17 m, od čega je 8 m ispred rešetke, a 9 m iza rešetke. Ukupna širina domene, odnosno zamišljenog korita rijeke, postavljena je na 1 m. Radi pojednostavljenja te boljeg korištenja resursa, ovaj problem je sveden na dvodimenzionalnu problematiku. Na slici 6.1. prikazane su opisane dimenzije domene.

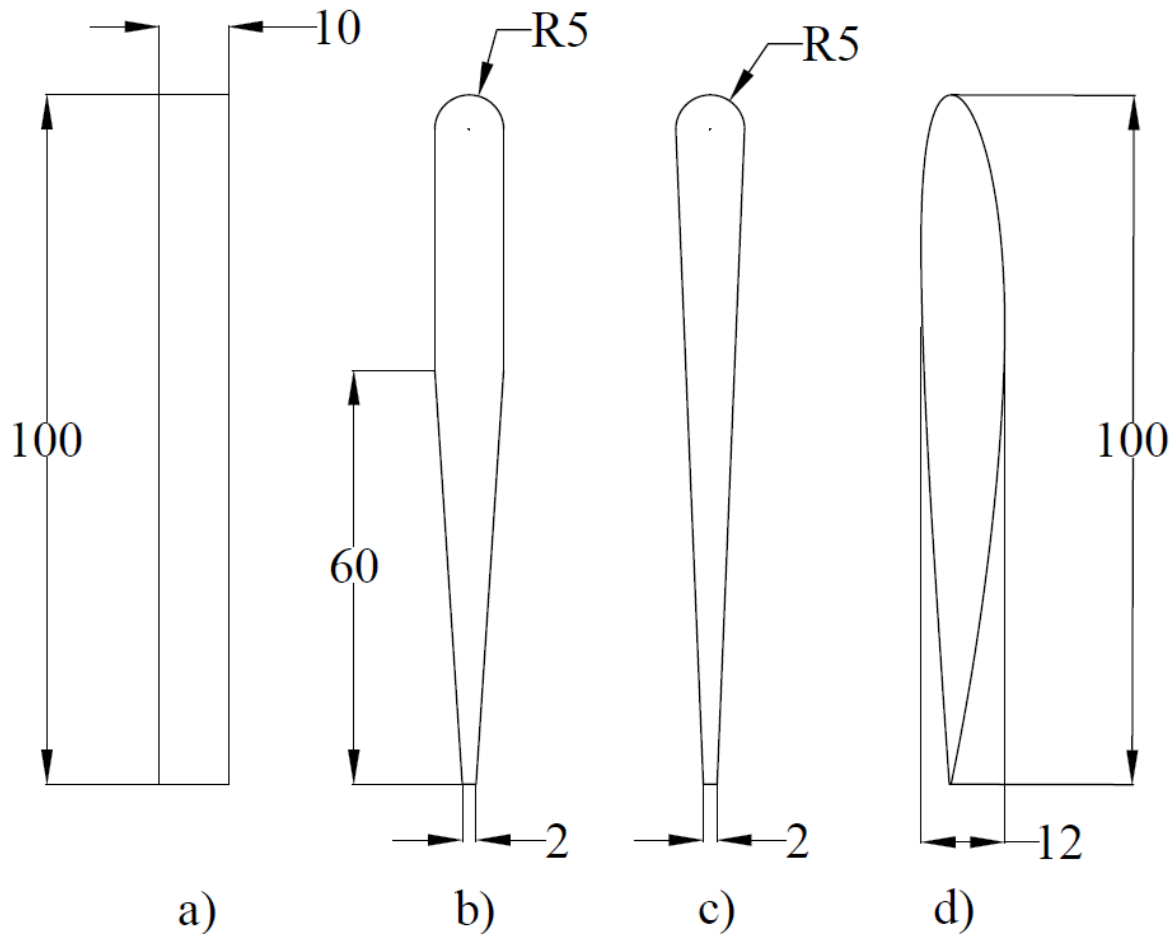


Slika 6.1. Domena

Razmatrat će se četiri različita geometrijska oblika poprečnog presjeka lamela u rešetki (slika 6.2.). Prvi poprečni presjek je pravokutnog oblika (slika 6.2.a). Drugi poprečni presjek je na prednjem dijelu zaobljen, a donja polovica ima skošenje (slika 6.2.b). Treći poprečni presjek sadrži zaobljeni prednji dio te skošenje koje počinje odmah nakon zaobljenja te se definira kao oblik igle (slika 6.2.c) i zadnji profil je oblika odabranog NACA profila (slika 6.2.d). Važno je za napomenuti kako



se izbjegavaju oštri rubovi, odnosno rubovi s ravnim segmentima manjim od 2 mm zbog konstrukcijskih razloga. Svi promatrani profili osim NACA profila imaju dužinu od 100 mm i širinu 10 mm, dok NACA profil ima širinu od 12 mm. Odabrana NACA je 2412 te je skalirana na vrijednost kako bi imala istu dužinu kao i ostali profili. Česta uporaba klasičnih pravokutnih profila je ekonomičnost, odnosno jednostavna i jeftina izrada ovakvih vrsta rešetka. U ovom radu napravljena su tri jednostavnija oblika poprečnih presjeka te NACA profil koji zahtjeva znatno veće troškove izrade. Kako bi se utvrdilo koji poprečni presjek ostvaruje najmanje hidrauličke gubitke, potrebno je izraditi numerički model na temelju kojega će se validirati rezultati.



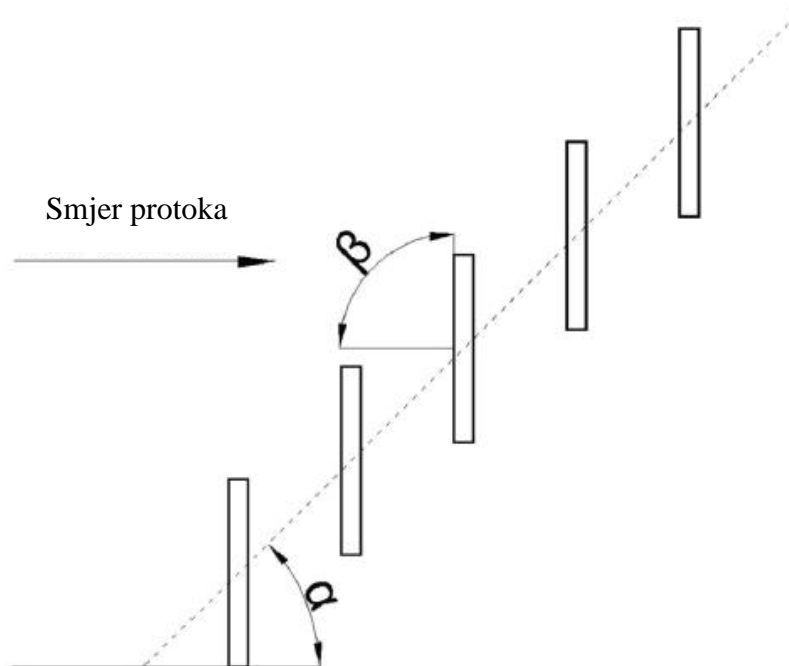
Slika 6.2. Ispitivani poprečni presjeci rešetke: a) pravokutni profil b) proizvoljan profil c) oblik igle d) NACA profil

Za svaki od četiri poprečna presjeka, promatrat će se zaštitna rešetka s kutovima nagiba  $\alpha$  od  $90^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $30^\circ$ . Kut koji lamele zatvaraju s vlastitom simetralom  $\beta$  biti će izračunat prema izrazu 6.1. Stoga, kombinacija kutova za svaki poprečni presjek prikazana je u tablici 6.1. dok je odnos međusobnih kutova  $\alpha$  i  $\beta$  prikazan na slici 6.3.

$$\beta = 90^\circ - \alpha . \quad (5.1)$$

Tablica 6.1. Odnos kutova  $\alpha$  i  $\beta$  za promatrane slučajeve

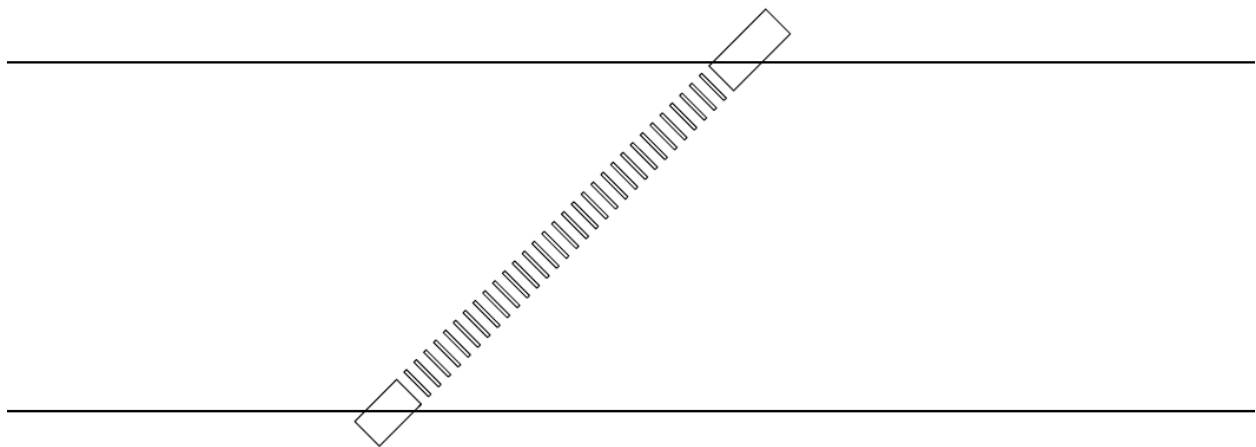
$\alpha$	$90^\circ$	$75^\circ$	$60^\circ$	$45^\circ$	$30^\circ$
$\beta$	$0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$



Slika 6.3. Odnos kutova  $\alpha$  i  $\beta$  [17]

Primjer rešetke za slučaj kada je  $\alpha = \beta = 45^\circ$  nalazi se na slici 6.4. Ova rešetka sastoji se od 31 lamele pravokutnog poprečnog između kojih je razmak 30 mm. Kako bi se izbjegli problemi s umrežavanjem u slučaju malenih udaljenosti između rešetke i rubova kanala, korištena su određena pojednostavljena prilikom kreiranja domene. Na kraju i na početku rešetke postavljene su

proširene lamele koje u potpunosti onemogućavaju prolazak fluida (slika 6.4.). Navedeno je napravljeno kako bi se izbjegli mogući problemi sa stabilnosti numeričke simulacije. Malene udaljenosti između rubova kanala i prve i zadnje lamele rešetke mogle bi prouzročiti velike probleme već kod samog umrežavanja. Kroz iterativni proces zaključeno je kako su rezultati pouzdaniji s odsječenom domenom jer se pojavljuju nerealna vrtloženja u lamelama koji su višak, odnosno lamelama koje sječu domenu [18]. Broj lamela određen je proračunom koji ovisi o kutovima  $\alpha$  i  $\beta$  te u slučaju prikazanom na slici 6.4. rešetka se sastoji od 31 lamele koje su jednako razmaknute te se nalaze udaljene od ruba domene za više od 30 mm.



Slika 6.4. Primjer zaštitne rešetke za pravokutni profil i  $\alpha = \beta = 45^\circ$

## 6.2. Izrada numeričke mreže

Simulacije su provedene u programskom alatu OpenFOAM. OpenFOAM je softverski paket otvorenog koda koji se često koristi u računarskoj dinamici fluida. Pruža sveobuhvatan skup alata koji se koristi u simulacijama i analizi strujanja fluida, prijenosa topline ili nekih drugih srodnih fenomena. OpenFOAM za numeričko rješavanje koristi metodu konačnih elementa koje se pojavljuju u dinamici fluida, poput Navier-Stokesovih jednačbi. Kako bi se model umrežio, korišteni su softverski alati koji dolaze instalirani s OpenFOAM 9 programskim alatom.

Mreža je napravljena pomoću softvera otvorenog koda CFMesh. CFMesh se koristi za generiranje visokokvalitetnih, strukturiranih i nestrukturiranih mreža u računalnoj dinamici fluida. CFMesh ima mogućnosti korištenja različitih tehnika umrežavanja te koristi inovativni algoritam za umrežavanje koji kombinira prednosti nekoliko metoda umrežavanja kako bi generirao visokokvalitetne mreže. Softver također nudi napredne značajke poput paralelnog generiranja mreže, adaptivnog podešavanja mreže te podršku za kompleksne geometrije. Generiranje visokokvalitetnih mreža CFMesh-om ima cilj poboljšanja pouzdanosti i točnosti računarskih simulacija. Dobro strukturirana mreža može poboljšati konvergenciju numeričkog rješenja, smanjiti potrebne računalne resurse i postići preciznije rezultate.

U prvom koraku potrebno je postaviti veličinu elementa. Veličina elementa postavljena je na 0,03 m. Potrebno je napraviti postepena ugušćenja na domeni gdje se nalazi rešetka te iza rešetke. Ova područja su posebno važna zbog malih razmaka između lamela u rešetki te pojave vrtloženja iza rešetke. Napravljena su dva ugušćenja (Object Refinement). Ugušćenja su rađena kao kvadri s definiranim duljinama i centrima. Prvo ugušćenje centrirano je 1,75 m po osi apscisa s duljinom od 4 m te visinom od 1 m. Drugo ugušćenje postavljeno je u istom centru, ali s duljinom od 7 m i visinom od 1 m. Navedene dvije različite gustoće ugušćenja napravljene su kako bi se izbjegao naglu prijelaz u numeričkoj mreži. Slika 6.5. prikazuje napravljena oba ugušćenja na cijeloj domeni dok slika 6.6. prikazuje postavke ugušćenja.



*Slika 6.5. Dodatna ugušćenja*

```
objectRefinements
{
  boxRf0
  {
    type box;
    additionalRefinementLevels 2;
    centre (1.75 0 0);
    lengthX 4;
    lengthY 1;
    lengthZ 0.1;
  }
  boxRf1
  {
    type box;
    additionalRefinementLevels 1;
    centre (1.75 0 0);
    lengthX 7;
    lengthY 1;
    lengthZ 0.1;
  }
}
```

*Slika 6.6. Postavke objektivnog ugušćenja*

Kako bi se dodatno ugustila mreža u području zidova te lamela, potrebno je dodati lokalna ugušćenja (Local Refinement). Lokalna ugušćenja u računarskoj dinamici fluida koriste se kako bi se poboljšala učinkovitost i točnost simulacija u specifičnim područjima interesa. Svrha lokalnih ugušćenja je povećanje rezolucije mreže u određenom području gdje polje strujanja ili važni fenomeni pokazuju visoko prostorne gradijente ili zahtijevaju detaljnije modeliranje. Postavke koje će se koristiti prikazane su i objašnjene u tablici 6.2. dok su odabrane veličine za svaku od navedenih postavka prikazane na slici 6.7.

Tablica 6.2. Vrste lokalnog ugušćenja

Postavke lokalnog ugušćenja	Definicija postavka
curvatureRefinement	Ugušćenje oko kutova i krivulja
proximityRefinement	Ugušćenje s obzirom na blizinu drugih objekta
refinementThickness	Debljina ugušćenja
additionalRefinementLevels	Dodatne razine ugušćenja

```

localRefinement
{
    lamele
    {
        curvatureRefinement          1;
        proximityRefinement          1;
        refinementThickness 0.02;
        additionalRefinementLevels 3;
    }
    top
    {
        curvatureRefinement          1;
        proximityRefinement          1;
        additionalRefinementLevels 1;
    }
    bottom
    {
        curvatureRefinement          1;
        proximityRefinement          1;
        additionalRefinementLevels 1;
    }
}

```

Slika 6.7. Postavke lokalnog ugušćenja

Visina prve ćelije je izuzetno bitna kod graničnog sloja te je postavljena na vrijednost 0,02 m. Broj slojeva je postavljen na 2 dok je omjer rasta postavljen na 1,3. Sve postavke graničnog sloja prikazane su na slici 6.8.

```

boundaryLayers
{
  patchBoundaryLayers
  {
    lamele
    {
      allowDiscontinuity      1;
      maxFirstLayerThickness  0.02;
      nLayers                  2;
      thicknessRatio          1.3;
    }
    top
    {
      allowDiscontinuity      1;
      maxFirstLayerThickness  0.02;
      nLayers                  2;
      thicknessRatio          1.3;
    }
    bottom
    {
      allowDiscontinuity      1;
      maxFirstLayerThickness  0.02;
      nLayers                  2;
      thicknessRatio          1.3;
    }
  }
}

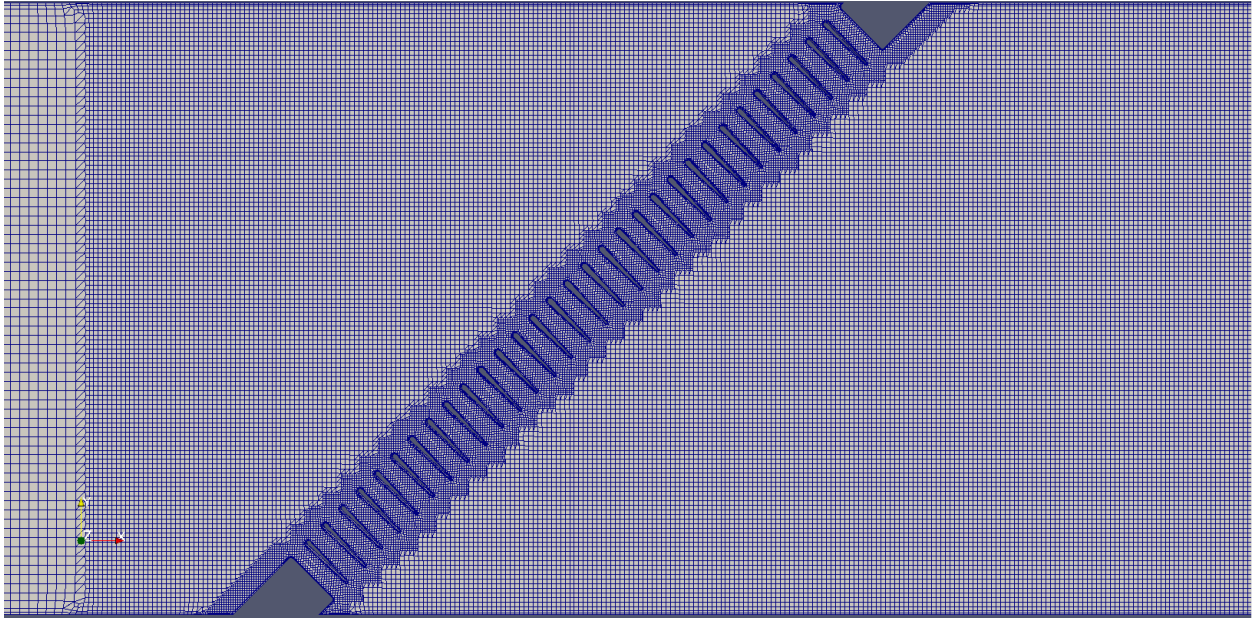
```

Slika 6.8. Postavke graničnog sloja

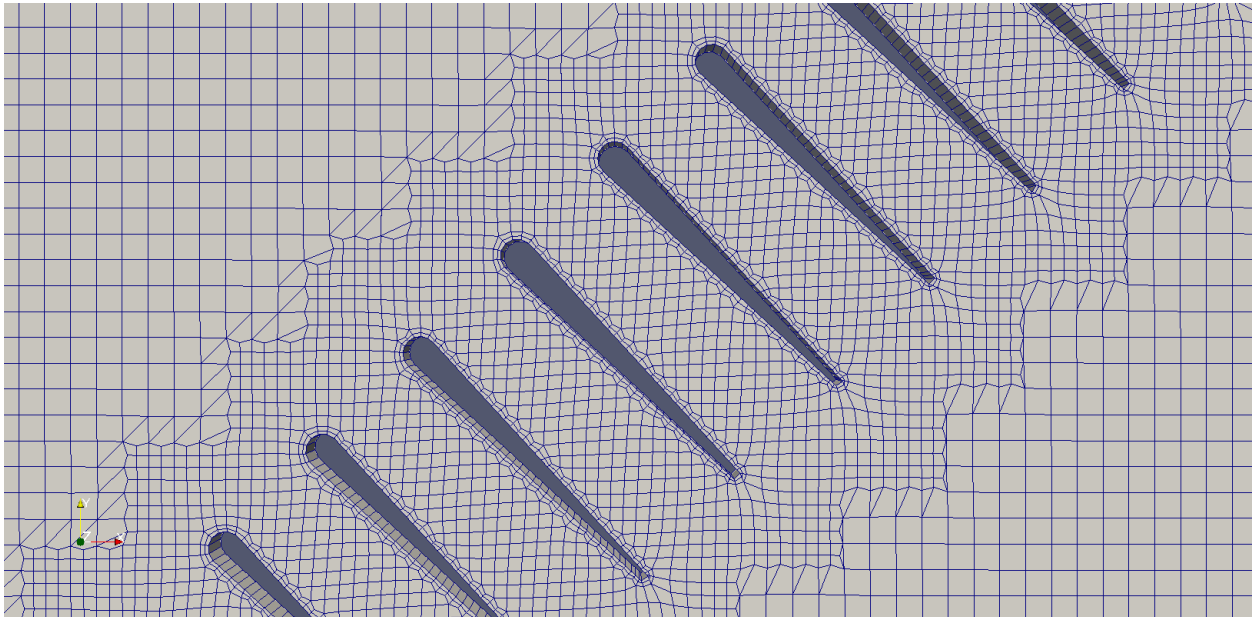
Optimizacijski postupci vremenski su vrlo dugotrajni stoga je cilj bio napraviti mrežu s što manjim brojem elemenata. Krajnja mreža varira između 90 i 120 tisuća elemenata, ovisno o poprečnom presjeku lamela i kutu nagiba cijele rešetke. Tablica 6.3. prikazuje sve ostale informacije o rubnim uvjetima. Slika 6.9. prikazuje primjer potpuno umreženog modela zaštitne rešetke dok slika 6.10. prikazuje detalj s definiranim lokalnim ugušćenjima i definiranim graničnim slojem.

Tablica 6.3. Postavke rubnih uvjeta

granica	ulaz	izlaz	zidovi domene	zidovi lamela	prednji dio domene	Stražnji dio domene
tip	ulaz brzine	tlačni izlaz	zid	zid	simetrija	simetrija
vrijednost	0,5/1/1,5	atmosferski tlak	no slip	no slip	/	/



*Slika 6.9. Potpuno umrežen model zaštitne rešetke*



*Slika 6.10. Detalj lamela u zaštitnoj rešetki*



### 6.3. Postavke simulacije

Sve simulacije su provedene u programskom softveru OpenFOAM, gdje je korišten rješavač SimpleFoam. SimpleFoam je rješavač koji se koristi za nestlačive fluide pri turbulentnom strujanju. Rješavač koristi algoritam koji rješava Navier-Stokesove jednadžbe koje su opisane izrazima (5.30) i (5.31). SimpleFoam algoritam koristi metodu "second order upwind" te su svi kriteriji konvergencije postavljeni da rješenje konvergira kada svi reziduali padnu ispod  $10^{-4}$ .

Model turbulencije za numeričke simulacije protoka fluida koji će se koristiti je  $k$ - $\mathcal{E}$ . Nakon provedenog detaljnog istraživanja turbulentnih modela na modelu zaštitne rešetke, uočeno je da  $k$ - $\mathcal{E}$  standardna turbulencija generira najpouzdanije vrijednosti pada tlaka te se pokazalo kako se ti rezultati najbolje slažu s eksperimentalnim rezultatima. Kada se iza zaštitne rešetke nalazi veća zona recirkulacije  $k$ - $\mathcal{E}$  standardni model turbulencije pokazuje stabilnost rezultata dok ostali modeli osciliraju [19]. Sve simulacije provedene su s vodom pri  $20^{\circ}\text{C}$  te su svojstva fluida prikazana u tablici 6.4.

Tablica 6.4. Svojstva fluida korištena u simulaciji

Fluid	voda
Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	20
Gustoća [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	998,2
Viskoznost [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]	0,001

#### 6.4. Usporedba hidrauličkih gubitaka

Kako bi se napravila usporedba, u realnim slučajevima promatra se pad visine  $\Delta h$ , ali zbog simplifikacije simulacije koja je dvodimenzionalna, nije moguće promatrati pad visine. Umjesto toga, promatra se pad tlaka  $\Delta p$ . Kako na rezultate ne bi utjecale lokalne nestabilnosti strujanja koje se pojavljuju u blizini rešetke, potrebno je uzeti dovoljne udaljenosti od rešetke koje će služiti za mjerenje rezultata. Odabrane udaljenosti za mjerenje padova tlaka prikazane su na slici 6.11. te iznose 4 m ispred rešetke i 8 m iza rešetke.



Slika 6.11. odabrana područja za očitavanje pada tlaka

Kako bi se napravila kasnija analiza i usporedba rezultata potrebno je izračunati hidrauličke gubitke. Pod hidrauličkim gubicima smatraju se gubici zbog tlačne visine koji se pojavljuju pri strujanju fluida zbog svladavanja sila otpora. Hidraulički gubici direktno su povezani s Bernoullijevom jednadžbom te je izraz (6.1) preinaka te jednadžbe kako bi se izračunala točna vrijednost hidrauličkih gubitka [20].

$$k = \Delta p \cdot \frac{2 \cdot g}{v_0^2} \quad (6.1)$$

U izrazu 6.1  $v_0$  je brzina koja se nalazi na ulazu,  $\Delta p$  je razlika tlakova između određenog područja ispred i iza rešetke. S obzirom kako s većim naginjanjem zaštitne rešetke dolazi do većih recirkulacijskih zona, odabrana udaljenost nalazi se 8 m iza zaštitne rešetke. Primjer velike recirkulacijske zone koja se javlja pri  $\alpha = 45^\circ$  i  $\beta = 90^\circ$  prikazana je na slici 6.12. Očekivanja su da će kod rešetka s većim nagibom  $\alpha$  dolaziti i do većih recirkulacijskih zona, a time i do većih hidrauličkih gubitaka.



Slika 6.12. Primjer recirkulacijske zone [17]

U nekim eksperimentima zabilježeno je kako dolazi do razlika hidrauličkih gubitaka čak od 15% za neke nagibe kutova  $\alpha$  i  $\beta$  [20]. Mjerenje slobodne površine također može generirati pogreške sa odstupanjem od oko 5% [18]. U eksperimentima gdje se nalaze niske razine vode, dno ima velik utjecaj na koeficijente gubitaka. Ti gubici javljaju se zbog sila koje uzrokuje trenje. Omjer dubine vode i širine kanala u eksperimentu uvijek je značajno manji od jedan, dok je u stvarnim usisima veći. Ovo čini utjecaj površine dna zanemarivim, što rezultira odstupanjima hidrauličkih gubitaka pri mjerenjima u eksperimentalnim studijima. Nagibi zaštitne rešetke koji variraju između  $90^\circ$  i  $60^\circ$  smatraju se strmim nagibima. Ovi nagibi ne uzrokuju velike razlike u hidrauličkim gubicima. Mala razlika između hidrauličkih gubitaka kod rešetka sa strmim nagibima prepisuje se manjim pojavama vrtloženja. Pojava vrtloženja značajnija je s kompleksnosti prepreke na koju fluid nailazi. Naletom fluida na prepreku dolazi do stvaranja vrtložnih struja te rotacijskih kretanja fluida. Povećanjem vrtloženja, dolazi do povećanja padova tlaka, a samim time i većim hidrauličkim gubicima.

## 6.5. Normalizirani hidraulički gubici

Koeficijentom koji služi za normalizaciju hidrauličkih gubitaka prikazuju se relativni odnosi različitih poprečnih presjeka. Kako bi se lakše uspoređivali rezultati, koeficijent hidrauličkih gubitaka je normaliziran prema izrazu (6.2):

$$k_n = \frac{k}{k_{\max}} \quad (6.2)$$

gdje  $k$  predstavlja hidrauličke gubitke za promatrani slučaj zaštitne rešetke dok  $k_{\max}$  predstavlja maksimalne hidrauličke gubitke koji se pojavljuju u svim provedenim simulacijama.

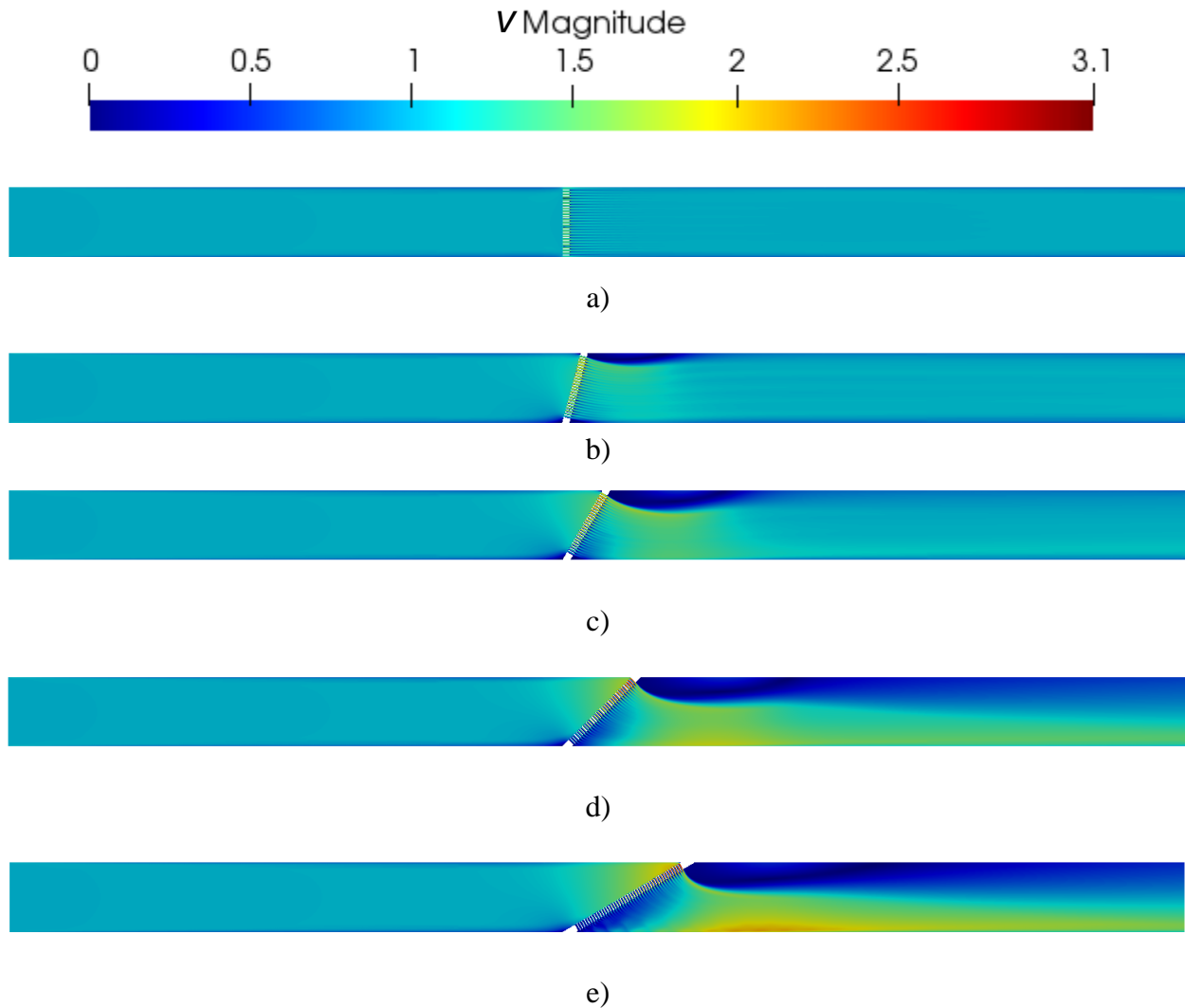
## 7. REZULTATI

Provedene su simulacije za sve kombinacije kutova opisane u tablici 6.1. Za svaki poprečni presjek lamela u zaštitnoj rešetki provedene su tri simulacije za brzine od 0,5, 1 i 1,5 m/s te je ukupno provedeno 60 simulacija.

### 7.1. Rezultati za različite nagibe rešetke

U slučaju kada kut  $\alpha$  iznosi  $90^\circ$  doći će do stvaranja manjih recirkulacijskih zona iza lamela u rešetki [21]. Slika 7.1.a) prikazuje brzine koje se pojavljuju u domeni s zaštitnom rešetkom. Maksimalna brzina koja se pojavljuje iznosi 1,5 m/s. Kako bi se poboljšala hidraulička učinkovitost, pravilan nagib rešetke igra veliku ulogu. U slučaju nagnjanja zaštitne rešetke kako bi se ribe, smeće i ostale neželjene stvari mogle odvoditi u kanal za obilaženje, očekuju se i veći padovi tlaka koji će rezultirati većim hidrauličkim gubicima. Kada kut  $\alpha$  iznosi  $75^\circ$  (Slika 7.1.b) vidljivo je kako nagnjanjem zaštitne rešetke dolazi do pojave vrtloženja s gornje strane domene. Najveće brzine pojavljuju se s gornje strane rešetke zbog nastujavanja tijekom nagnjanja zaštitne rešetke. Također su vidljiva manje recirkulacijske zone koje se pojavljuju ispred i iza dijelova domene koji su odsječeni. Iako je zaštitna rešetka s kutom  $\alpha = 60^\circ$  (Slika 7.1.c) još uvijek poprilično strma, ona može biti korištena ispred hidroelektrana koje rade s malim protocima i malim brzinama strujanja vode. Vrlo česta su eksperimentalna ispitivanja koja se provode na rešetki za  $\alpha = 45^\circ$  (Slika 7.1.d) jer ovakav nagib omogućuje učinkovito usmjeravanje protoka vode, što može pomoći u smanjenju turbulencija i stvaranju ravnomjernijeg protoka kroz hidroelektranu. U slučaju kada protok vode udara u rešetku pod kutom, dolazi do bolje raspodjele sile pri udaru, što može smanjiti eroziju tla ispod rešetke te je to posebice važno kod brzih i jakih vodotoka. Kada se radi s kutovima nagiba rešetke manjim od  $45^\circ$  razlike u rezultatima mjerenja na stvarnom eksperimentu su značajnije. Svakim stupnjem nagiba rešetke, hidraulički gubici se povećavaju, ali pri malim nagibima to je manje značajno [22]. Nagibi rešetke od  $30^\circ$  (Slika 7.1.e) manje su korišteni u stvarnim slučajevima. Jedan od razloga je veća mogućnost začepljenja te su puno veći troškovi izrade jer je potrebno mnogo više lamela u rešetki. Nagibi manji od  $30^\circ$  znaju otežat preusmjeravanje riba u zaobilazni kanal te povećavaju šansu da ribe zapnu u zaštitnoj rešetki.

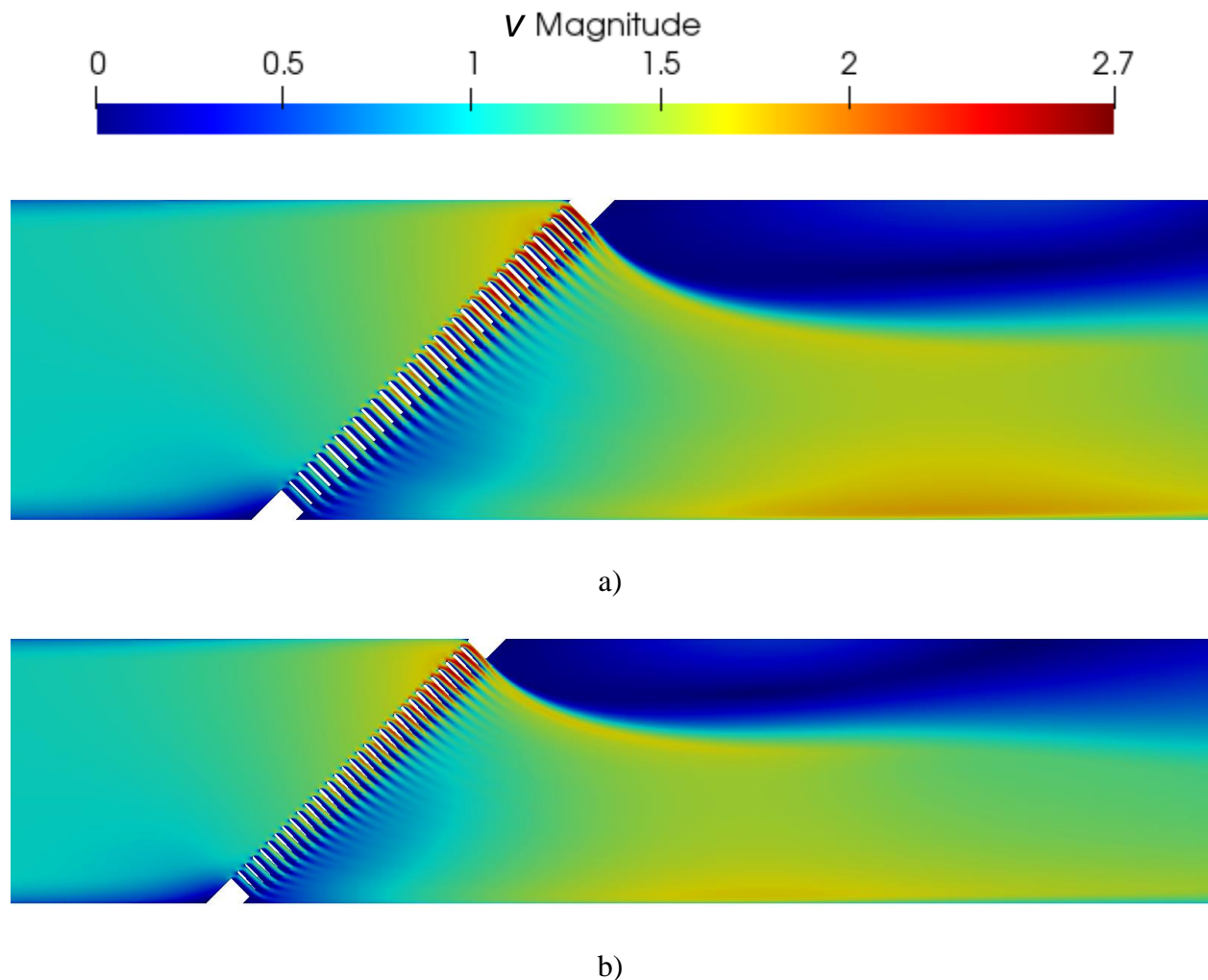
Ovakav tip rešetka češće je korišten pri velikim protocima te velikim koritima rijeka. Često se biraju nagibi rešetka između  $45^\circ$  i  $60^\circ$  kako bi se postigao balans između zahtjeva za smanjenje hidrauličkih gubitaka uz očuvanje životinjskog svijeta.

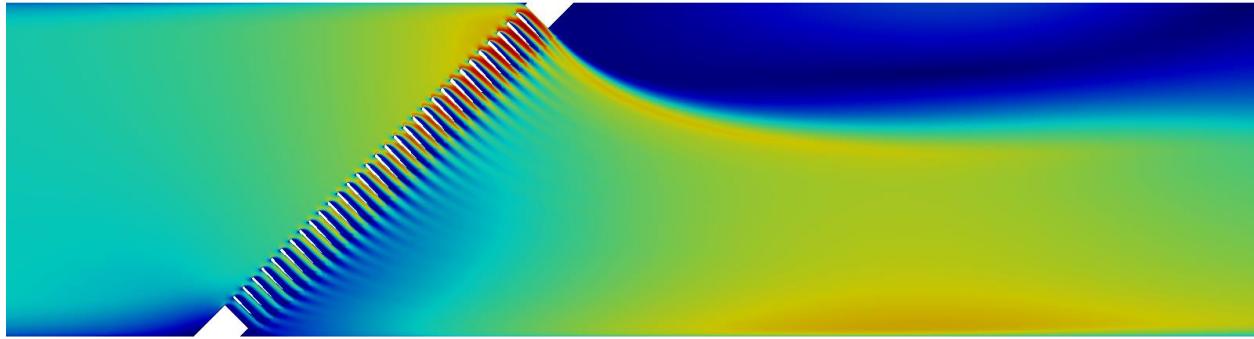


Slika 7.1. Konture brzina u domeni pri  $v = 1$  m/s: a)  $\alpha = 90^\circ$  i  $\beta = 0^\circ$  b)  $\alpha = 75^\circ$  i  $\beta = 15^\circ$  c)  $\alpha = 60^\circ$  i  $\beta = 30^\circ$   
d)  $\alpha = 45^\circ$  i  $\beta = 45^\circ$  e)  $\alpha = 30^\circ$  i  $\beta = 60^\circ$

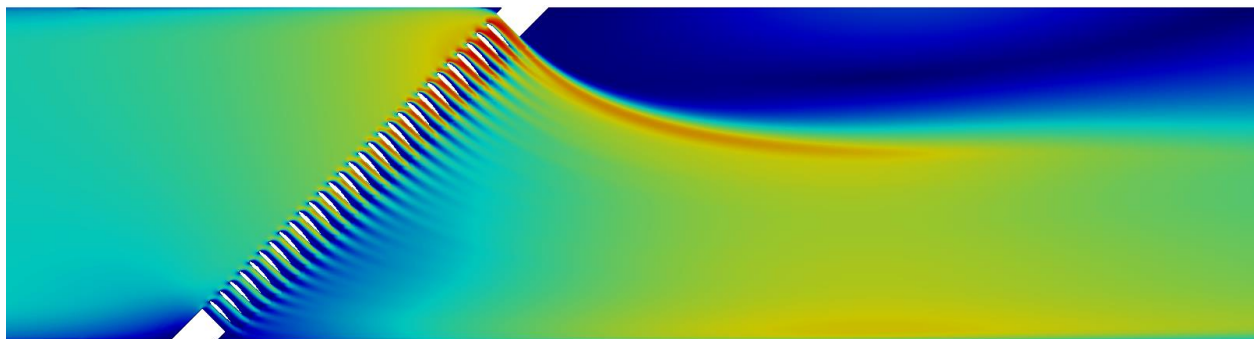
## 7.2. Rezultati za različite poprečne presjeke rešetke

Prikazane konture brzina za različite poprečne presjeke promatrane su za kut nagiba  $\alpha = 45^\circ$  te brzinu od 1 m/s. Iz slike 7.2. je vidljivo kako se osim velike vrtložne zone s gornje strane domene pojavljuju manje zone vrtloženja iza svake lamele. Najveće zone vrtloženja pojavljuju se kod rešetke načinjene od profila pravokutnog poprečnog presjeka (slika 7.2.a). Proizvoljan poprečan presjek (Slika 7.2.b) i presjek oblika igle (Slika 7.2.c) imaju vrlo slične konture brzina i maksimalne postignute brzine u domeni zbog njihove geometrijske sličnosti. Najmanje zone vrtloženja pojavljuju se kod profila načinjenih od NACA profila (slika 7.2.d).





c)



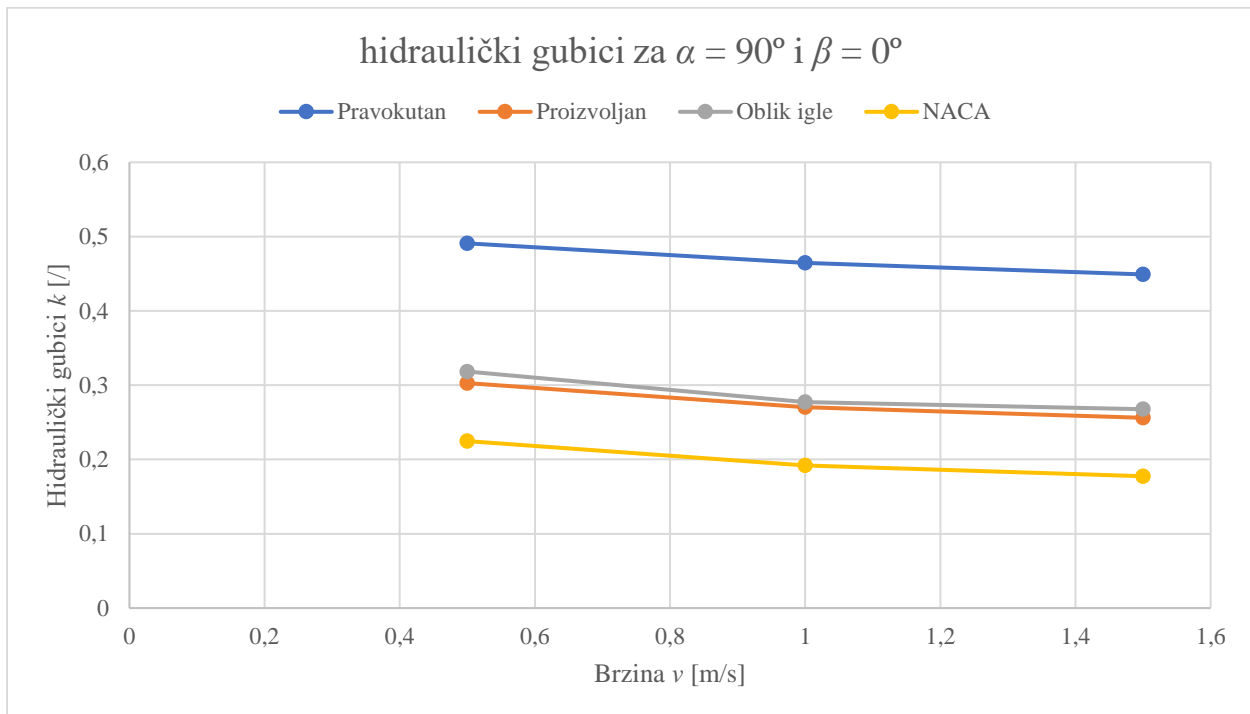
d)

Slika 7.2. Konture brzina pri  $\alpha = 45^\circ$  za: a) pravokutni poprečni presjek b) proizvoljan poprečni presjek c) poprečni presjek oblika igle d) poprečni presjek oblika NACA profila

### 7.3. Hidraulički gubici pri različitim nagibima

Provođenjem simulacija s kutovima  $\alpha = 90^\circ$  i  $\beta = 0^\circ$  dobiveni su rezultati prikazani na grafu 7.3. Rezultati pokazuju kako dolazi do najvećih padova tlaka s rešetkom koja se sastoji od lamela pravokutnog poprečnog presjeka dok za lamele koje su oblika NACA profila dolazi do najmanjih padova tlakova. Također se može zapaziti kako vrijednosti za proizvoljan profil i profil oblika igle poprimaju vrlo slične vrijednosti hidrauličkih gubitaka te se to može prepisati sličnosti profila. Vrijednosti hidrauličkih gubitaka trebale bi biti jednake kod svih protoka, odnosno brzina strujanja. Odstupanja zbog kojih dolazi mogu se prepisati nestabilnosti numeričke simulacije koja se pojavljuje radi skaliranja problema te rješavača koji se koristi. Vidljivo je kako s povećanjem brzine dolazi do većih odstupanja jer dolazi do većih vrijednosti Reynoldsovog broja, a time bi se

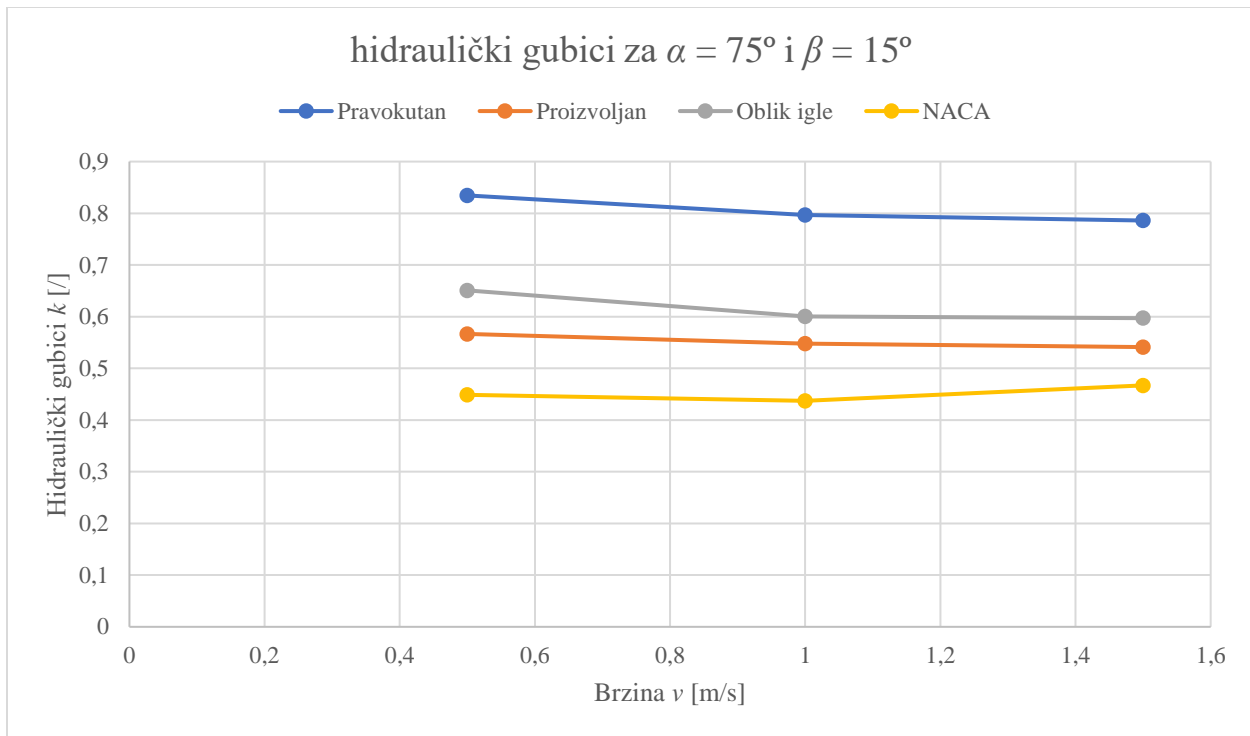
trebala i podešavati numerička mreža. U svrhu očuvanja resursa i vremena, sve simulacije provedene su s istom numeričkom mrežom.



Slika 7.3. Hidraulički gubici u ovisnosti o brzini za  $\alpha = 90^\circ$  i  $\beta = 0^\circ$

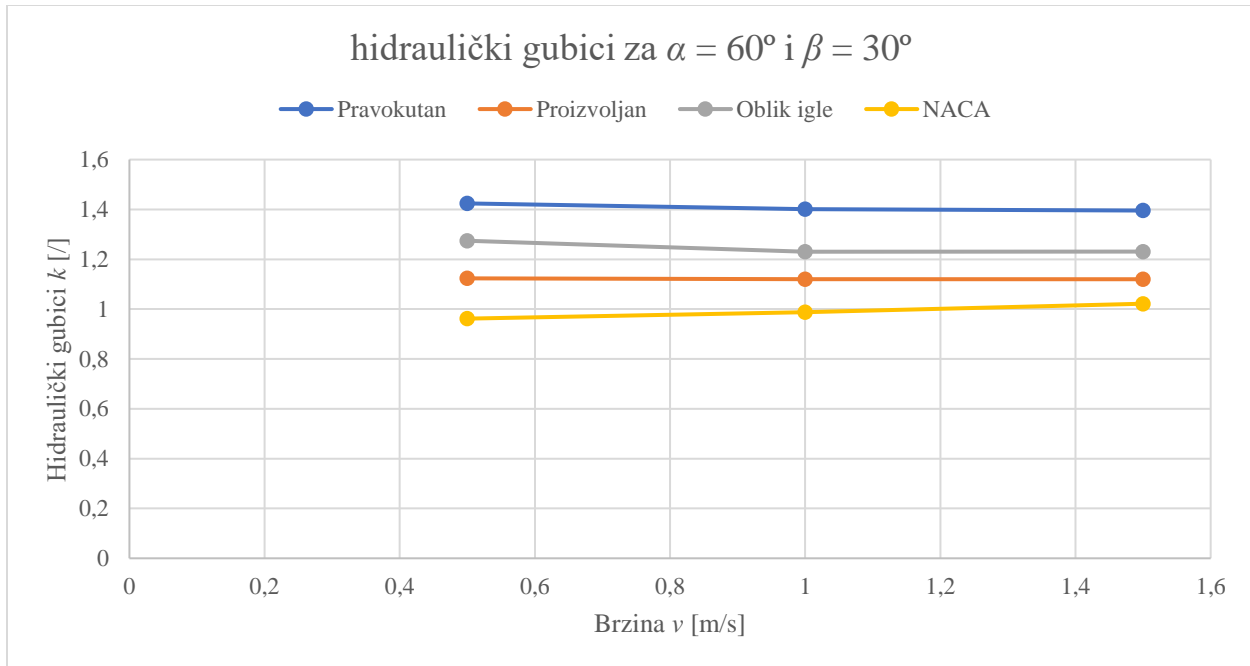
Za slučaj naginjanja rešetke za kut  $\alpha = 75^\circ$  dolazi do pojave vrtloženja na gornjoj strani domene (slika 7.2.b) što rezultira većim padom tlaka. Prema slici 7.4. rešetka načinjena od lamela pravokutnog poprečnog presjeka ostvaruje najveće hidrauličke gubitke dok rešetka načinjena od lamela NACA profila ostvaruje najmanje hidrauličke gubitke.





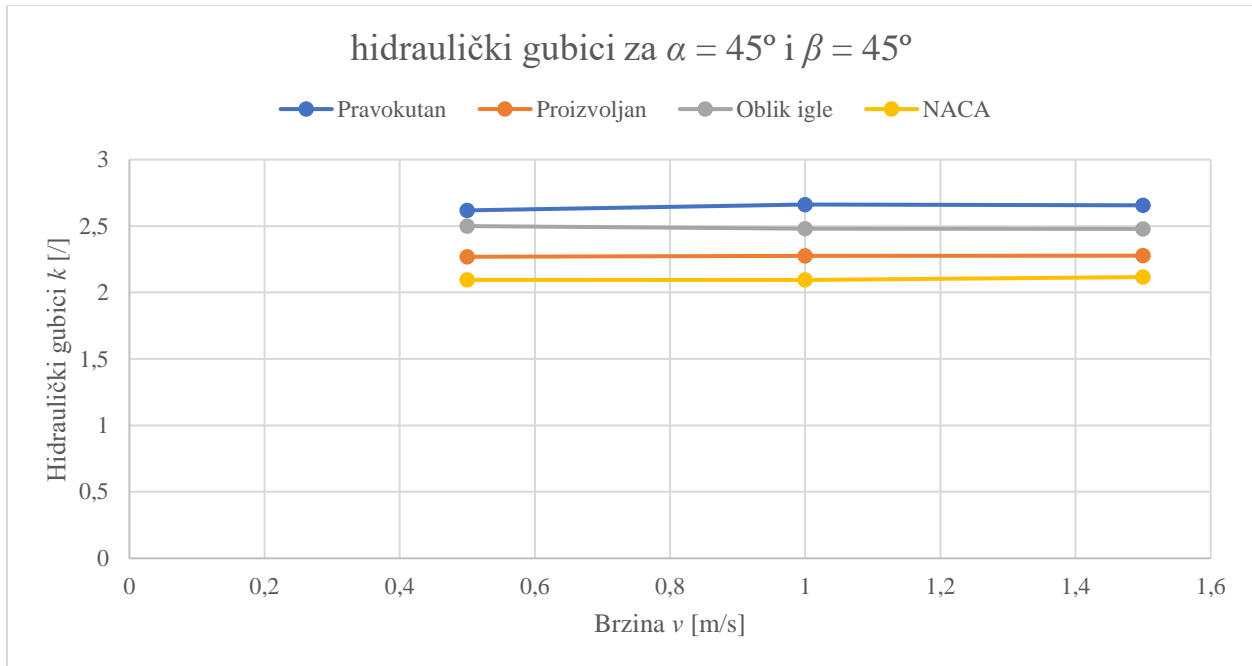
Slika 7.4. Hidraulički gubici u ovisnosti o brzini za  $\alpha = 75^\circ$  i  $\beta = 15^\circ$

Naginjanjem zaštitne rešetke dolazi do povećanja recirkulacijske zone. Najveće brzine pojavljuju se kod najviše lamele u rešetki zbog usmjerenosti strujanja nastalog naginjanjem zaštitne rešetke. Hidraulički gubici za  $\alpha = 60^\circ$  prikazani su grafikonom ovisnosti brzine i hidrauličkih gubitaka (Slika 7.5.). Vidljivo je kako su dobiveni rezultati poprilično stabilni. Rezultati pokazuju kako pravokutni oblik poprečnog presjeka lamela u rešetki ostvaruje najveće hidrauličke gubitke dok NACA profil ostvaruje najmanje.



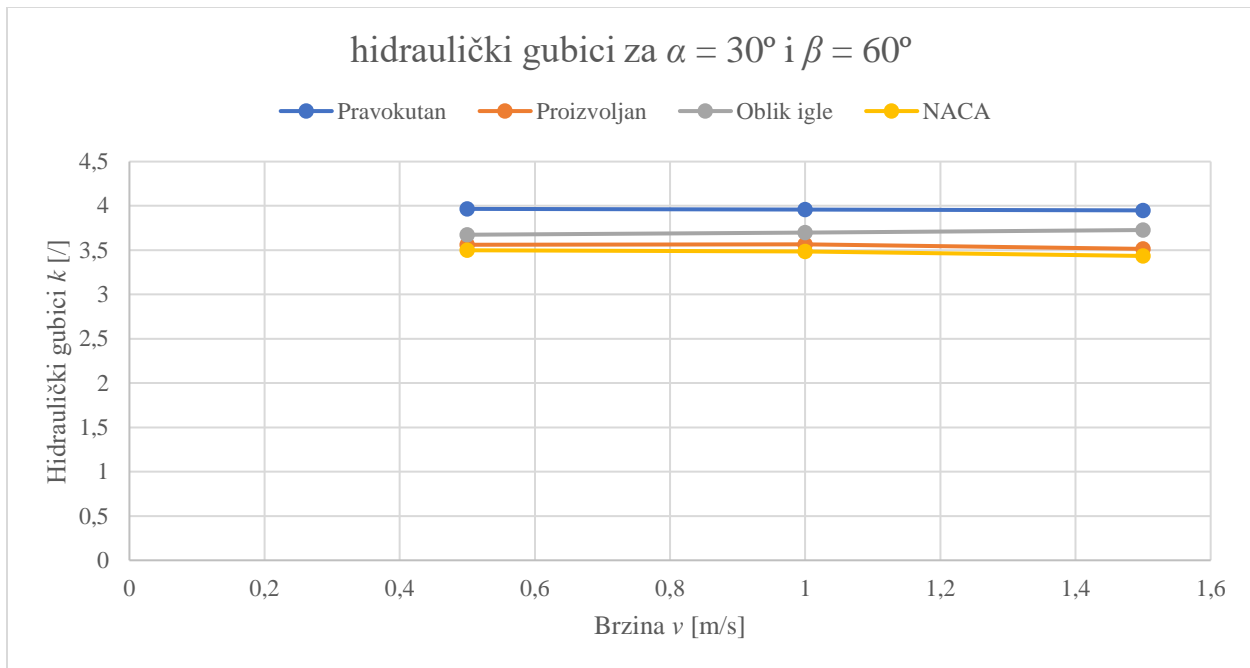
Slika 7.5. Hidraulički gubici u ovisnosti o brzini za  $\alpha = 60^\circ$  i  $\beta = 30^\circ$

Za slučaj naginjanja rešetke za kut  $\alpha = 45^\circ$  dobiveni rezultati prikazani su prema grafu na slici 7.6. jasno se vidi kako promjena brzine ne utječe na hidrauličke gubitke. Iako promjena brzine ne utječe, promjena poprečnog presjeka ima utjecaj. Vidljivo je kako su vrijednosti hidrauličkih gubitaka najveći za rešetku sastavljenu od lamela pravokutnog poprečnog presjeka iza kojih dolazi do najvećih vrtloženja te najvećeg pada tlaka. S druge strane, najmanje hidrauličke gubitke poprima rešetka načinjena od lamela oblika NACA profila, a također rešetka sastavljena od proizvoljnog poprečnog presjeka daje vrlo dobre rezultate.



Slika 7.6. Hidraulički gubici u ovisnosti o brzini za  $\alpha = 45^\circ$  i  $\beta = 45^\circ$

Naginjanjem rešetke za  $\alpha = 30^\circ$ , vidljivo je kako dolazi do vrlo velike recirkulacijske zone (Slika 7.2.e) na gornjoj strani domene dok zbog odbijanja preusmjerenog fluida prema donjoj strani domene. Ovaj fenomen vrlo je čest pri rešetkama s nagibima manjim od  $30^\circ$  te kutovima okomitim na nagnutost rešetke. Ovisnost hidrauličkih gubitaka o brzini za svaki poprečni presjek lamela u rešetki prikazana je na slici 7.7. Hidraulički gubici za nagib rešetke od  $30^\circ$  daju poprilično pouzdane rezultate s manjim odstupanjima pri brzini od 1,5 m/s. Vidljivo je kako hidraulički gubici ponovno poprimaju najveće vrijednosti za rešetku izrađenu od lamela pravokutnog oblika, a najmanje za rešetku izrađenu od lamela oblika NACA profila.



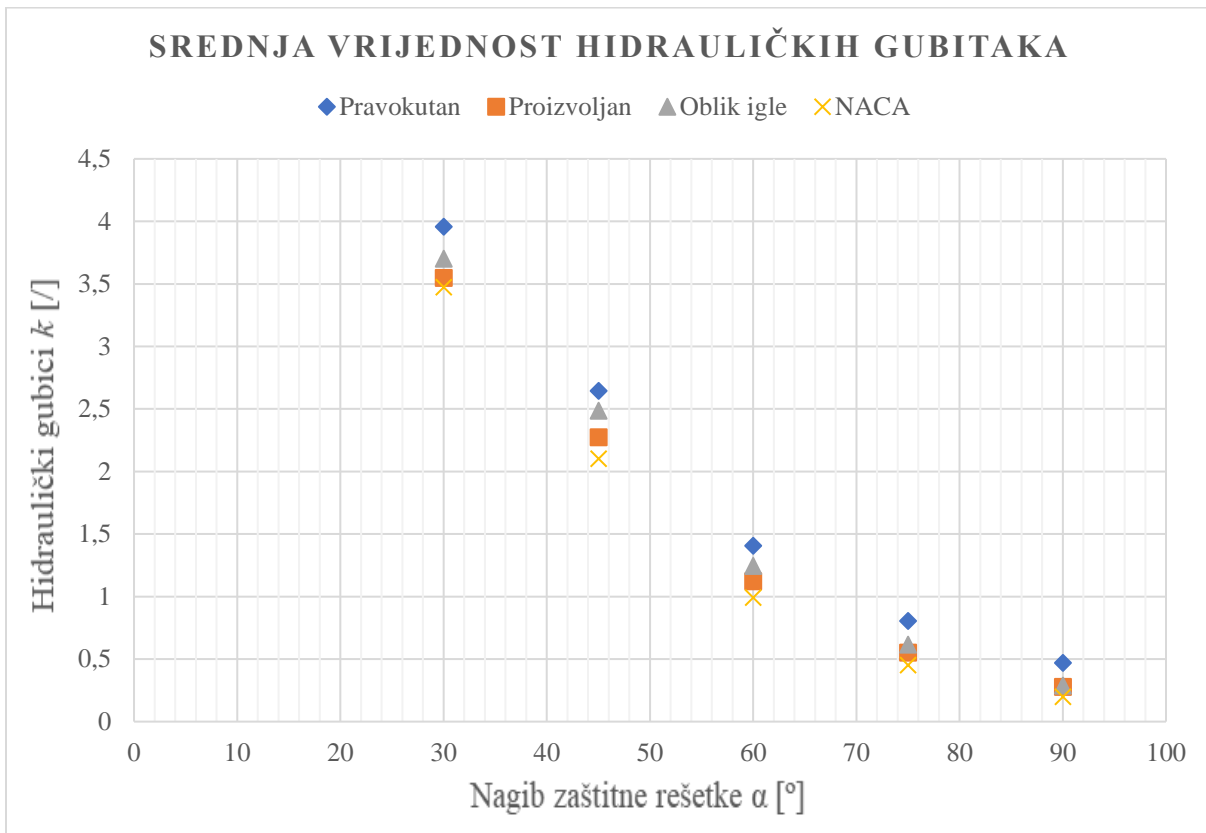
Slika 7.7. Hidraulički gubici u ovisnosti o brzini za  $\alpha = 30^\circ$  i  $\beta = 60^\circ$

#### 7.4. Srednja vrijednost hidrauličkih gubitaka

Kako je već prije spomenuto, usporedba hidrauličkih gubitaka za zaštitnu rešetku ispred hidroelektrane uključuje procjenu iznosa pada tlaka i gubitka energije koja se gubi prilikom prolaska vode kroz rešetku. Uspoređivanje hidrauličkih gubitaka kod različitih vrsta zaštitnih rešetka i dizajna omogućuje najučinkovitiji i najefikasniji odabir konfiguracije. Kako bi se uspješno usporedili hidraulički gubici, jedan od načina je izračunavanje srednje vrijednosti gubitaka. S obzirom da rezultati imaju odstupanja pri različitim brzinama, uzeta je srednja vrijednost za svaki nagib rešetke. Ovim načinom najpreciznije i najpreglednije se mogu prikazati rezultati. Uprosječeni rezultati hidrauličkih gubitaka prikazani su tablici 7.1. dok slika 7.8. prikazuje grafikon odnosa uprosječenih hidrauličkih gubitaka u ovisnosti o kutu nagiba za svaki poprečni presjek zaštitne rešetke.

Tablica 7.1. Srednja vrijednost hidrauličkih gubitaka

$\alpha$ [°]\Oblik	Pravokutan	Proizvoljan	Oblik igle	NACA
90	0,468	0,276	0,288	0,198
75	0,806	0,552	0,616	0,451
60	1,407	1,121	1,245	0,990
45	2,645	2,274	2,486	2,102
30	3,958	3,548	3,701	3,473



Slika 7.8. Srednja vrijednost hidrauličkih gubitaka u ovisnosti o kutu nagiba rešetke

Vidljivo je kako se najveći hidraulički gubici pojavljuju kod zaštitne rešetke s lamelama načinjenim od pravokutnog poprečnog presjeka. Razlog najvećih gubitaka je pojava najvećeg pada tlaka koji je mjereno ispred i iza zaštitne rešetke. Slučaj kada zaštitna rešetka ostvaruje najveće gubitke je pri kutu nagiba  $\alpha$  od 30°. To se prepisuje pojavi vrtloženja zbog čega dolazi do velikih gubitaka energije neposredno iza rešetke. S obzirom da dolazi do najvećih hidrauličkih gubitaka

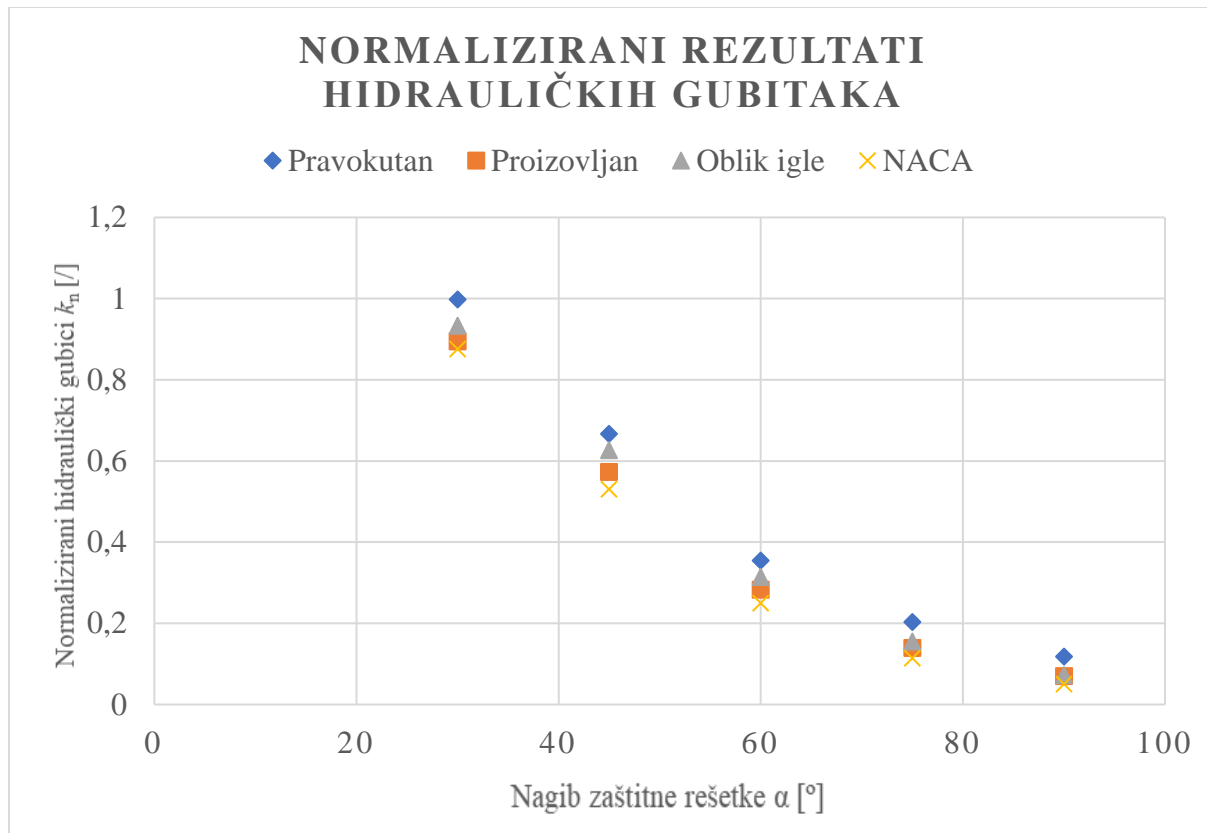
pri nagibu rešetke od 30°, poprečni presjek će igrati najveću ulogu u uštedi. Vrijednosti hidrauličkih gubitaka poprimaju slične rezultate kod proizvoljnog poprečnog presjeka i poprečnog presjeka oblika igle. Najmanje padove tlaka, a samim time i najmanje hidrauličke gubitke postiže zaštitna rešetka načinjena od NACA profila u svakom provedenom slučaju. NACA ostvaruje odlične rezultate te svojim oblikom omogućuje lakše kretanje fluida te se neposredno iza lamela stvaraju manja vrtloženja nego za sve ostale poprečne presjeke. Iako rešetke izrađene od NACA profila postižu najmanje hidrauličke gubitke, operateri hidroelektrana trebaju pomno proučiti isplativost s obzirom na visoke troškove izrade lamela takvih poprečnih presjeka.

### 7.5. Normalizirani hidraulički gubici

Normalizirani hidraulički gubici prikazani su u tablici 7.2. dok graf na slici 7.9. prikazuje odnos normaliziranih hidrauličkih gubitaka u ovisnosti o nagibu zaštitne rešetke za svaki poprečni presjek.

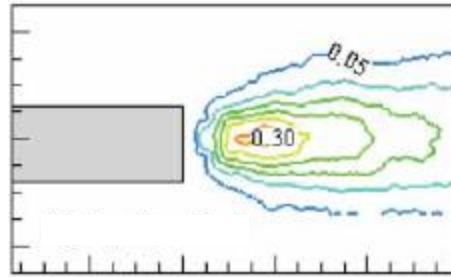
Tablica 7.2. Normalizirani rezultati hidrauličkih gubitaka

$\alpha$ [°]\Oblik	Pravokutan	Proizvoljan	Oblik igle	NACA
90	0,118	0,070	0,073	0,050
75	0,203	0,139	0,155	0,114
60	0,355	0,283	0,314	0,250
45	0,667	0,573	0,627	0,530
30	0,998	0,895	0,933	0,876

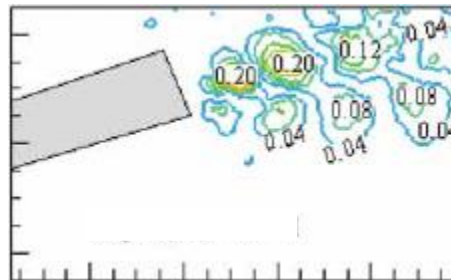


Slika 7.9. Normalizirani rezultati hidrauličkih gubitaka u ovisnosti o kutu nagiba rešetke

Prema grafu na slici 7.9. vrijednost normaliziranih hidrauličkih gubitaka kreće se od nula do jedan. Očekivani rezultati će biti da za maksimalnu vrijednost hidrauličkih gubitaka koeficijent  $k_n$  poprimi vrijednost jedan. To se dogodilo u slučaju kada se rešetka nagnula pod kut od 30°. Slika 7.10. prikazuje fenomen pojave manjih vrtloženja iza svake lamele pri turbulentnom strujanju. Ovisno o nagnutosti svake lamela, polje vrtloženja fluida gdje dolazi do velikih energija može varirati. U nekim slučajevima moguće je da dođe do razdvajanja struje fluida te dolazi do stvaranja više manjih vrtloga. Ovaj fenomen prikazan je na slici 7.11.



Slika 7.10. Pojava vrtloženja iza lamele [23]



Slika 7.11. Pojava više manjih vrtloženja iza lamele [23]

Postoji velika povezanost između poprečnog presjeka lamela u rešetki s drugim parametrima kao što su razmaci između i duljine lamela. Često smanjenje gubitka tlaka zbog promjene poprečnog presjeka omogućuje smanjenje razmaka između lamela, ali to je potrebno pažljivo procijeniti kako ne bi došlo do nakupljanja otpada, pojave neželjenih vibracija ili stvaranja polja brzina koje mogu naštetiti ribama. Također jedan od uzroka izmjene poprečnih presjeka može biti narušavanje strukturalnih aspekata. Budući da je moguće da oscilacije zbog stvaranja vrtloga utječu na vibracije, može doći do oštećenja na konstrukciji zaštitne rešetke te je prilikom odabira novih, inovativnih poprečnih presjeka potrebno uzeti u obzir sve aspekte koji su prisutni.



## 8. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu ispitan je utjecaj poprečnog presjeka zaštitne rešetke i kutova nagiba rešetke i lamela na gubitke tlaka. Provedene su numeričke simulacije za četiri različita poprečna presjeka te za pet različitih konfiguracija nagiba zaštitne rešetke. Sve simulacije provedene su kao 2D analize radi očuvana računalnih resursa te vremena. U ovom diplomskom radu ističe se važnost u sprječavanju ulaska neželjenih materijala i organizama u hidrolektranu te potreba za smanjenjem hidrauličkih gubitaka koji se javljaju zbog padova tlaka kada voda prolazi kroz rešetku. Analizom utjecaja poprečnog presjeka lamela i nagiba rešetke utvrđeno je da pravokutni presjek lamela u rešetki uzrokuje najveće padove tlaka u svim konfiguracijama. Veći nagibi rezultiraju i većim zonama turbulencije i povećanim padovima tlaka. Pokazalo se da su najveći gubici prisutni za najveće nagibe zaštitne rešetke i u tom slučaju promjena poprečnog presjeka može donijeti najveću uštedu. Iz dobivenih rezultata pokazano je kako hidrodinamični objekti kao što je NACA profil stvaraju znatno manje padove tlaka što kasnije rezultira manjih hidrauličkim gubicima. Također, potrebno je uzeti u obzir konstrukcijske i ekonomske aspekte zaštitne rešetke, kako bi se osigurala njezina dugotrajnost i funkcionalnost.

## 9. LITERATURA

- [1] Fergal O R.; Fergal, B.; Reynolds A.: Tidal energy update 2009, Applied Energy, 87, 398-409, Dublin, 2010.
- [2] Hindar, K.; Gallaugher, P.; Wood, L.: Optimising Atlantic salmon smolt survival by use of hydropower simulation modelling in a regulated river, Fishers Management and Ecology, 21, 21-31, Norveška, 2014.
- [3] NOAA: What is a fish ladder?, s interneta <https://oceanservice.noaa.gov/facts/fish-ladder.html>, 20.6.2023.
- [4] Baffert, C.: Hydropower is destroying Europe's rivers and biodiversity. It is also the main reasons EU's water protection law is breached, s interneta [https://www.wwf.eu/what\\_we\\_do/water/hydropower/](https://www.wwf.eu/what_we_do/water/hydropower/), 20.6.2023.
- [5] Chistensen, R.: Hydraulic and Mechanical Equipment, U.S Dept. of Interior ,Sjedinjene Američke Države, 2016.
- [6] Lopez Castano, S.; Vercruyssen, J.; Visser, K.P.: Trash rack and fish diversion screens, The Government of Flanders, Department of Mobility and Public Works, Flanders Hydraulics Research., Belgija 2022.
- [7] Amirodin Sadrejad, S.: Hydrodynamics induced vibration to Trash-Racks, International Journal of Engineering, Vol. 14, No. 4, pp 357-366, Teheran, 2002.
- [8] Turnpenny, A.W.H.; O'Keeffe, N.: Screening for Intake and Outfalls: a best practice guide, Environmental Agency, Rio House, Bristol, Veljača 2005.
- [9] Inglis, M. L.; McCoy G.L.; Robson, M.: Testing the effectiveness of fish screens for hydropower intakes, Environmental Agency, Horizon House, Bristol, 2016.
- [10] Szabo-Meszaros, M.; i dr.: Experimental hydraulics on fish-friendly trash racks: an ecological approach. Ecological Engineering, 113, 11-20, Norveška, 2018.

- [11] Beck, C.; Albayrak, I.; Boes, M., R.: Improved Hydraulic Performance of fish Guidance Structures with innovative Bar Design, Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, Zurich, 20.8.2018.
- [12] Versteeg, H.K.; Malalasekera, W.: An introduction to Computational Fluid Dynamics, Pearson education limited, Engleska, 2007.
- [13] Kriewitz-Byun C.R.: Hydraulik und fischbiologische Effizienz, Njemačka, 2015.
- [14] Sunko, D.: Prvi zakon termodinamike, s interneta <http://www.phy.pmf.unizg.hr/dodip/notes/statisticka/node7.html>, 1.7.2023.
- [15] Marion, M.; Temam, R.: Handbook of Numerical Analysis VI - Navier-Stokes Equations: Theory and Approximation, Elsevier Science, Amsterdam, 1998.
- [16] Leap Austria.: What  $Y^+$  should I use? Part 1 – Understand the Physics of Boundary Layers, s interneta [https://www.computationalfluidynamics.com.au/y-plus\\_part1\\_understanding-the-physics-of-boundary-layers/](https://www.computationalfluidynamics.com.au/y-plus_part1_understanding-the-physics-of-boundary-layers/), 10.7.2023.
- [17] Lučin, I.; i dr.: Assessment of head loss coefficients for water turbine intake trash-racks by numerical modeling, Journal of Advanced Research, 21, 109-119, Rijeka, 2020.
- [18] Raynal, S.; i dr.: Numerical simulations of fish-friendly angled trashracks at model and prototype scale, Journal of Hydraulic Research, 35, 56-66, 2013
- [19] Čarija, Z.; i dr.: Investigation of numerical simulation parameters on fluid flow around trash-racks, Proceedings of the 29th DAAAM international symposium 1046-52, Zadar, 2018.
- [20] Albayrak, I.; i dr.: An experimental investigation on louvres and angled bar racks, Journal of Hydraulic Research, 56, 59-75, Ujedinjeno kraljevstvo, 2017.
- [21] Mawuli Tsikata, J.; Katopodis, C.; Francis Tachie, M.: Experimental study of turbulent flow near model trashracks, Journal of Hydraulic Research, 47, 275-280, Kanada, 2009.
- [22] Raynal, S.; i dr.: An experimental study on fish-friendly trashracks – Part 2. Angled trashracks, Journal of Hydraulic Research, 51, 67-75, Francuska, 2013.
- [23] Tsikata, J, M.; i dr.: Open-channel turbulent flow through bar racks, Journal of Hydraulic Research, 52, 630-643, Kanada, 2014.

## 10. POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1. Riblje ljestve [3].....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 3.1. Zaštitna rešetka s krajnjim nosačem [5].....</i>	<i>6</i>
<i>Slika 3.2. Zaštitna rešetka s bočnim nosačem [5] .....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 3.3. Integralna zaštitna rešetka [7].....</i>	<i>8</i>
<i>Slika 3.4. Zaštitna rešetka za obilaženje hidroelektrane [8] .....</i>	<i>9</i>
<i>Slika 4.1. Izrada eksperimentalne rešetke [9] .....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 4.2. Skica eksperimentalnog ispitivanja [9] .....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 4.3. Putanja kretanja anadromnog atlantskog lososa [9].....</i>	<i>15</i>
<i>Slika 4.4. Putanja kretanja katadromne europske jegulje [9].....</i>	<i>16</i>
<i>Slika 4.5. Primjer istraživanja za dva poprečna presjeka zaštitne rešetke [10].....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 4.6. Novi dizajn lamela [11] .....</i>	<i>19</i>
<i>Slika 5.1. Vizualizacija polja strujanja [13].....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 5.2. Materijalni i kontrolni volumen.....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 5.3. Promatrani kontrolni volumen.....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 5.4. Podjela graničnih slojeva [16] .....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 5.5. Skalabilna zidna funkcija [16].....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 6.1. Domena.....</i>	<i>32</i>
<i>Slika 6.2. Ispitivani poprečni presjeci rešetke: a) pravokutni profil b) proizvoljan profil c) oblik igle d) NACA profil.....</i>	<i>33</i>
<i>Slika 6.3. Odnos kutova <math>\alpha</math> i <math>\beta</math> [17] .....</i>	<i>34</i>
<i>Slika 6.4. Primjer zaštitne rešetke za pravokutni profil i <math>\alpha = \beta = 45^\circ</math>.....</i>	<i>35</i>
<i>Slika 6.5. Dodatna ugušćenja .....</i>	<i>36</i>
<i>Slika 6.6. Postavke objektivnog ugušćenja .....</i>	<i>37</i>
<i>Slika 6.7. Postavke lokalnog ugušćenja.....</i>	<i>38</i>
<i>Slika 6.8. Postavke graničnog sloja.....</i>	<i>39</i>
<i>Slika 6.9. Potpuno umrežen model zaštitne rešetke .....</i>	<i>40</i>
<i>Slika 6.10. Detalj lamela u zaštitnoj rešetki .....</i>	<i>40</i>
<i>Slika 6.11. odabrana područja za očitavanje pada tlaka .....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 6.12. Primjer recirkulacijske zone [17].....</i>	<i>43</i>

<i>Slika 7.1. Konture brzina u domeni pri <math>v= 1</math> m/s: a) <math>\alpha = 90^\circ</math> i <math>\beta = 0^\circ</math> b) <math>\alpha = 75^\circ</math> i <math>\beta = 15^\circ</math> c) <math>\alpha = 60^\circ</math> i <math>\beta = 30^\circ</math> d) <math>\alpha = 45^\circ</math> i <math>\beta = 45^\circ</math> e) <math>\alpha = 30^\circ</math> i <math>\beta = 60^\circ</math>.....</i>	45
<i>Slika 7.2. Konture brzina pri <math>\alpha = 45^\circ</math> za: a) pravokutni poprečni presjek b) proizvoljan poprečni presjek c) poprečni presjek oblika igle d) poprečni presjek oblika NACA profila.....</i>	47
<i>Slika 7.3. Hidraulički gubici u ovisnosti o brzini za <math>\alpha = 90^\circ</math> i <math>\beta = 0^\circ</math>.....</i>	48
<i>Slika 7.4. Hidraulički gubici u ovisnosti o brzini za <math>\alpha = 75^\circ</math> i <math>\beta = 15^\circ</math>.....</i>	49
<i>Slika 7.5. Hidraulički gubici u ovisnosti o brzini za <math>\alpha = 60^\circ</math> i <math>\beta = 30^\circ</math>.....</i>	50
<i>Slika 7.6. Hidraulički gubici u ovisnosti o brzini za <math>\alpha = 45^\circ</math> i <math>\beta = 45^\circ</math>.....</i>	51
<i>Slika 7.7. Hidraulički gubici u ovisnosti o brzini za <math>\alpha = 30^\circ</math> i <math>\beta = 60^\circ</math>.....</i>	52
<i>Slika 7.8. Srednja vrijednost hidrauličkih gubitaka u ovisnosti o kutu nagiba rešetke.....</i>	53
<i>Slika 7.9. Normalizirani rezultati hidrauličkih gubitaka u ovisnosti o kutu nagiba rešetke .....</i>	55
<i>Slika 7.10. Pojava vrtloženja iza lamele [23].....</i>	56
<i>Slika 7.11. Pojava više manjih vrtloženja iza lamele [23] .....</i>	56

## 11. POPIS TABLICA

<i>Tablica 4.1. Ukupan broj riba ulovljenih u elektranama u ovisnosti o lokaciji postrojenja [8]</i>	<i>11</i>
<i>Tablica 4.2. Omjer ulaska i preživljavanja riba postrojenja Sizewell B u odnosu na Sizewell A [8]</i>	<i>12</i>
<i>Tablica 6.1. Odnos kutova <math>\alpha</math> i <math>\beta</math> za promatrane slučajeve.....</i>	<i>34</i>
<i>Tablica 6.2. Vrste lokalnog ugušćenja.....</i>	<i>38</i>
<i>Tablica 6.3. Postavke rubnih uvjeta .....</i>	<i>39</i>
<i>Tablica 6.4. Svojstva fluida korištena u simulaciji.....</i>	<i>41</i>
<i>Tablica 7.1. Srednja vrijednost hidrauličkih gubitaka .....</i>	<i>53</i>
<i>Tablica 7.2. Normalizirani rezultati hidrauličkih gubitaka.....</i>	<i>54</i>

## SAŽETAK

Zaštitna rešetka postavlja se ispred hidroelektrane te ima ključnu ulogu u zaštiti hidroelektrana od krupnih predmeta koji ju mogu oštetiti kao i zaštiti riba te ostalog životinjskog svijeta od ulaska u turbinu. U ovom diplomskom radu istražuje se utjecaj poprečnog presjeka zaštitne rešetke na hidrauličke gubitke. Izrađene su numeričke simulacije pomoću programskog alata OpenFOAM te su ispitani različiti nagibi i 4 različita poprečna presjeka. Rezultati ovog rada ukazuju da je potrebno pomno analizirati i odabrati koji poprečni presjek zaštitne rešetke odabrati. Optimizacija poprečnog presjeka zaštitne rešetke može povećati iskoristivost turbina u hidroelektrani i smanjiti hidrauličke gubitke, što rezultira poboljšanom učinkovitošću sustava.

**Ključne riječi:** zaštitna rešetka, poprečni presjek, hidroelektrana, hidraulički gubici, numeričko modeliranje, zaštita riba

## SUMMARY

Trash rack is installed in front of the hydroelectric power plant and plays a crucial role in safeguarding hydroelectric facilities from large objects that could damage them, as well as protecting fish and other wildlife from entering the turbine. This master's thesis investigates the impact of the cross-sectional area of trash rack on hydraulic losses. Numerical simulations were conducted using the OpenFOAM software tool, examining different angles and four different cross-sections. The results of this study indicate the need for careful analysis and selection of appropriate cross-section for the trash rack. Optimizing the cross-sectional shape of the trash rack can increase the efficiency of turbines in the hydroelectric power plant and reduce head losses, resulting in improved system efficiency.

**Key words:** Trash rack, cross-section, hydroelectric power plant, head-loss, numerical modeling, fish protection