

# Optimizacija dizajna cross-flow vjetroturbine

---

Janković, Laura

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:970185>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**OPTIMIZACIJA DIZAJNA  
CROSS-FLOW VJETROTURBINE**

Rijeka, rujan 2024

Laura Janković

0069085912

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**OPTIMIZACIJA DIZAJNA  
CROSS-FLOW VJETROTURBINE**

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Stefan Ivić

Komentor: Ante Sikirica

Rijeka, rujan 2024

Laura Janković

0069085912

Rijeka, 15.03.2024.

Zavod: Zavod za mehaniku fluida i računalno inženjerstvo  
Predmet: Optimizacije u tehnici

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Laura Janković (0069085912)**  
Studij: Sveučilišni diplomski studij strojarstva (1100)  
Modul: Računarska mehanika i inženjerstvo (1120)  
Zadatak: **Optimizacija dizajna cross-flow vjetroturbine / Cross-flow wind turbine design optimization**

### Opis zadatka:

U uvodnom dijelu diplomskog rada potrebno je opisati izvedbu i princip rada cross-flow vjetroturbine. Pripremiti nestacionarnu računalnu simulaciju strujanja zraka kroz statorske i rotorske djelove turbine, te evaluirati dobivenu snagu. Razmotriti i osmisliti prikladnu parametrizaciju dizajna turbine, ciljeve i ograničenja optimizacije. Pripremiti automatizirani postupak parametrizacije geometrije i numeričke mreže te provođenja simulacije i evaluacije rezultata. Odabrati adekvatnu optimizacijsku metodu i provesti optimizaciju za postavljeni problem. Dobivene rezultate vizualizirati i animirati. U završnom dijelu diplomskog rada istaknuti najvažnije zaključke, komentare i preporuke za daljnji razvoj korištene metodologije.

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

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:  
izv. prof. dr. sc. Stefan Ivić

Komentor:  
Ante Sikirica

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:  
izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić

## Izjava o samostalnoj izradi rada

Izjavljujem da sam samostalno izradila diplomski rad pod nazivom „Optimizacija dizajna Cross-flow vjetroturbine“.

Rijeka, rujan 2024.

---

Laura Janković

## **Zahvala**

Iskreno zahvaljujem svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Stefanu Ivići, i komentoru Anti Sikirici za njihove vrijedne savjete, pomoć i vodstvo u izradi ovog rada. Posebno bih se zahvalila svojoj obitelji, prijateljima te Matku na njihovoj podršci i razumijevanju tijekom cijelog mog studija.

## Sadržaj

1	UVOD .....	3
2	ENERGIJA VJETRA I VJETROTURBINE.....	4
2.1	Obnovljivi izvori energije .....	4
2.2	Vjetar.....	5
2.3	Energija vjetra .....	6
2.4	Vjetroturbine .....	8
2.5	Vjetroturbine i zgrade.....	9
2.6	Princip rada <i>crossflow</i> vjetroturbine.....	12
3	NUMERIČKE SIMULACIJE STRUJANJA FLUIDA .....	14
3.1	Matematički model strujanja.....	14
3.1.1	Turbulentni modeli .....	15
3.1.2	Granični sloj .....	17
3.2	Numeričke metode .....	18
3.3	<i>Gmsh</i> .....	21
3.4	<i>OpenFOAM</i> .....	21
4	PARAMETRIZACIJA .....	23
4.1	Geometrija modela .....	23
4.2	Parametrizacija kućišta.....	25
4.3	Parametrizacija lopatica turbine .....	27
4.4	Postavke numeričke mreže.....	29
4.5	Rubni uvjeti i postavke simulacije .....	30
4.6	Početna simulacija.....	33
5	OPTIMIZACIJA .....	38
5.1	Formulacija optimizacijskog problema.....	38
5.2	Parametri, varijable i ciljevi .....	39
5.3	Optimizacijske metode.....	40

5.3.1	Optimizacija rojem čestica (PSO) .....	41
5.3.2	Diferencijalna evolucija (DE) .....	42
5.3.3	Algoritam vatrometa (FWA) .....	43
5.4	Implementacija algoritma.....	44
6	REZULTATI .....	46
6.1	Konvergencija .....	46
6.2	Optimalni dizajn.....	47
6.3	Simulacija optimalnog dizajna .....	49
6.4	Validacija rezultata nestacionarnom simulacijom .....	52
7	USPOREDBA OPTIMIZACIJSKIH METODA .....	55
8	ZAKLJUČAK .....	58
	Bibliografija .....	60
	Popis slika .....	63
	Popis tablica .....	66
	Sažetak .....	67



# 1 UVOD

Već desetljećima proizvodnja električne energije oslanja se na fosilna goriva. Zagađenje okoliša, ograničene zalihe tih sirovina i sve veća potražnja za električnom energijom postali su razlozi za zabrinutost. Prema predviđanjima, fosilna goriva uskoro neće moći zadovoljiti rastuće potrebe za električnom energijom, a zbog njihove ograničenosti, cijene će također rasti. Dio rješenja za ove probleme može biti prelazak na obnovljive izvore energije [1].

Postoji nekoliko izvora obnovljive energije, poput vode, morskih valova, sunčeve energije i energije vjetra. Energija vjetra se ističe kao jedan od najisplativijih izvora električne energije iz obnovljivih izvora, s visokom dostupnošću. Danas je energija vjetra najbrže rastuća energetska tehnologija [2].

Vjetroturbine omogućuju pretvorbu energije vjetra u mehaničku energiju, a potom i u električnu energiju. U ovom radu razmatrane su vjetroturbine u urbanim područjima. Crossflow vjetroturbine ističu se velikim momentom pri niskim omjerima obodne brzine i brzine vjetra, niskom razinom buke i visokom stabilnošću, što ih čini idealnim za primjenu u urbanim sredinama. Unatoč prednostima, crossflow turbine imaju i jedan nedostatak, a to je relativno nizak koeficijent snage [3].

Kako bi se povećao koeficijent snage, potrebno je unaprijediti dizajn same turbine i kućišta. Koeficijent snage turbine može se eksperimentalno odrediti ili pomoću numeričkih simulacija strujanja vjetra. Numeričke simulacije strujanja fluida omogućuju predviđanje toka fluida rješavanjem matematičkih modela strujanja.

Optimizacija je proces pronalaska najboljeg ili najprihvatljivijeg rješenja s obzirom na postavljene kriterije. U matematičkom smislu, optimizacija je proces pronalaska minimuma (ili maksimuma) višedimenzionalnih problema uz dane uvjete i ograničenja [4]. Postoji mnogo optimizacijskih algoritama, a ključan je izbor prikladnog algoritma za rješavanje određenog problema.

Kombinacija numeričkih simulacija strujanja fluida i optimizacijskih algoritama može biti izvrsno rješenje za pronalaženje dizajna koji omogućuje veći koeficijent snage.

U ovom radu dan je pregled teorijskih osnova o energiji vjetra i vjetroturbinama. Opisan je postupak numeričkih simulacija, korišteni softveri i optimizacijske metode. Detaljno su objašnjeni parametri geometrije, postavke mreže i provedene simulacije. Na kraju je opisan proces optimizacije, prikazani rezultati te su uspoređene tri optimizacijske metode.

## 2 ENERGIJA VJETRA I VJETROTURBINE

U ovom poglavlju dan je pregled obnovljivih izvora energije s posebnim naglaskom na značaj vjetra, kao i teoretska pozadina vjetroturbina te njihova primjena u urbanim sredinama.

### 2.1 Obnovljivi izvori energije

Proizvodnja električne energije od svojih početaka većinom se oslanjala na korištenje fosilnih goriva. Od jednostavnih parnih turbina koje su koristile ugljen kao gorivo, pa sve do modernih termoelektrana, fosilna goriva igrala su ključnu ulogu u zadovoljenju energetske potreba. Međutim, s ubrzanom rastom svjetske populacije, koja bi prema predviđanjima do 2100. godine mogla premašiti 10 milijardi ljudi [5], potražnja za električnom energijom također raste, a kapacitet fosilnih goriva neće moći održati korak s tim potrebama zbog svojih ograničenih zaliha.

Osim ograničenih resursa, korištenje fosilnih goriva nosi sa sobom mnoge negativne posljedice, uključujući zagađenje okoliša, klimatske promjene, globalno zagrijavanje te negativan utjecaj na ljudsko zdravlje. Globalizacija energetske krize i sve vidljiviji simptomi globalnog zagrijavanja doveli su do porasta svijesti o problemima povezanim s fosilnim gorivima i naglašavanja potrebe za prijelazom na obnovljive, „zelene“ izvore energije.

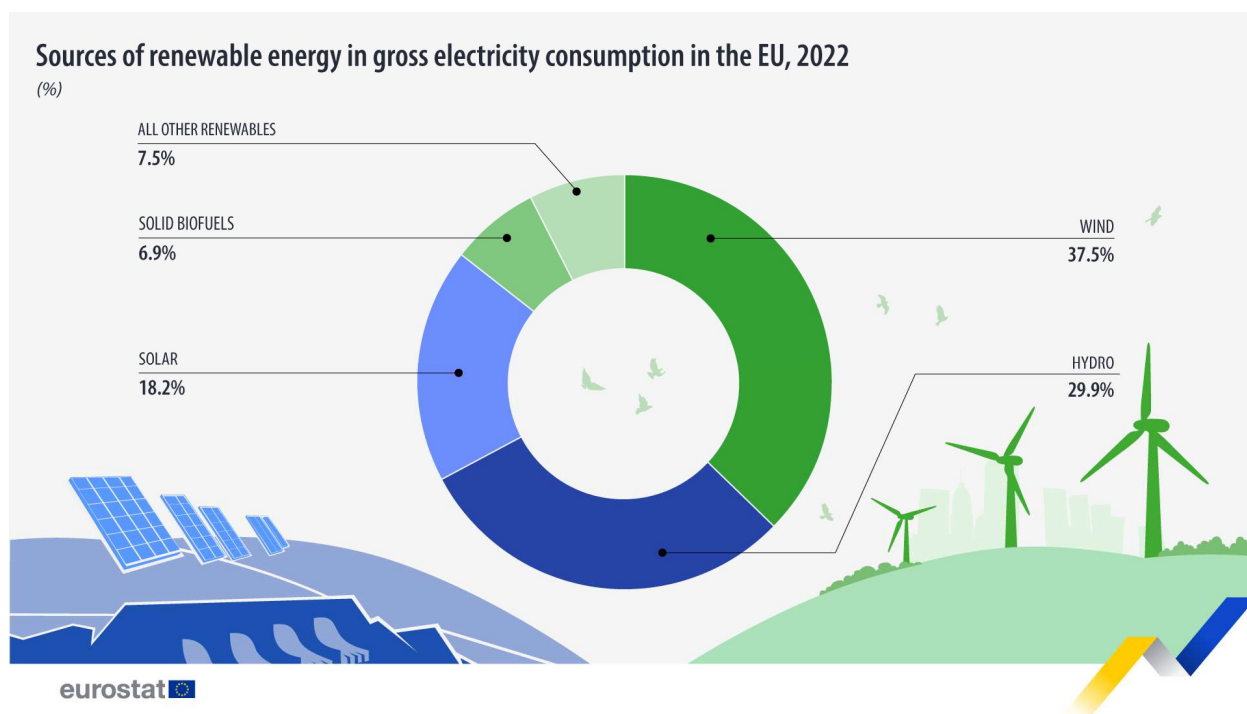
Obnovljivi energetske izvori definirani su kao oni izvori čija je potrošnja manja ili jednaka energiji koju generiraju u istom vremenskom razdoblju. Takvi izvori ne samo da smanjuju ovisnost o fosilnim gorivima, već i pomažu u očuvanju okoliša i borbi protiv klimatskih promjena, čime osiguravaju održiviji energetske sustav za buduće generacije.

U obnovljive oblike energije se svrstava:

- Energija vode - energija vodotokova, morskih struja, valova te plime i oseke
- Biomasa – poljoprivredna, šumska, biogoriva i otpad
- Sunčeva energija
- Energija vjetra

Energija vjetra se istaknula kao jedan od najisplativijih, obnovljivih izvora za generiranje električne energije, te je ujedno i široko dostupan.

U 2022. godini u Europskoj Uniji obnovljivi izvori energije činili su 41,2% bruto potrošnje električne energije, što predstavlja povećanje od 5,7% u odnosu na prethodnu godinu. Prema Eurostatu, energija vjetra činila je više od jedne trećine ukupne električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora u Europskoj uniji te godine [6]. Na slici 2.1. prikazani su udjeli različitih izvora obnovljive energije.

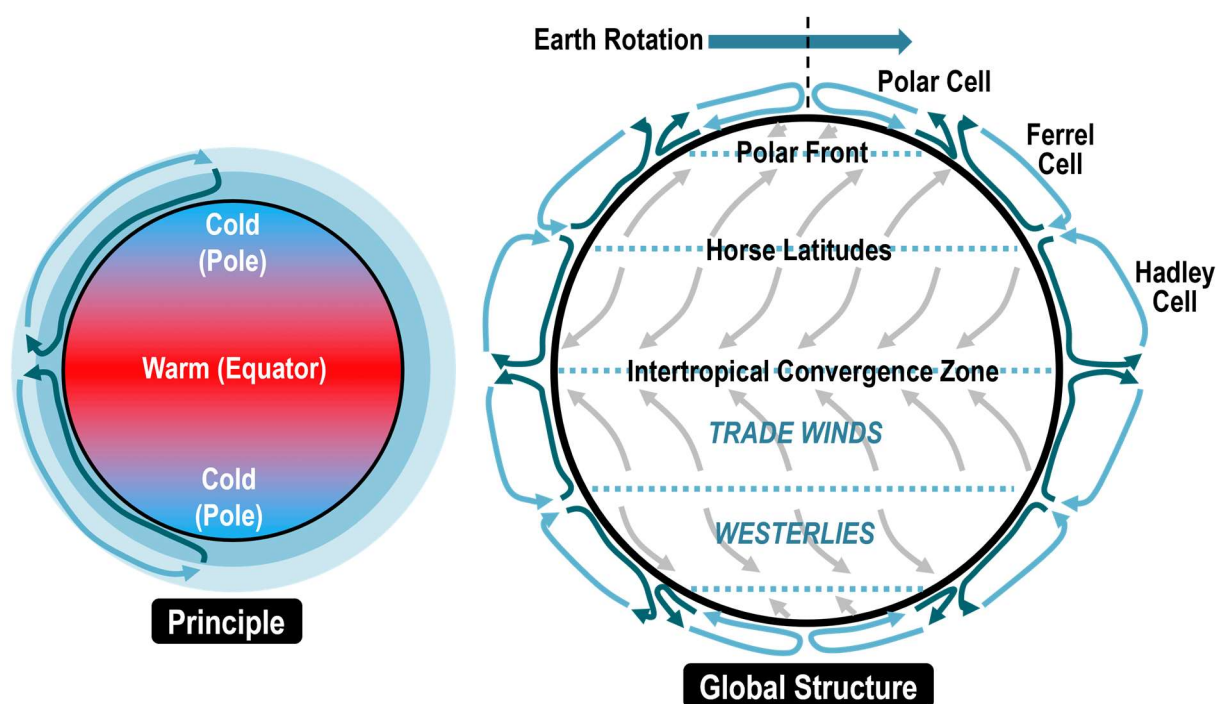


Slika 2.1. Udio izvora obnovljive energije u bruto potrošnji električne energije u EU 2022. godine [6]

## 2.2 Vjetar

Atmosferski tlak, uzrokovan težinom zraka i određen težinom stupca zraka nad površinom [7], igra ključnu ulogu u pokretanju globalnih masa zraka. Atmosferski tlak ovisi o nadmorskoj visini i vremenskim uvjetima. U načelu, područja višeg tlaka karakteriziraju stabilni i pogodni vremenski uvjeti dok područja nižeg tlaka obilježavaju nestabilni uvjeti koji nerijetko uključuju padaline i jak vjetar. Globalni obrasci vjetra su uvjetovani nejednolikom raspodjelom sunčeve energije diljem Zemlje. Na području ekvatora sunčeve zrake izravnije pogađaju zemljinu površinu uzrokujući intenzivnije zagrijavanje u usporedbi s područjima na višim geografskim širinama gdje zrake pogađaju površinu pod oštrijim kutom. Ova razlika u zagrijavanju zemljine površine uzrokuje

razliku u temperaturi između ekvatora i polova što posljedično uzrokuje razlike u atmosferskom tlaku. Upravo ta razlika pokreće globalne obrasce vjetra prikazane na slici 2.2.



Slika 2.2. Globalni obrasci vjetra [8]

Osim globalnih obrazaca vjetra, javljaju se i lokalni vjetrovi poput morskih povjetaraca, koji su također posljedica nejednolikog zagrijavanja. Kopno i vodene površine imaju različite toplinske kapacitete, što znači da apsorbiraju i otpuštaju toplinu različitim brzinama. Tijekom dana, kopno se brže zagrijava od mora, zbog čega se zrak iznad kopna podiže i stvara područje niskog tlaka. Hladniji zrak s mora tada se pomiče prema kopnu kako bi nadomjestio uzlazne struje toplog zraka, što uzrokuje morski povjetarac. Noću se proces obrće, pri čemu se kopno brže hladi, uzrokujući pojavu kopnenog povjetarca.

### 2.3 Energija vjetra

Snaga je fizikalna veličina koja opisuje brzinu prenošenja energije ili obavljanja mehaničkoga rada [9]. Iskoristiva energija vjetra primarno proizlazi iz njegove kinetičke energije. Kinetička energija bilo koje mase zraka u pokretu može se izračunati koristeći izraz (2.1):

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot u_\infty^2 \quad (2.1)$$

gdje je:

$E_k$  kinetička energija gibajuće mase vjetra,

$m$  masa zraka,

$u_\infty$  brzina zraka.

Kako bi se dobila kinetička energija u jedinici vremena odnosno snaga, potrebno je razmotriti gibanje zraka kroz površinu [10]. Zrak se kreće kroz površinu A, obujam zraka koji prolazi kroz površinu A je jednak:

$$Q = A \cdot u_\infty \quad (2.2)$$

gdje je:

$Q$  volumni protok,

$A$  promatrana površina.

Množenjem dobivenog volumnog protoka zraka s gustoćom zraka dobiva se masa zraka koja prolazi kroz površinu A svake sekunde:

$$\dot{m} = Q \cdot \rho = u_\infty \cdot A \cdot \rho \quad (2.3)$$

gdje je:

$\dot{m}$  maseni protok,

$\rho$  gustoća zraka.

Uvrštavanjem izraza (2.3) u izraz (2.1) dobiva se kinetička energija po sekundi, odnosno, prema definiciji, snaga vjetra:

$$P_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot u_\infty^3 \quad (2.4)$$

gdje je:

$P_W$  snaga vjetra.

Iz ovog izraza (2.4) jasno je vidljivo da snaga vjetra ovisi o površini kroz koju prolazi i o kubu njegove brzine. Važno je napomenuti da snaga sadržana u vjetru nije jednaka snazi vjetroturbine. Razni gubici uzrokuju razliku u prijenosu energije.

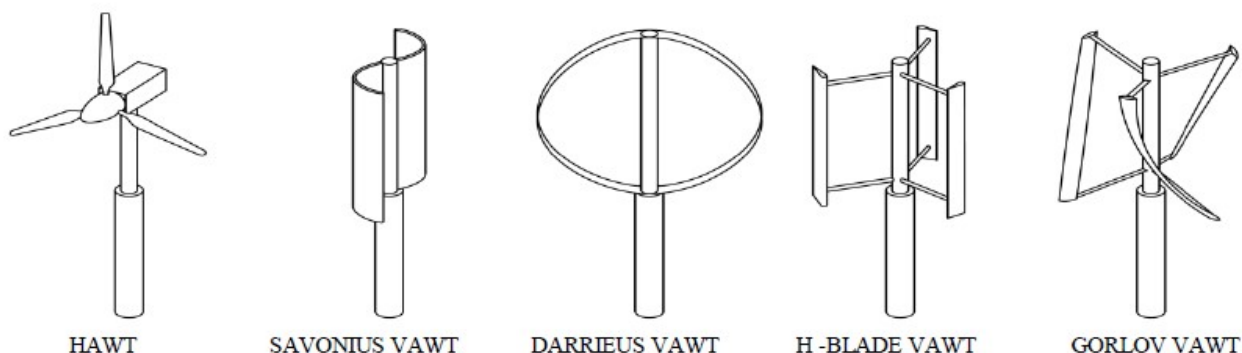
## 2.4 Vjetroturbine

Vjetroturbina je energetski stroj koji pretvara kinetičku energiju vjetra u mehanički rad. Razvoj turbina potječe od vjetrenjača, pri čemu su poboljšanja u konstrukciji lopatica znatno povećala njihovu učinkovitost [11]. Kada vjetar puše, udarajući u lopatice turbine, one su dizajnirane da generiraju silu uzgona koja pokreće lopatice, a time i cijeli rotor. Spajanjem rotora na generator dobiva se električna energija.

Vjetroturbine se mogu klasificirati na različite načine, a jedan od njih je prema djelovanju aerodinamičkih sila. Prema ovoj podjeli, turbine mogu biti dizajnirane da djeluju na principu sile otpora ili sile uzgona. Dok su drevne vjetroturbine bile dizajnirane da djeluju na silu otpora, moderne vjetroturbine se oslanjaju na veliku silu uzgona, čime se postiže veća učinkovitost.

Druga uobičajena podjela vjetroturbina temelji se na položaju osi rotacije, pri čemu se razlikuju vjetroturbine s vertikalnom osi i one s horizontalnom osi.

Na slici 2.3. prikazane su razne vrste turbina s horizontalnom i vertikalnom osi.



Slika 2.3. Razne vrste vjetroturbina [12]

Postoji nekoliko ključnih veličina koje opisuju radne uvjete vjetroturbina. Jedan od tih izraza je omjer obodne brzine vrha lopatice i brzine nadolazećeg vjetra. Za određen profil lopatica postoji određeni omjer koji maksimizira učinkovitost turbine [13]. Omjer je dan izrazom (2.5):

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{u_{\infty}} \quad (2.5)$$

gdje je:

$\lambda$  omjer obodne brzine lopatica i brzine vjetra,

$\omega$  kutna brzina rotora,

$R$  polumjer rotora.

Učinkovitost vjetroturbine najčešće se izražava pomoću koeficijenta snage. U općem smislu koeficijent snage vjetroturbine je jednak:

$$C_P = \frac{P_T}{P_W} \quad (2.6)$$

gdje je:

$C_P$  koeficijent snage vjetroturbine,

$P_T$  snaga turbine.

Snaga turbine može se odrediti prema izrazu (2.7):

$$P_T = T \cdot \omega \quad (2.7)$$

gdje je:

$T$  okretni moment rotora turbine,

$\omega$  kutna brzina rotora turbine.

Uvrštavanjem izraza (2.4) i (2.7) u izraz (2.6), slijedi da je izraz za koeficijent snage vjetroturbine jednak:

$$C_P = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot u_\infty^3} \quad (2.8)$$

## 2.5 Vjetroturbine i zgrade

Zgrade nulte energije su objekti čija je ukupna teoretska potrošnja energije jednaka energiji koju same proizvode koristeći obnovljive izvore energije. S obzirom na to da je energija vjetra široko dostupna, male vjetroturbine predstavljaju izvrstan izbor za povećanje energetske učinkovitosti zgrada i kuća. U posljednje vrijeme sve se češće spominje koncept vjetroturbina ugrađenih u strukturu zgrada ili kuća. Rješenja su tipično ugrađena u samu zgradu, bilo na krovu, rubu zgrade ili između zgrada. Takve vjetroturbine mogu imati vertikalnu ili horizontalnu os. Iako zgrade i

kuće mogu uzrokovati turbulencije, pravilnim postavljanjem turbina moguće je iskoristiti povoljna strujanja koja se stvaraju oko objekata [14].

Tri su osnovna tipa takvih vjetroturbina:

- Vjetroturbina montirana na zgradu ili kuću
- Vjetroturbina integrirana u zgradu
- Vjetroturbina potpomognuta zgradom

Vjetroturbine montirane na zgradu ili kuću su fizički povezane sa strukturom objekta, koristeći zgradu kao toranj za postavljanje turbine u povoljni tok zraka. Konstrukcija ove turbine mora biti dovoljno snažna da podnese vibracijska opterećenja nastala rotacijom te da minimizira buku. Također, smještaj turbine na krovu smanjuje vizualni utjecaj, što doprinosi boljoj integraciji u okolinu. Na slici 2.4. prikazano je nekoliko izvedbi vjetroturbina montiranih na krov.



*Slika 2.4. "Izvedbe vjetroturbina montiranih na krov kuće ili zgrade. Različita rješenja (gore prema dole) [15], [16], [17]*

Izraz „integrirane“ u kontekstu vjetroturbina odnosi se na one turbine koje su na neki način ugrađene u strukturu ili fasadu objekta. Međutim, klasifikacija integriranih vjetroturbina nije dosljedna, s obzirom na to da izraz „integrirane“ opisuje širok spektar rješenja. Vjetroturbine mogu biti smatrane integriranim na više načina – strukturalno, arhitektonski, ili iz električne, odnosno energetske perspektive. Općenito, pojam „integrirane vjetroturbine u zgradu“ primjenjuje se kada



je sustav ugrađen u samu konstrukciju i dizajn zgrade. Na slici 2.5. dan je primjer Strata zgrade s integriranim vjetroturbinama.



*Slika 2.5. Strata stambeni toranj s tri integrirane vjetroturbine [18]*

Vjetroturbine potpomognute zgradom su one turbine koje su postavljene tako da zgrada usmjerava i mijenja protok zraka prema turbini. To zahtijeva specifičan dizajn zgrade koji mora biti usklađen s prisutnim brzinama vjetra, kako bi se maksimalno iskoristila energija vjetra i povećala učinkovitost turbine [18]. Na slici 2.6. prikazan je primjer vjetroturbina potpomognute zgradom.

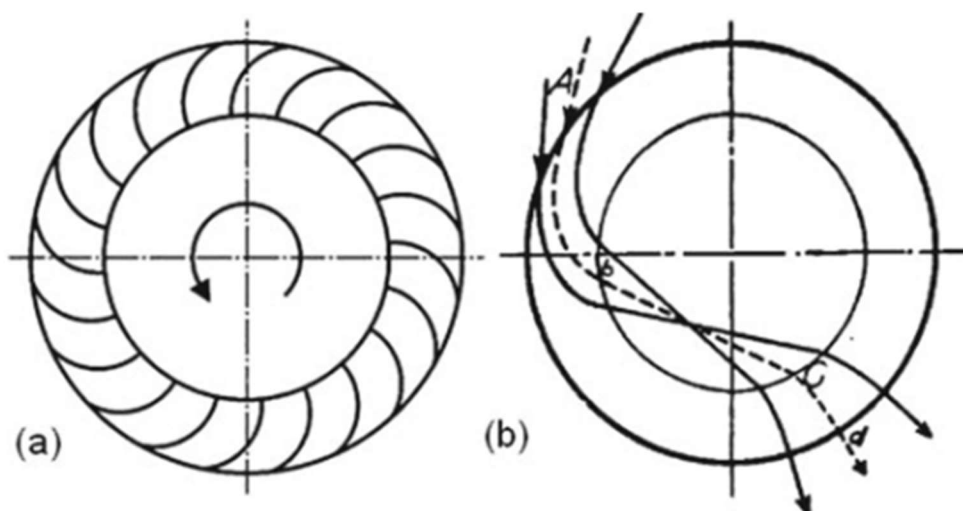


*Slika 2.6. Bahrein world trade center [19]*

## 2.6 Princip rada *crossflow* vjetroturbine

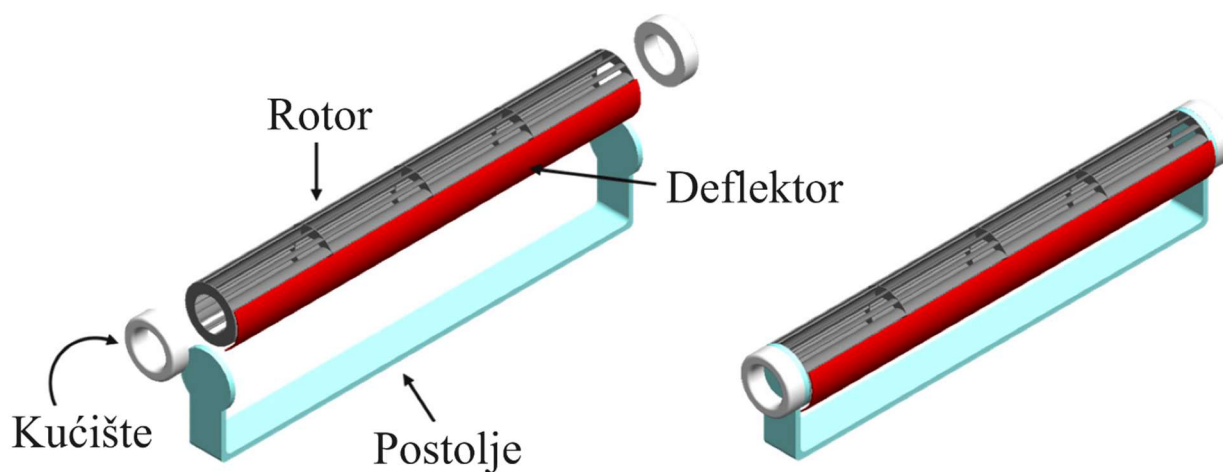
*Crossflow* vjetroturbine rijetko su predmet istraživanja, tipično zbog svoje relativno niske učinkovitosti i percepcije da nisu perspektivna energetska tehnologija, međutim u posljednje vrijeme dolaze do izražaja njihove prednosti. Među njima su veliki moment pri niskim brzinama vjetra, niska razina buke, jednostavnost, pouzdanost, niski troškovi i ekološka prihvatljivost, što ih čini pogodnima za primjenu u područjima s niskim brzinama vjetra, poput urbanih sredina [1].

Dizajn *crossflow* vjetroturbine temelji se na konceptu Banki vodene turbine [20]. Na slici 2.7.(a) dan je shematski prikaz *crossflow* vjetroturbine, koja ima rotor kroz koji zrak prolazi poprečno, stupajući u interakciju s lopaticama turbine i na ulazu i na izlazu, kao što je prikazano na slici 2.7.(b). Ova turbina djeluje na principu sile otpora, pri čemu vjetar potiskuje lopatice, uzrokujući rotaciju vratila, pomičući sljedeću lopaticu u poziciju za sljedeći udar vjetra [21].



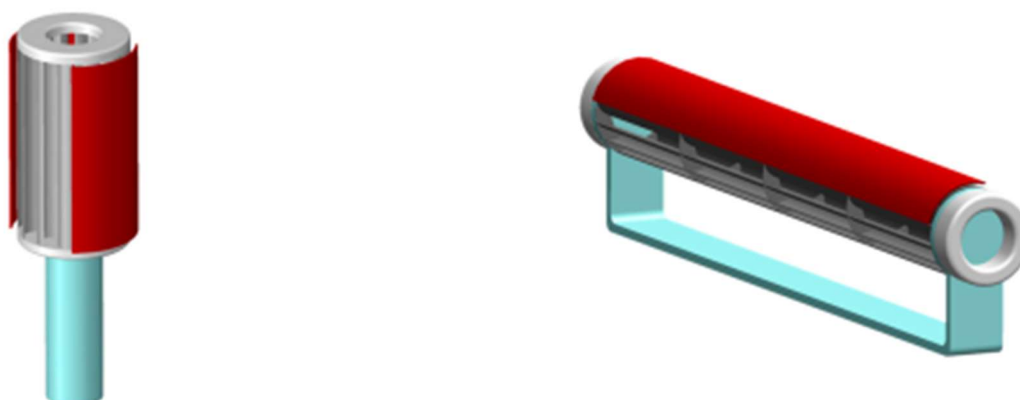
Slika 2.7. *Crossflow* vjetroturbina: (a) shematski prikaz turbine i (b) prikaz toka zraka kroz turbinu

Na slici 2.8. prikazani su ključni dijelovi *crossflow* turbine, uključujući rotor, postolje, deflektor i kućište. Kućište okuplja sve komponente i učvršćeno je za podlogu putem postolja. Deflektor, koji usmjerava zračni tok prema rotorskim lopaticama, povećava iskoristivost turbine te predstavlja dodatni uređaj za poboljšanje performansi. Dostupan je u različitim oblicima i veličinama, ovisno o specifičnim potrebama turbine.



*Slika 2.8. Dijelovi i struktura crossflow turbine*

*Crossflow* vjetroturbina može se montirati na jedan od dva načina prikazana na slici 2.9.: u uspravnom položaju (a) ili u vodoravnom položaju (b).



*Slika 2.9. Načini montiranja crossflow turbine; vertikalno (lijevo) i horizontalno (desno).*

### 3 NUMERIČKE SIMULACIJE STRUJANJA FLUIDA

Simulacija strujanja fluida sastoji se od nekoliko ključnih koraka. Proces započinje izradom geometrije i definiranjem domene, čija veličina ovisi o analiziranoj geometriji i tipu problema. Nakon izrade geometrije slijedi faza izrade mreže, tijekom koje se domena diskretizira na mnogo malih numeričkih ćelija. To omogućava numeričko rješavanje jednadžbi koje modeliraju strujanje fluida. Kvaliteta mreže ključna je za uspjeh simulacije jer izravno utječe na konvergenciju i točnost rezultata.

Nakon izrade geometrije i mreže, potrebno je postaviti granične uvjete. Granični uvjeti definiraju interakciju fluida s granicama domene, uključujući ulaz i izlaz iz domene, zidove, ravnine simetrije itd. Ispravno definiranje graničnih uvjeta od velike je važnosti kako bi simulacija precizno prikazala stvarno ponašanje fluida.

Na kraju, potrebno je podesiti postavke rješavača, što uključuje odabir odgovarajućeg modela turbulencije, definiciju svojstava fluida i postavljanje početnih uvjeta. Nakon što su sve postavke pravilno konfigurirane, moguće je pokrenuti simulaciju, koja iterativno rješava jednadžbe strujanja fluida u cijeloj domeni.

#### 3.1 Matematički model strujanja

Predloženi model strujanja opisuje gibanje fluida pri malim i srednjim brzinama u kontinuiranoj računskoj domeni  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$  na temelju nestlačivih Navier-Stokesovih jednadžbi [22]:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} - \nabla \cdot (2\mu\epsilon(\mathbf{u})) + \nabla p = \rho\mathbf{f} \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3.2)$$

gdje je:

$\mathbf{u}$  brzina fluida,

$p$  dinamički tlak fluida,

$\rho$  gustoća fluida,

$\mu$  dinamički viskozitet fluida,

$\mathbf{f}$  vanjske sile koje djeluju na fluid.

Tenzor drugog reda  $\epsilon(\mathbf{u})$  definira viskozni tenzor naprezanja za nestlačivi Newtonski fluid i dan je izrazom (3.3):

$$\epsilon(\mathbf{u}) = \frac{1}{2}(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) \quad (3.3)$$

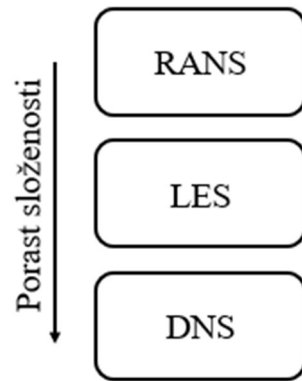
### 3.1.1 Turbulentni modeli

Navier-Stokesove jednačbe u slučaju laminarnog strujanja moguće je riješiti računalno, a često i analitički, no kod turbulentnog strujanja dolazi do stvaranja vrtložnih struktura različitih veličina s brzim i nepredvidivim oscilacijama, koje je računalno nemoguće izravno riješiti pomoću ovih jednačbi. Općenito, postoje tri različita pristupa modeliranju turbulencije i njezinih učinaka.

DNS (Direct Numerical Simulation) predstavlja potpuno trodimenzijsko i vremenski ovisno rješenje Navier-Stokesovih jednačbi i jednačbi očuvanja ravnoteže. Iako je implementacijski najjednostavniji, ovaj pristup je izuzetno zahtjevan u smislu računalnih resursa. [23]

LES (Large Eddy Simulation), odnosno simulacija velikih vrtloga, pristup je kod kojeg se veliki vrtlozi rješavaju numerički, dok se mali vrtlozi, čije su dimenzije ispod razlučivosti numeričke mreže, modeliraju matematički. Ovakav način računanja opravdan je činjenicom da su veliki vrtlozi izravno povezani s numeričkim rubnim uvjetima i nose većinu Reynoldsovih naprezanja. Po složenosti, LES se nalazi između DNS-a i RANS-a (Reynolds Averaged Navier-Stokes).

RANS modeli, temeljeni na Reynoldsovim usrednjenjima (najčešće u vremenu), predstavljaju osnovnu kategoriju modela turbulencije. Budući da su Navier-Stokesove jednačbe nelinearne, rezultirajuća usrednjena diferencijalna jednačba sadrži ne samo tražene usrednjene varijable brzine i tlaka, nego i produkte fluktuacija, poput Reynoldsovih naprezanja. Reynoldsova naprezanja mogu se protumačiti kao prosječni tok momenta po jedinici površine, što ih čini usporedivima sa smičnim naprezanjem. To uvodi dodatne nepoznanice u sustav jednačbi, zbog čega je za zatvaranje sustava potrebno uvesti dodatne aproksimacije. Najučestaliji primjeri RANS modela su k- $\epsilon$  model, k- $\omega$  model i k- $\omega$ -SST model.



Slika 3.1. Računalna složenost modela turbulencije

U ovom radu primijenjen je  $k$ - $\varepsilon$  turbulentni model zbog svoje jednostavnosti i robusnosti koja je zbog prirode optimizacijskog procesa bila ključna. Ovaj model se oslanja na dvije transportne jednačbe: jedna opisuje turbulentnu kinetičku energiju ( $k$ ) dok druga prati stopu njene disipacije ( $\varepsilon$ ) [24]. Transportne jednačbe su dane izrazima (3.4) i (3.5):

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + P - \rho \varepsilon \quad (3.4)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \varepsilon) = \nabla \cdot (\rho D_\varepsilon \nabla \varepsilon) + \frac{C_{1\varepsilon}}{k} \left( P + C_2 \frac{2}{3} k \nabla \cdot \mathbf{u} \right) - C_{2\rho} \rho \left( \frac{\varepsilon^2}{k} \right) \quad (3.5)$$

gdje su:

$k$  turbulentna kinetička energija,

$D_k$  efektivna difuzivnost za  $k$ ,

$P$  turbulentna brzina proizvodnje kinetičke energije,

$\varepsilon$  stopa disipacije turbulentne kinetičke energije,

$D_\varepsilon$  efektivna difuzivnost za  $\varepsilon$ ,

$C_1, C_2$  konstante,

$\mu_t$  model vrtložne viskoznosti.

Model vrtložne viskoznosti dan je izrazom (3.6):

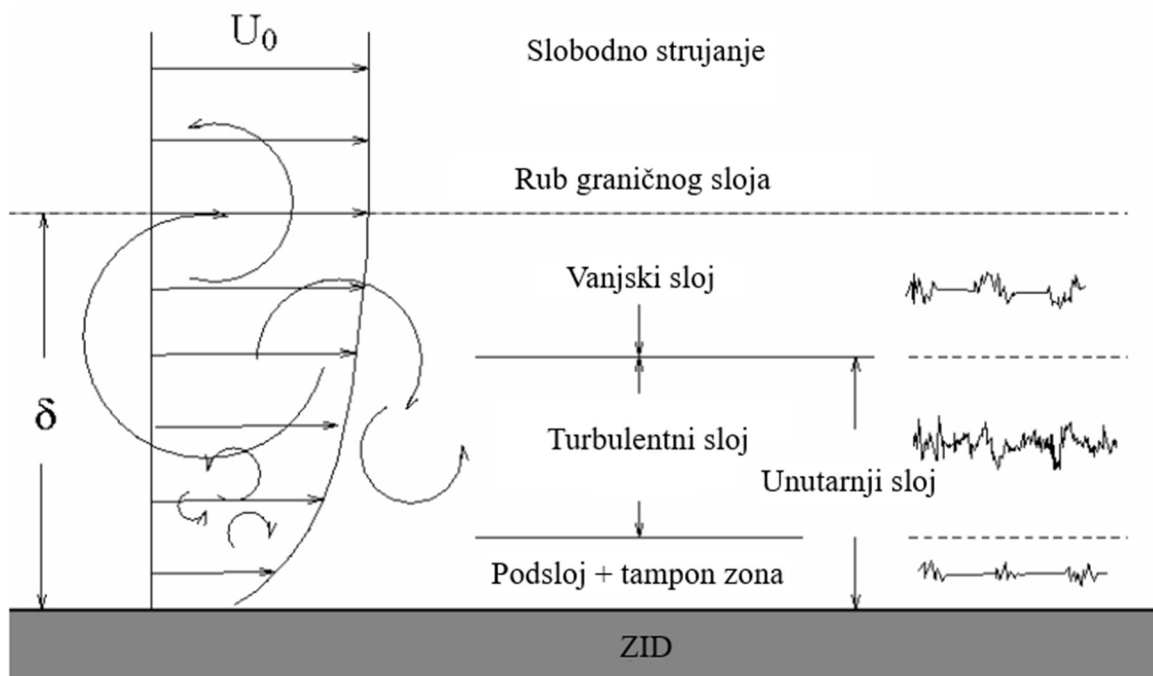
$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

gdje je:

$C_\mu$  konstanta.

### 3.1.2 Granični sloj

Granični sloj predstavlja zonu u blizini stijenke gdje su prisutne značajne viskozne sile. U ovom sloju profil brzina se brzo mijenja, a područje se može podijeliti na tri glavne regije: viskozni podsloj, prijelazni turbulentni sloj, i vanjski sloj, kako je prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2. Shema graničnog sloja [25]

Za procjenu visine prvog sloja ćelija mreže koristi se bezdimenzijska vrijednost  $y^+$ . Ovaj parametar omogućava određivanje položaja prvog sloja ćelija, odnosno je taj sloj smješten u viskoznom podsloju, tampon zoni ili turbulentnom sloju. Problem modeliranja u neposrednoj blizini zida varira u ovisnosti o turbulentnom modelu. Ukoliko je visina prve ćelije poznata (ili procijenjena), moguće je izračunati vrijednost  $y^+$  na temelju lokalne tangencijalne brzine fluida i svojstva fluida [26].

$$y^+ = \frac{u_\tau \cdot y}{\nu} \quad (3.7)$$

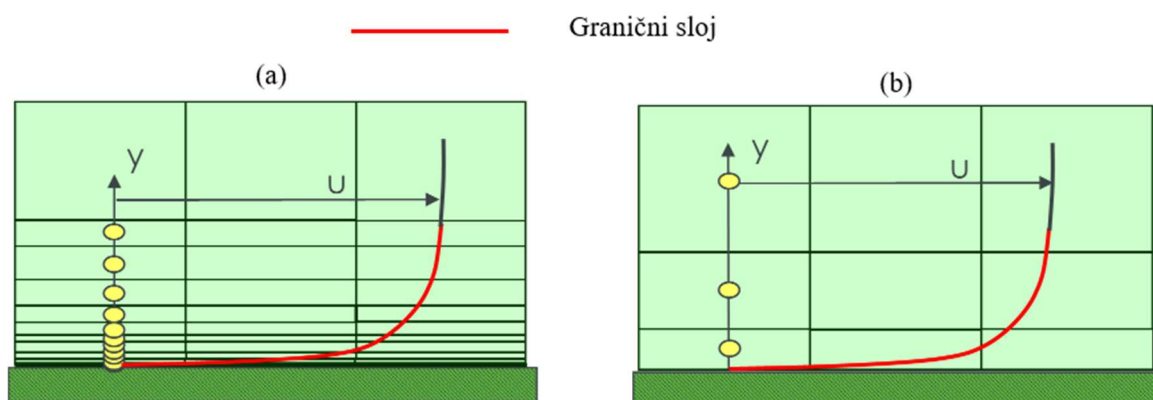
gdje je:

$u_\tau$  brzina trenja,

$y$  visina prve ćelije u smjeru normale na stijenku,

$\nu$  kinematički viskozitet.

Odabir turbulentnog modela diktira potrebnu vrijednost  $y^+$ . Ako je potrebno detaljno riješiti viskozni sloj, vrijednost  $y^+$  treba biti oko jedan, što zahtijeva vrlo malu visinu prvog sloja ćelija, te rezultira znatno većim brojem mrežnih elemenata i povećanim računalnim opterećenjem, što dovodi do dužeg vremena rješavanja. S druge strane, ako nije nužno potpuno riješiti viskozni sloj, već je dovoljno modelirati područje u blizini stijenke pomoću funkcije zida, tada je odgovarajuća vrijednost  $y^+$  u rasponu od  $30 \leq y^+ \leq 300$ . To će rezultirati manjim brojem mrežnih elemenata te manjom potrebom za računalnim resursima [25]. Na slici 3.3. prikazan je izgled ćelija u blizini stijenke, uspoređujući potpuno riješeni viskozni sloj s modeliranim viskoznom slojem.



Slika 3.3. Izgled mreže u blizini stijenke: (a) rješavanje viskoznog sloja i (b) modeliranje viskoznog sloja funkcijom zida [25]

## 3.2 Numeričke metode

Metoda konačnih volumena (FVM) jedna je od najsvestranijih tehnika diskretizacije korištenih u računalnoj mehanici fluida. Najprivlačniji aspekt ove metode leži u tome što rješenje zadovoljava jednadžbe očuvanja, ne samo za pojedini kontrolni volumen, već i za cijelu računsku domenu, bez



obzira na broj kontrolnih volumena. Čak i kod grubljih mreža, jednačbe očuvanja ostaju zadovoljene [27]. U temelju metode konačnih volumena nalazi se opća skalarna transportna jednačba koja opisuje različite fizikalne procese, a dana je izrazom (3.8):

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau} + \nabla \cdot (U\phi) - \nabla \cdot (D\nabla\phi) = S_\phi \quad (3.8)$$

gdje je:

$\phi$  transportirano skalarno svojstvo ,

$U$  propisana brzina,

$D$  koeficijent difuzije,

$\frac{\partial \phi}{\partial \tau}$  vremenski član,

$\nabla \cdot (U\phi)$  konvektivni član,

$\nabla \cdot (D\nabla\phi)$  difuzni član,

$S_\phi$  izvorni član.

Ovisno o prirodi procesa, neki članovi mogu biti zanemareni; na primjer, kod stacionarnog procesa vremenski član se može zanemariti.

Aproksimacija metode konačnih volumena uključuje zamjenu sustava diferencijalnih jednačbi s odgovarajućim sustavom linearnih algebarskih jednačbi koje se mogu riješiti pomoću računala. Generiranje sustava algebarskih jednačbi metodom konačnih volumena sastoji se od dva ključna koraka: diskretizacije domene i diskretizacije jednačbi. Kako bi se aproksimiralo rješenje matematičkog modela, prostor se diskretizira u konačni broj volumena. Kontinuirana domena  $\Omega$  aproksimira se kao unija konačnih volumena:

$$\Omega \approx \Omega_D = \cup_{c \in C} \Omega_c \quad (3.9)$$

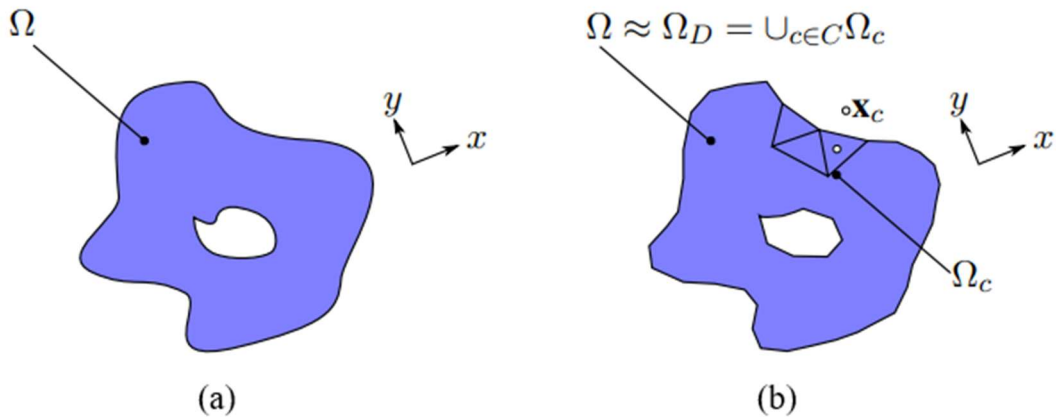
gdje je:

$\Omega_D$  unija konačnih volumena,

$C$  skup indeksa svih volumena,

$\Omega_c$  konačni volumen.

Kontinuirana polja, definirana za svaku točku unutar prostora ispunjenog fluidom, prikazana na slici 3.4. (a), aproksimiraju se nizom konačnih volumena , kao što je prikazano na slici 3.4. (b).



Slika 3.4. Domena fluida: (a) kontinuirana domena protoka i (b) diskretizirana domena protoka

Svaki konačni volumen pohranjuje volumno usrednjenu vrijednost promatrane fizikalne veličine, koja je pridružena težištu  $x_c$ . Vrijednost te fizikalne veličine u težištu volumena može se tada aproksimirati sljedećim izrazom:

$$\phi_c \approx \frac{1}{|\Omega_c|} \int_{\Omega_c} \phi_1(x_c) dV + O(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_c\|_2^2) \quad (3.10)$$

gdje je:

$\phi_c$  – Volumno usrednjena vrijednost promatranog skalarnog polja  $\phi$ ,

$\phi_1$  – Linearna aproksimacija skalarne veličine unutar kontrolnog volumena,

$x_c$  – Težište kontrolnog volumena.

Za dobivanje diskretiziranog modela, jednadžba (3.8) integrira se preko ćelije  $\Omega_c$ :

$$\int_{\Omega_c} \frac{\partial \phi}{\partial \tau} dV + \int_{\Omega_c} \nabla \cdot (U\phi) dV - \int_{\Omega_c} \nabla \cdot \Gamma \nabla \phi dV = \int_{\Omega_c} S(\phi) dV \quad (3.11)$$

Točnost rezultata numeričke simulacije mjeri se pomoću reziduala, koji kvantificiraju grešku u rješenju sustava jednadžbi. Rezidual predstavlja lokalnu neravnotežu varijabli unutar svakog kontrolnog volumena, pri čemu svaka ćelija u modelu ima svoju vlastitu vrijednost reziduala. Reziduali se zbrajaju i normaliziraju tako da svaka jednadžba bude predstavljena jednim brojem, a sve vrijednosti budu skalirane na zajednički raspon. U iterativnom numeričkom rješenju, rezidual nikada neće biti točno nula, no što je vrijednost reziduala niža, to je rješenje preciznije [28].

### 3.3 Gmsh

*Gmsh* je generator 3D mreže otvorenog tipa s ugrađenim CAD alatom i vizualizacijom, koji omogućava brzu, jednostavnu i intuitivnu izradu mreža. Izgrađen je na temelju četiri glavna modula: geometrija, mreža, rješavač i post-procesing, kojima se može upravljati putem grafičkog korisničkog sučelja, naredbenog retka, tekstualnih datoteka pisanih u *Gmsh* skriptnom jeziku ili putem programskih sučelja kao što su *C++*, *C*, *Python*, *Julia* i *Fortran*.

U ovom radu korišteni su moduli geometrije i mreže, pa je u nastavku dan kratak pregled njihovih ključnih funkcionalnosti.

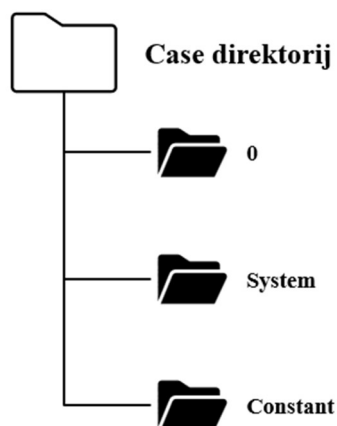
*Gmsh* definira modele koristeći granični prikaz (*BRep*), gdje su volumeni omeđeni površinama, površine krivuljama, a krivulje točkama. Modele je moguće kreirati na dva načina: odozdo prema gore, počevši od točaka pa sve do volumena, ili odozgo prema dolje, koristeći Booleove operacije. Entiteti i grupe entiteta, koji se nazivaju „*physical groups*“, označeni su jedinstvenim parovima oznaka.

Pri generiranju mreža konačnih elemenata, *Gmsh* koristi osnovne oblike poput linija, trokuta, četverokuta, tetraedara, prizmi, heksaedara i piramida. Generirane mreže su konformne, što znači da se elementi sijeku isključivo na površinama, bridovima ili čvorovima. Proces generiranja mreže odvija se odozdo prema gore, počevši od krivulja, preko površina, do volumena. Veličina elemenata može biti uniformna ili varijabilna, ovisno o zadanim postavkama. *Gmsh* podržava strukturirane i nestrukturirane algoritme za izradu mreža u 1D, 2D i 3D dimenzijama [29].

### 3.4 OpenFOAM

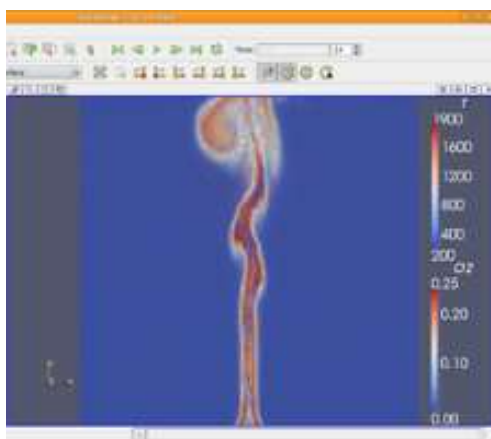
*Open Source Field Operation and Manipulation*, odnosno *OpenFOAM*, je softverski paket otvorenog tipa, tj. skup C++ biblioteka za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi, koji je primarno razvio OpenCFD LTD. S obzirom na široku bazu korisnika, *OpenFOAM* se koristi u različitim područjima inženjerstva i znanosti, kako u komercijalne, tako i u akademske svrhe. Osim primjene u rješavanju složenih strujanja, koristi se i za rješavanje kemijskih reakcija, proračune prijenosa topline, u akustici, mehanici čvrstog tijela i elektromagnetici. *OpenFOAM* je razvijen u programskom jeziku C++ i sadrži brojne različite rješavače. Ključan je pravilan odabir rješavača za određeni problem kako bi se osigurala preciznost rezultata [27].

Prilikom definiranja tipične simulacije strujanja fluida u *OpenFOAM*-u, potrebno je voditi računa o tri ključna direktorija: *0*, *constant* i *system*. Direktorij *0* sadrži informacije o početnim i rubnim uvjetima za simulaciju, dok direktorij *constant* sadrži podatke o svojstvima analiziranog fluida, informacije o numeričkoj mreži, te postavke vezane uz turbulentni model i višefazna svojstva, ako su primjenjiva. Direktorij *system* uključuje konfiguracijske datoteke koje upravljaju ključnim aspektima simulacije, poput vremenskih koraka, shema diskretizacije i postavki rješavača.



Slika 3.5. Shematski prikaz direktorija

*OpenFOAM* koristi metodu konačnih volumena (FVM) za rješavanje jednadžbi strujanja fluida unutar definirane domene. Ova metoda omogućuje točnu i stabilnu numeričku analizu kompleksnih problema strujanja. Za vizualizaciju i analizu rezultata simulacija, *OpenFOAM* je integriran s *ParaView*-om, alatom otvorenog tipa za vizualizaciju. *ParaView* pruža jednostavan i intuitivan prikaz rezultata, omogućujući analizu parametara poput tlaka, brzine i temperature.



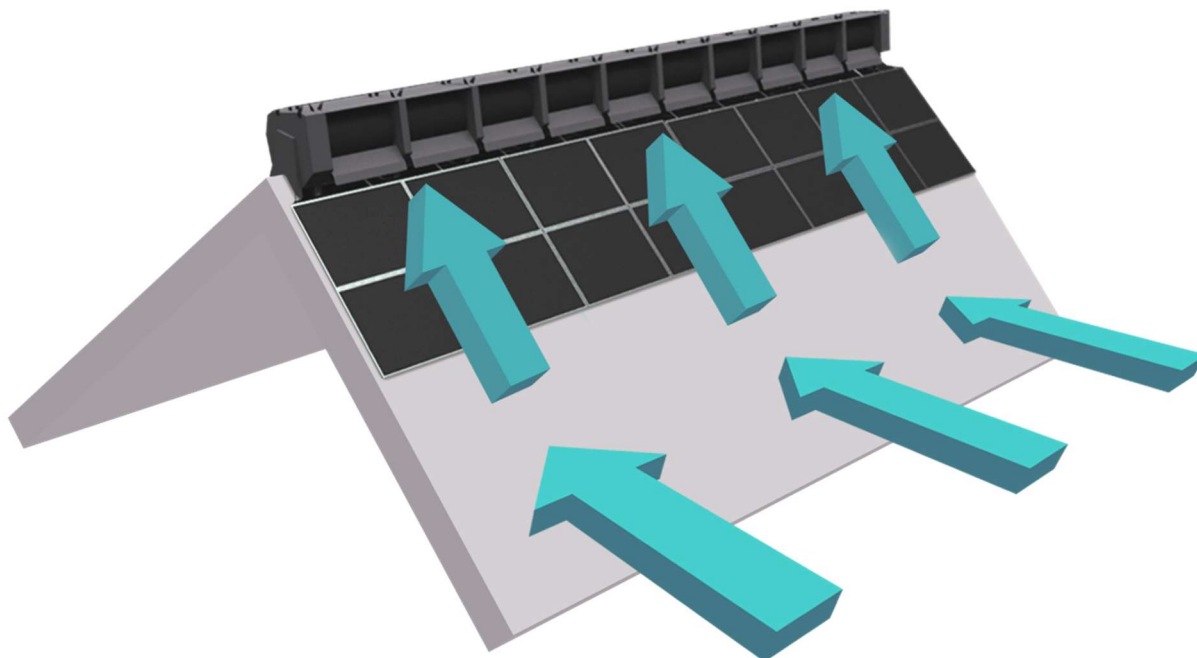
Slika 3.6. Prikaz rezultata simulacije proveden u *OpenFOAM*-u pomoću *Paraview* [30]

## 4 PARAMETRIZACIJA

Kako bi se testirao dizajn kućišta i lopatica *crossflow* turbine, ključno je primijeniti fleksibilan pristup u izradi geometrije. Takva fleksibilnost u generiranju geometrije ključna je za mnoge procese, jer omogućuje brze prilagodbe dizajna s ciljem utvrđivanja radnih uvjeta turbine. U tu svrhu korišten je Python 3.12.4 za parametrizaciju i izračun ključnih točaka na turbini i kućištu, omogućujući dinamično prilagođavanje geometrijskih značajki tijekom cijelog procesa. U nastavku je detaljno opisan postupak parametrizacije, generiranja mreže i pokretanja simulacije.

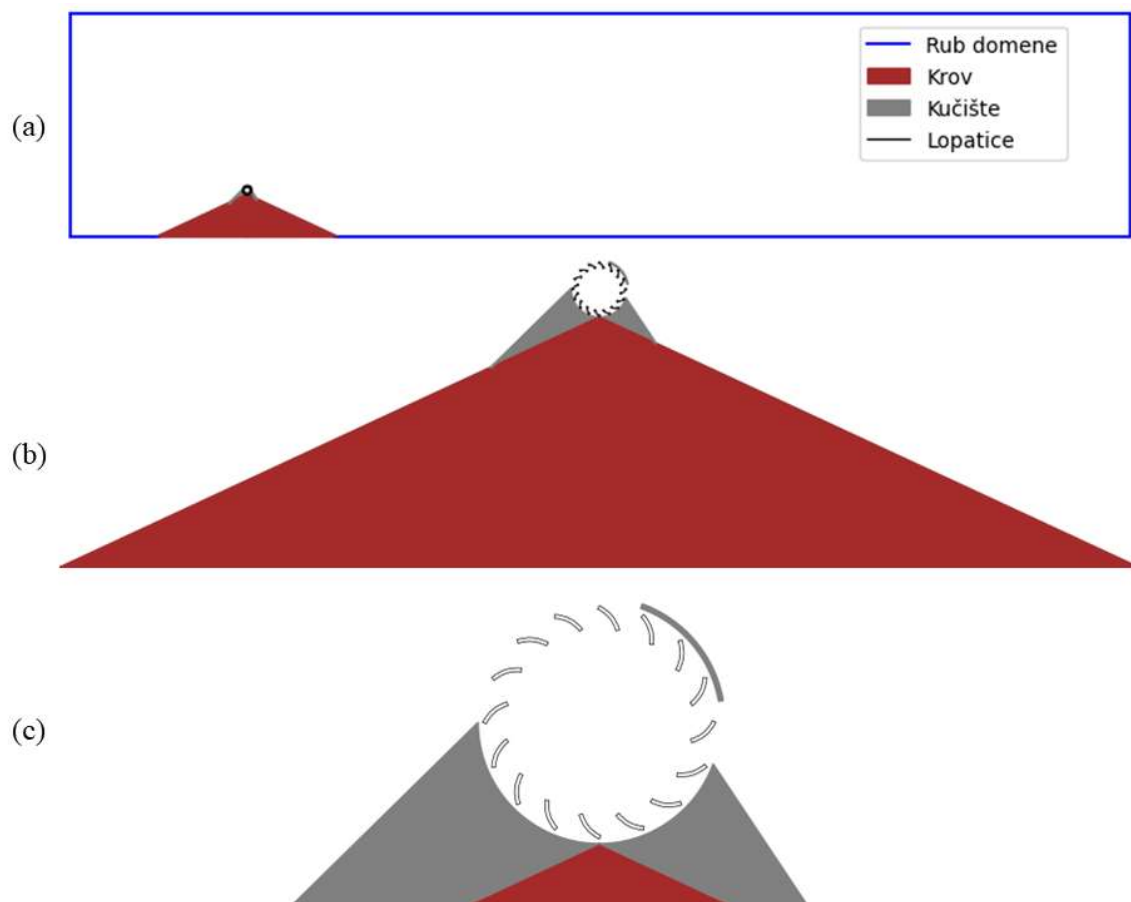
### 4.1 Geometrija modela

Geometrija analiziranog modela izrađena je pomoću *Gmsh*-a 4.13. U ovom radu promatran je kosi krov privatne kuće na čijem je grebenu montirana *crossflow* turbina. Slika 4.1. prikazuje osnovni problem: *crossflow* turbina postavljena na greben krova koja iskorištava prirodno ubrzanje vjeta prilikom strujanja preko kosog krova.



Slika 4.1. *Crossflow* turbina postavljena na greben krova [17]

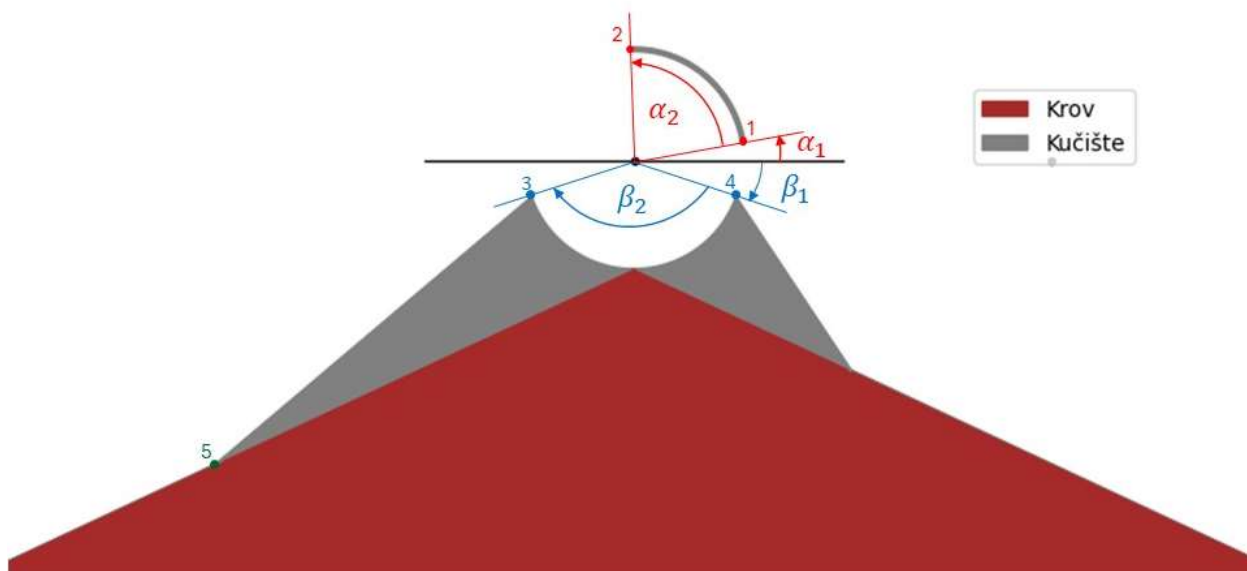
Na slici 4.2. prikazana je domena korištena u simulaciji, pri čemu slika 4.2. (a) prikazuje cijelu domenu, a slika 4.2. (b) prikazuje detaljan pogled na krov te slika 4.2. (c) prikazuje uvećani pogled turbine i kućišta. Analizirana turbina postavljena je horizontalno na greben krova. Raspon krova je 10 metara, s nagibom od  $25^\circ$ . Plavom linijom označen je rub domene, dok je sivom bojom prikazano kućište turbine, crvenom bojom krov a crnom lopatice. Lopatice turbine oblikovane su pomoću dva koncentrična luka, pri čemu svaki sadrži unutarnji i vanjski luk koji dijele zajedničko središte, ali imaju različite radijuse. Nebojjeni dio slike predstavlja samu domenu, odnosno prostor u kojem se simulira strujanje zraka oko krova i turbine.



*Slika 4.2. Prikaz geometrije promatranog problema: (a) prikaz cijele računске domene, (b) uvećani prikaz krova i (c) uvećani prikaz turbine i kućišta*

## 4.2 Parametrizacija kućišta

Za parametrizaciju kućišta korišteno je pet ključnih točaka prikazanih na slici 4.3.



Slika 4.3. Parametrizacija kućišta

Parametrizacija ulaznog i izlaznog otvora kućišta izvedena je pomoću četiri parametra:  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ . Koordinate referentnih točaka određene su primjenom transformacije između kartezijevih i polarnih koordinata. S obzirom na to da se promjer kućišta ne mijenja, točke su u potpunosti definirane polumjerom kućišta i pripadajućim kutovima. Kartezijeve koordinate, temeljem ovih parametara, izračunate su prema izrazima (4.1) i (4.2):

$$x = r_k \cdot \cos(\theta) \quad (4.1)$$

$$y = r_k \cdot \sin(\theta) \quad (4.2)$$

gdje su:

$r_k$  promjer kućišta,

$\theta$  kut otklona.

Kutovi  $\alpha_2$  i  $\beta_2$  definirani su kao pomaci od kutova  $\alpha_1$  i  $\beta_1$  kako bi se osigurala dosljednost prilikom generiranja geometrije i omogućilo pravilno kreiranje lukova kućišta. Nagib privodećeg lima

definiran je pomoću točke 5, koja je označena zelenom bojom na slici 3.1. Apscisa te točke dana je izrazom (4.3):

$$x_5 = x_3 + x_i \quad (4.3)$$

gdje je:

$x_5$  apscisa točke 5,

$x_3$  apscisa točke 3,

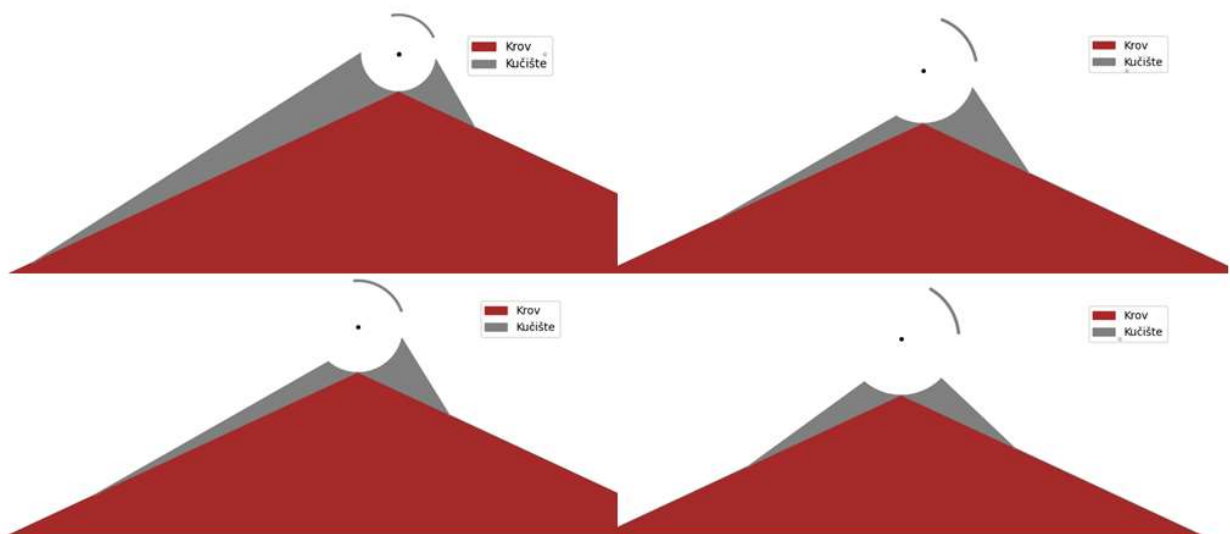
$x_i$  optimizacijska vrijednost.

Slično kao i kod kutova, apscisa točke 5 definirana je kao pomak u odnosu na apscisu točke 3, čime se osigurava dosljednost geometrije kućišta. Ordinata točke 5 izračunava se na temelju jednadžbe pravca krova, s obzirom na to da je riječ o nepomičnoj liniji. Izraz za ordinatu točke 5 glasi:

$$y_5 = [\tan(25) \cdot (x_3 + x)] - r_k \quad (4.4)$$

Ova parametrizacija omogućuje fleksibilno prilagođavanje duljine lima, pri čemu se osigurava da točka 5 uvijek leži na pravcu krova, čime se garantira da simulacija rezultira realnim dizajnom.

Slika 4.4. prikazuje različite izvedbe kućišta turbine i privodećeg lima, čime se ističe fleksibilnost implementirane parametrizacije.

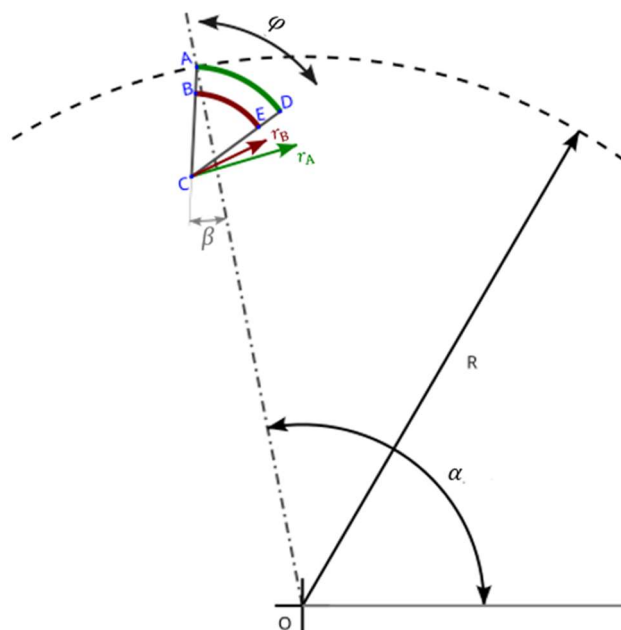


Slika 4.4. Razne izvedbe kućišta i privodećeg lima



### 4.3 Parametrizacija lopatica turbine

Lopaticice turbine sastoji se od dva koncentrična kružna luka i dvije radijalne linije koje ih spajaju tvoreći zatvorenu kontru lopaticice. Na slici 4.5. prikazana je lopaticica sa svim parametrima koji određuju njen oblik i položaj.



Slika 4.5. Parametri lopaticice turbine

Točke A, B, D i E označavaju krajnje točke lopaticice, dok točka C predstavlja središte koncentričnih kružnih lukova koji oblikuju lopaticicu. Radijus R predstavlja radijus rotora, radijus  $r_A$  označava vanjski radijus kružnog luka lopaticice, dok je radijus  $r_B$  koji predstavlja radijus unutarnjeg luka lopaticice, definiran kao:

$$r_B = r_A - s \quad (4.5)$$

gdje je:

$s$  debljina lopaticice.

Kut  $\alpha$  određuje orijentaciju lopaticice u odnosu na horizontalni pravac koji prolazi kroz ishodište rotora, pri čemu se promjenom ovog kuta mijenja položaj rotora. Kut  $\beta$  predstavlja relativni kut između radijalne linije rotora OA i početka lopaticice odnosno linije AC.

Kut  $\varphi$  predstavlja ukupni kutni raspon lopatice izražen u radijanima, definirajući duljinu luka lopatice u odnosu na središte kružnog luka. Kut  $\varphi$  definiran je kao:

$$\varphi = \frac{L}{r_A} \quad (4.6)$$

gdje je:

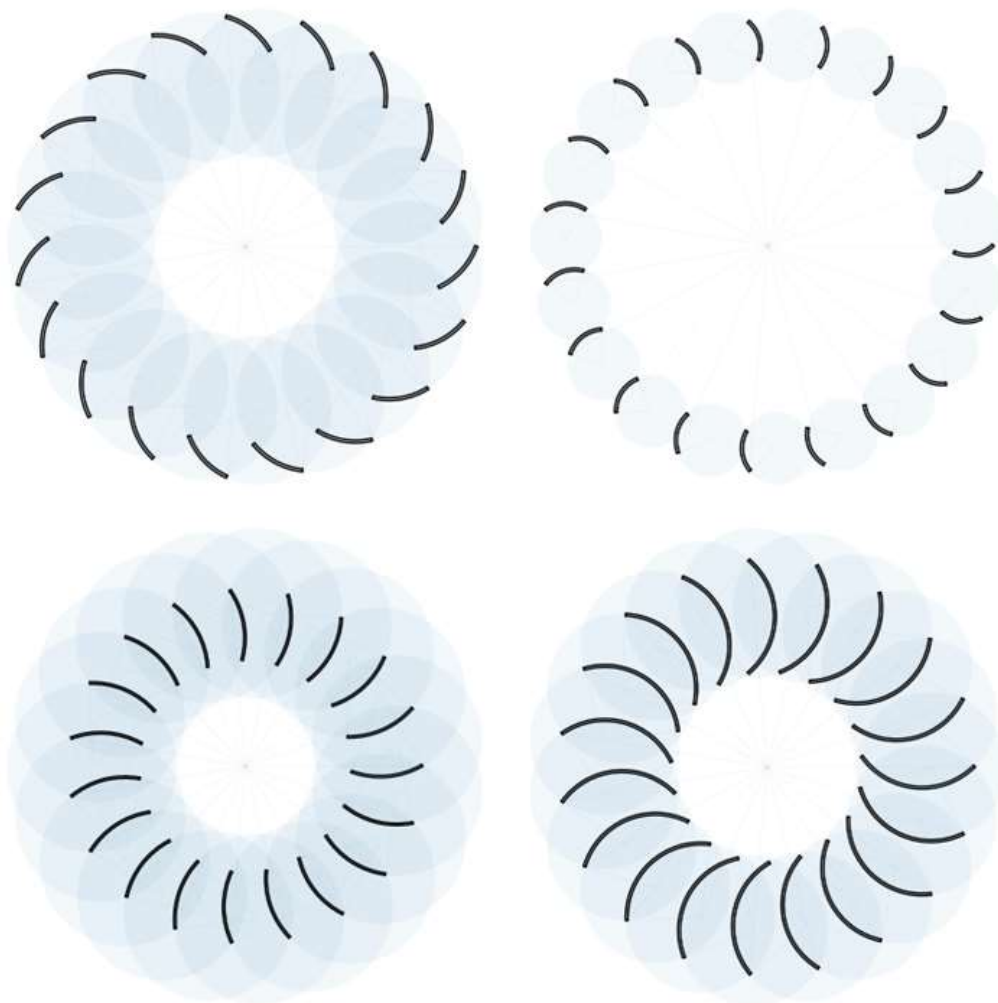
$L$  duljina vanjskog kružnog luka lopatice.

Duljina kružnog luka  $L$  mora zadovoljiti uvjet:

$$L < 2\pi \cdot r_A \quad (4.7)$$

To znači da kružni luk lopatice ne može premašiti opseg kruga definiranog radijusom  $r_A$ .

Na slici 4.6. prikazane su različite izvedbe lopatica turbine, što naglašava fleksibilnost implementirane parametrizacije geometrije lopatica.



Slika 4.6. Razne izvedbe lopatica turbine

#### 4.4 Postavke numeričke mreže

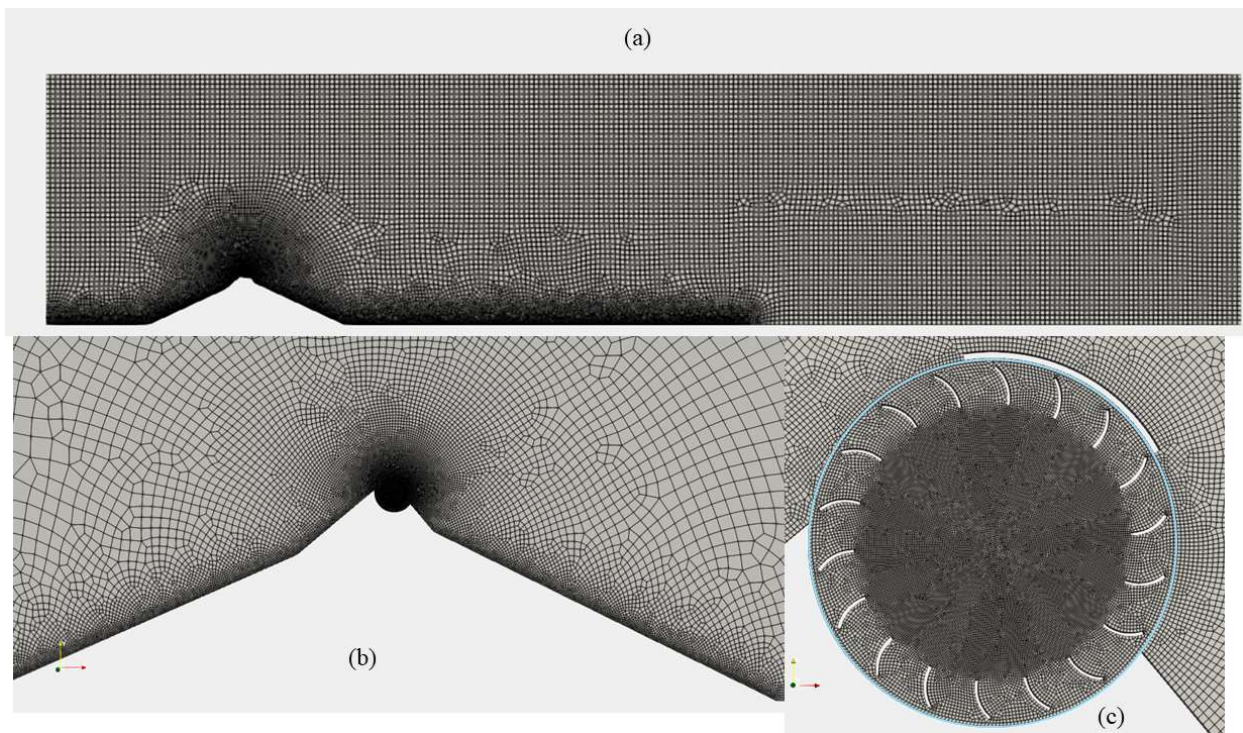
S obzirom na to da *crossflow* turbina ima jednolik poprečni presjek duž cijele duljine, za analizu je korišteno 2D pojednostavljenje. U *OpenFOAM*-u, 2D model odgovara 3D modelu konstantne dubine s jednim slojem ćelija u smjeru treće osi. Dubina je jednaka jediničnoj duljini. Dimenzije domene iznose 60 x 12,6 m, s turbinom smještenom u središtu. Središte domene od *inlet*-a i gornjeg ruba domene udaljeno je 10m. Za mrežu su korištene zasebno kreirane statorska i rotorska mreža, pri čemu je za obje upotrijebljena nestrukturirana kvadratna mreža.

Maksimalna veličina elemenata, što se odnosi na regije najudaljenije od turbine, u statorskoj mreži postavljena je na 0,5 m. U kritičnim zonama, kao što su područja pet metara prije krova, na samom krovu te 25 metara iza krova, veličina elemenata je postavljena na 0,015 m uz postepeni prijelaz na 0,25 m unutar dva metra. Analogno, oko promjera kućišta, veličina mreže postavljena je na 0,005 m, s postepenim povećanjem do 0,25 m unutar pet metara od kućišta. U ovom području, gdje je gibanje zraka složeno, manji elementi mreže omogućuju detaljnije opisivanje strujanja. Duljina statorske domene od 60 metara odabrana je kako bi se izbjegao utjecaj domene na rezultate simulacije, pa se ovom duljinom omogućuje strujanju da se u potpunosti razvije, čime se minimizira utjecaj dimenzija domene na konačne rezultate.

Maksimalna veličina elemenata u rotorskoj mreži postavljena je na 0,005 m kako bi se osigurala uniformnost veličine elemenata na prijelazu između statorske i rotorske mreže. Nakon stvaranja, mreže su spojene pomoću odgovarajućih rubnih uvjeta.

Prosječni broj elemenata u mreži iznosi oko 60.000 ćelija. Mreža je relativno gruba, te modelirana u skladu s preduvjetima za korištenje  $k-\varepsilon$  turbulentnog modela. Naime, strujanje u blizini stjenke nije izravno riješeno, već se koristi funkcija zida za modeliranje strujanja u tom području. Prosječna vrijednost  $y^+$  u blizini stijenke rotora je oko 30, dok je u ostatku domene u rasponu  $100 \leq y^+ \leq 300$ .

Na slici 4.7. prikazana je numerička mreža nakon spajanja statorskog i rotorskog djela, plava kružnica označava mjesto gdje se rotorska i statorska mreža spajaju.



Slika 4.7. Numerička mreža: (a) prikaz cijele domene, (b) uvećani prikaz mreže na području krova, (c) detaljni prikaz mreže u području rotora

#### 4.5 Rubni uvjeti i postavke simulacije

Na slici 4.8. prikazane su definirane vrste rubnih ploha (eng. *boundary patches*). Plohe koje nisu povezane s posebnim geometrijskim ograničenjima su *patch* i *wall*. Rubna ploha vrste *patch* dodjeljuje se otvorenim granicama domene, kao što su *inlet* i *outlet*. Na plohu *inlet* primijenjen je *Dirichletov* rubni uvjet *fixedValue* s konstantnom i uniformnom brzinom strujanja od 10 m/s duž cijele plohe. Na plohu *outlet* primijenjen je *Neumannov* rubni uvjet *pressureInletOutletVelocity*, što znači da se brzina na toj plohi procjenjuje na temelju brzina unutar domene.

Rubne plohe definirane kao *wall* predstavljaju čvrsti zid. Oznaka *wall* važna je za primjenu funkcija zida kod upotrebe turbulentnih modela. Na sve plohe definirane kao *wall* postavljen je *Dirichletov* rubni uvjet *noSlip*, što znači da je brzina strujanja fluida na stijenci jednaka nuli. Kod lopatica, pri provođenju stacionarne simulacije korišten je *noSlip* uvjet, a kod nestacionarne *movingWallVelocity*, koji uzima u obzir fizičko gibanje rotora i korigira brzinu uza zid. Na rubovima domene gdje nema zidova, plohe su definirane kao *symmetry*, na tako definirane plohe nije moguće primijeniti dodatne rubne uvjete.

Na spoju između rotorskog i statorskog dijela mreže primijenjen je rubni uvjet *cyclicAMI*, koji stvara numeričku vezu između dviju mreža koje su fizički nepovezane. Rubni uvjet *cyclicAMI* omogućava spajanje dviju mreža koje na spoju nemaju istu veličinu ni topologiju.

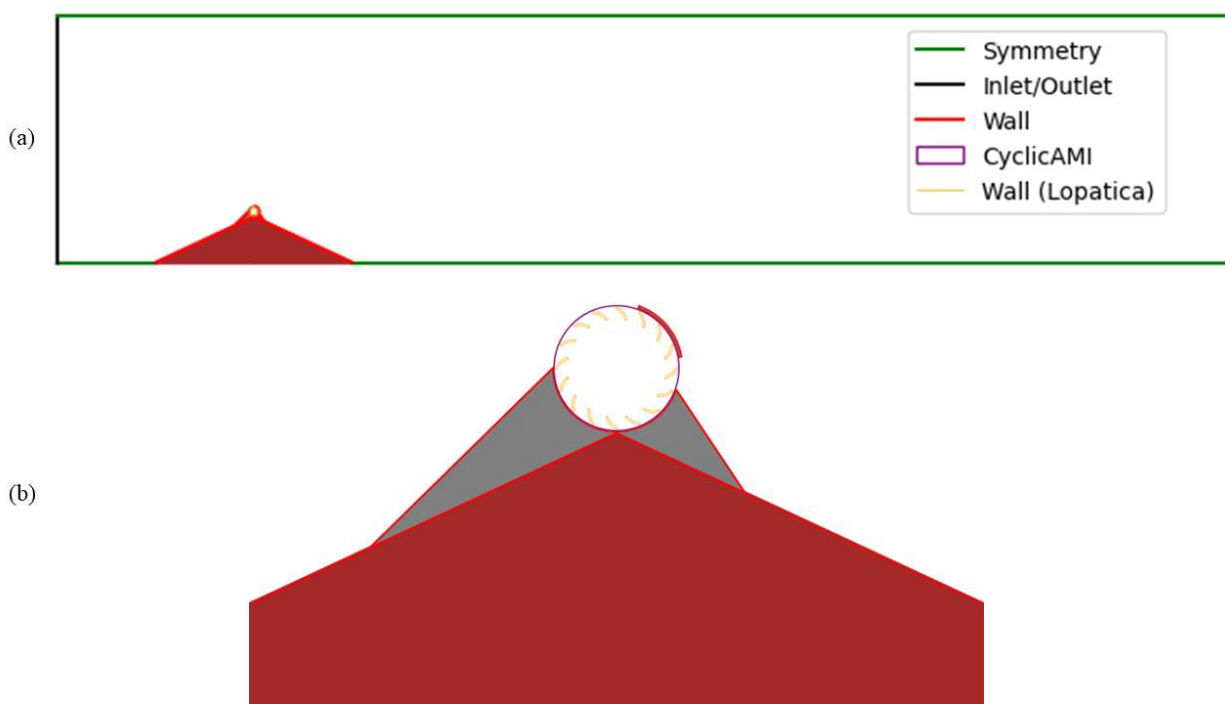
Tlak na *outlet*-u definiran je korištenjem *Dirichletovog* rubnog uvjeta s jednakim tlakom duž cijele plohe. Na svim ostalim plohama definiran je *Neumannov* rubni uvjet, što znači da se tlak na tim plohama određuje na temelju vrijednosti tlaka unutar domene.

Za  $k$  je primijenjena funkcija zida *kqRWallFunction*, za  $\epsilon$  funkcija *epsilonWallFunction*, dok je za  $\nu_t$  korištena funkcija *nutUSpaldingWallFunction*.

Korišten je  $k$ - $\epsilon$  turbulentni model, pri čemu su turbulentne vrijednosti za zidove definirane pomoću funkcija zida, dok se vrijednosti na *inlet*-u i *outlet*-u procjenjuju na temelju uvjeta unutar domene.

S obzirom na to da *OpenFOAM* radi isključivo s trodimenzionalnim mrežama, a riječ je o dvodimenzionalnoj simulaciji, na sve ćelije „u ravnini“ primjenjuje se tip rubnog uvjeta *empty*. Ovakva definicija pretvara trodimenzionalnu mrežu u dvodimenzionalnu, omogućujući pravilno izvođenje simulacije u dvodimenzionalnom prostoru.

Na slici 4.8. dan je prikaz primijenjenih vrsta ploha na rubne površine.



Slika 4.8. Postavljeni rubni uvjeti: (a) na području domene i (b) uvećani prikaz primijenjenih rubnih uvjeta kućišta i turbine

Za ovako definiranu mrežu s odgovarajućim rubnim uvjetima moguće je provesti stacionarnu i nestacionarnu simulaciju strujanja.

Kod nestacionarnih simulacija, dinamiku gibanja rotacijskog dijela (rotora) moguće je simulirati direktno - fizičkim zakretanjem numeričke mreže. Rotacijom mreže dolazi do promjene topologije te je potrebno topološki interpolirati rješenja između dviju susjednih zona kroz mrežno sučelje AMI (*Arbitrary Mesh Interface*). Ovaj pristup se naziva konceptom dinamičkih mreža.

Kao alternativu dinamičkim mrežama, u stacionarnoj simulaciji moguće je koristiti MRF (*Multiple Reference Frame*) pristup. Kod ovog pristupa, osnovne jednačbe mijenjaju se ovisno o referentnom okviru, što omogućuje simulaciju više domena koje mogu biti stacionarne ili u pokretu. Povezivanje između ovih regija osigurava se putem mrežnog sučelja (premda to nije uvjet). Iako ta površina nema fizičko značenje, služi u numeričke svrhe, omogućujući razmjenu podataka između različitih skupova jednačbi za te regije. Definiranjem poddomene s rotirajućim referentnim okvirom, koji je učvršćen u određenom položaju, nestacionarni problem može se preformulirati kao stacionarni, pri čemu se osnovne jednačbe u svakoj poddomeni izračunavaju različito.

Za rješavanje stacionarne simulacije koristi se *simpleFoam*, stacionarni rješavač za nestlačivo turbulentno strujanje, koji se temelji na SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations, Patankar i Spalding) algoritmu. *simpleFoam* koristi strategiju segregiranog rješenja, što znači da se jednačbe za svaku varijablu sustava (brzina, tlak i varijable koje opisuju turbulenciju) rješavaju uzastopno, pri čemu se rješenje jedne jednačbe koristi kao ulaz za rješavanje iduće, omogućujući postupno približavanje konačnom rješenju cijelog sustava.

Za rješavanje nestacionarne simulacije koristi se *pimpleFoam*, rješavač za prijelazne simulacije nestlačivih fluida. Ovaj rješavač koristi PIMPLE algoritam, koji kombinira prednosti PISO i SIMPLE metoda, osiguravajući robusnost u rukovanju prijelaznim protokom, čak i s većim vremenskim koracima.

Za provođenje optimizacije odabran je MRF pristup u kombinaciji sa stacionarnim rješavačem *simpleFoam*, jer rješavanje nestacionarnih problema zahtijeva značajne računalne resurse, a optimizacija već koristi velik dio tih resursa. MRF pristup pruža dovoljno dobru aproksimaciju rotacije za potrebe optimizacije, jer dobivanje vremenski promjenjivog polja protoka ne bi značajno utjecalo na rezultate optimizacije. Ovim pristupom postignut je balans između računalnih zahtjeva i preciznosti simulacije.

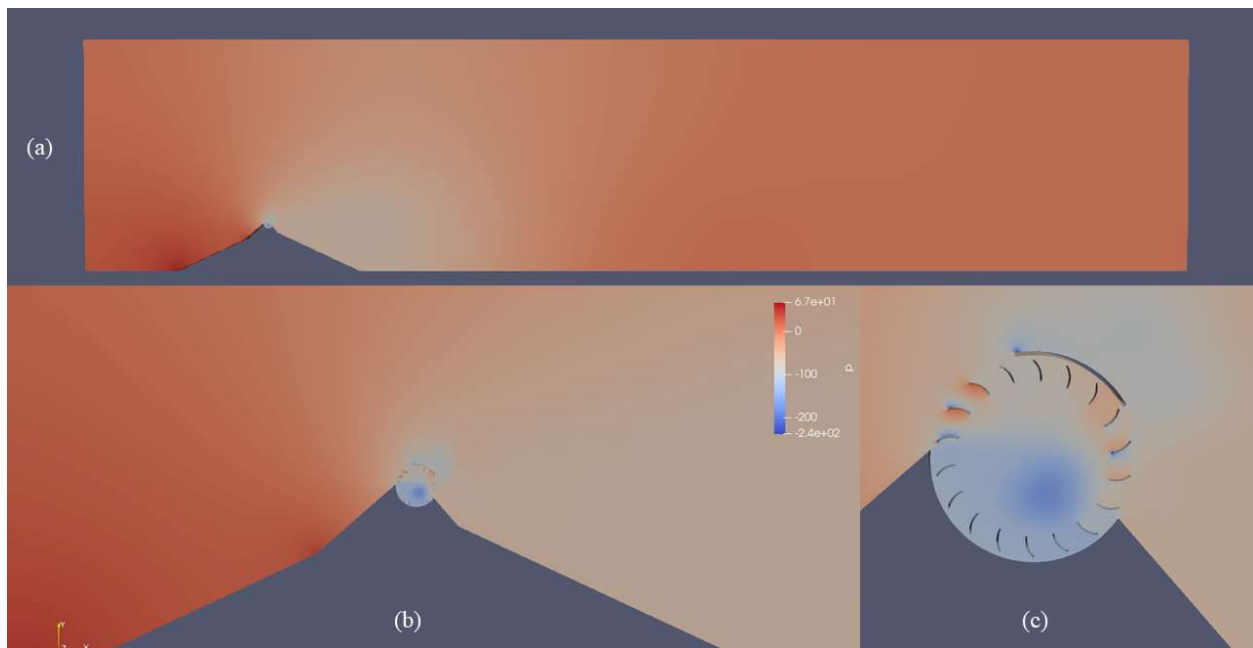
## 4.6 Početna simulacija

U prethodnim poglavljima opisana je faza *preprocessing*-a, nakon koje slijedi faza izračuna odnosno pokretanja simulacije. Opisani tok rada ima širu primjenu od optimizacije. Primjerice, može se primijeniti za analizu osjetljivosti, omogućujući ocjenu utjecaja promjena pojedinih parametara na ukupnu snagu turbine. U nastavku su prikazani rezultati simulacije provedene pomoću *OpenFOAM-a* v2312 i opisanog postupka, s proizvoljno odabranim vrijednostima svih parametara. U tablici 4.1. dani su ulazni parametri za provedenu simulaciju.

Tablica 4.1. Ulazni parametri simulacije

Varijabla	Oznaka	Vrijednost
Promjer rotora	$R$	0.25 m
Broj lopatica rotora	$n$	18
Debljina lopatica	$S$	0.005 m
Početni kut gornjeg dijela kućišta	$\alpha_1$	30°
Kutna širina gornjeg dijela kućišta	$\alpha_2$	70°
Početni kut donjeg dijela kućišta	$\beta_1$	-35°
Kutna širina donjeg dijela kućišta	$\beta_2$	-150°
Polumjer zakrivljenosti lopatice	$r_A$	0.06 m
Relativni kut lopatice i radijalne linije	$\beta_{lopatice}$	40°
Ukupni kutni raspon lopatice	$\rho$	60°
Duljina privodećeg lima	$X_5$	-1 m

Na slici 4.9. prikazane su konture tlakova u posljednjem vremenskom koraku simulacije, prikazane na cijeloj domeni, uz dodatni uvećani prikaz ključnih područja.

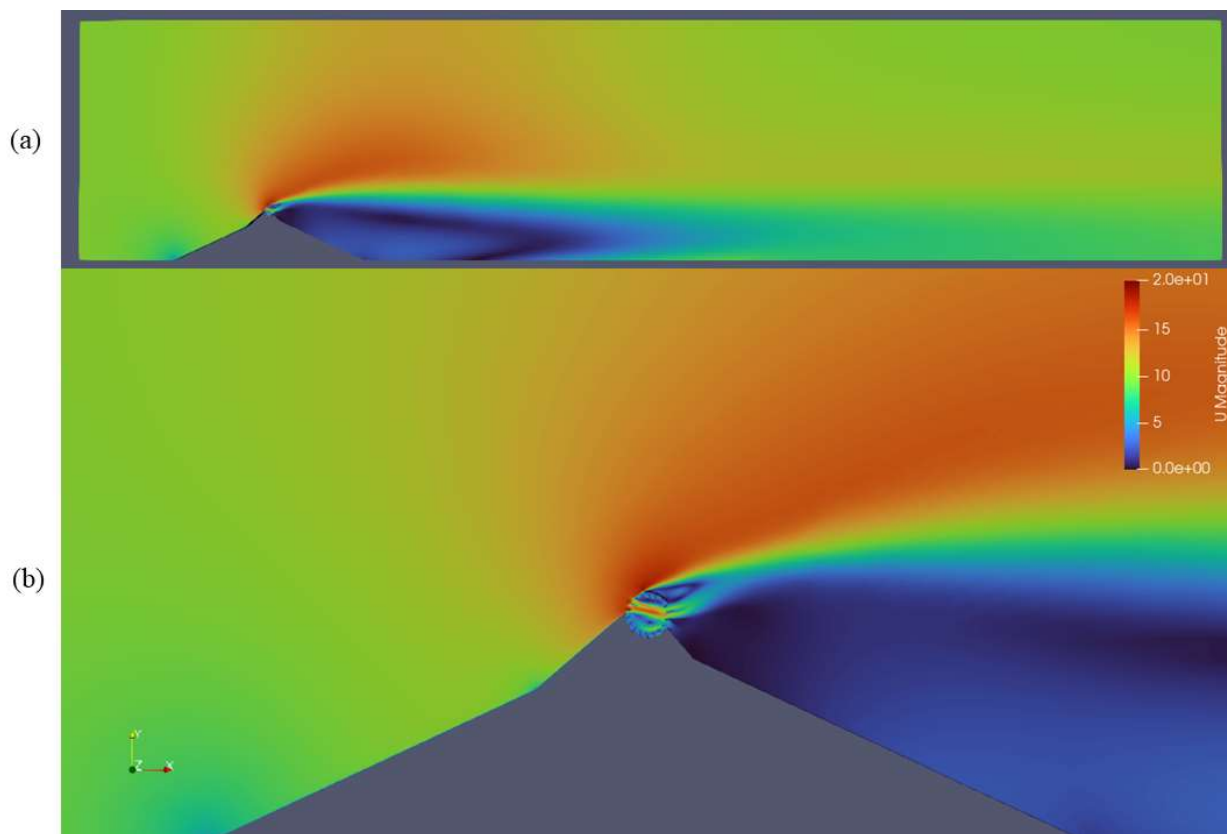


*Slika 4.9. Konture tlaka: (a) u cijeloj domeni, (b) uvećani prikaz područja oko krova i (c) uvećani prikaz područja turbine*

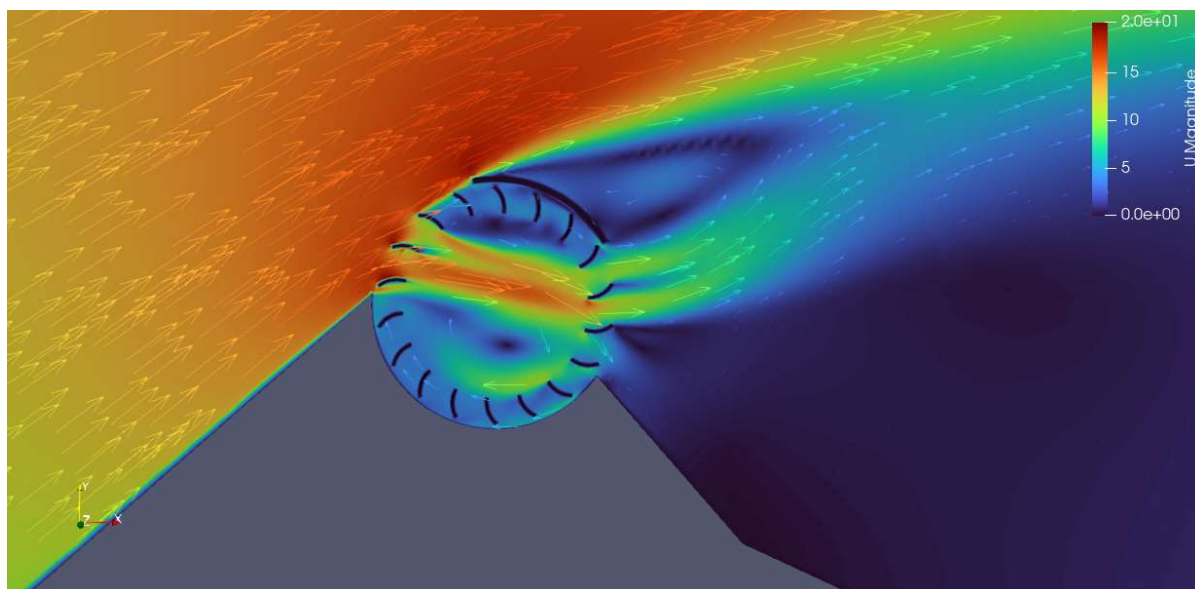
Na temelju slike 4.9. može se zaključiti da simulacija pokazuje očekivano ponašanje. Raspodjela tlaka odgovara postavkama simulacije, pri čemu se na lijevoj strani krova pojavljuje područje povišenog tlaka, gdje zrak nalijeće na krov i turbinu, dok se na desnoj strani krova formira područje niskog tlaka. Raspodjela tlaka unutar turbine također slijedi očekivane obrasce. Više vrijednosti tlaka na ulazu u turbinu i niže vrijednosti na izlazu usklađene su sa smjerom strujanja, što potvrđuje realističnu interakciju između strujanja zraka i rotacije turbine.

Na slici 4.10. prikazane su konture brzina za cijelu domenu, uz dodatni uvećani prikaz određenih područja za bolju vidljivost detalja. Na slici 4.11. prikazan je detaljni prikaz kontura brzina u području turbine, uključujući i vektore brzina, čime se omogućuje preciznija prikaz strujanja u ovoj kritičnoj zoni.





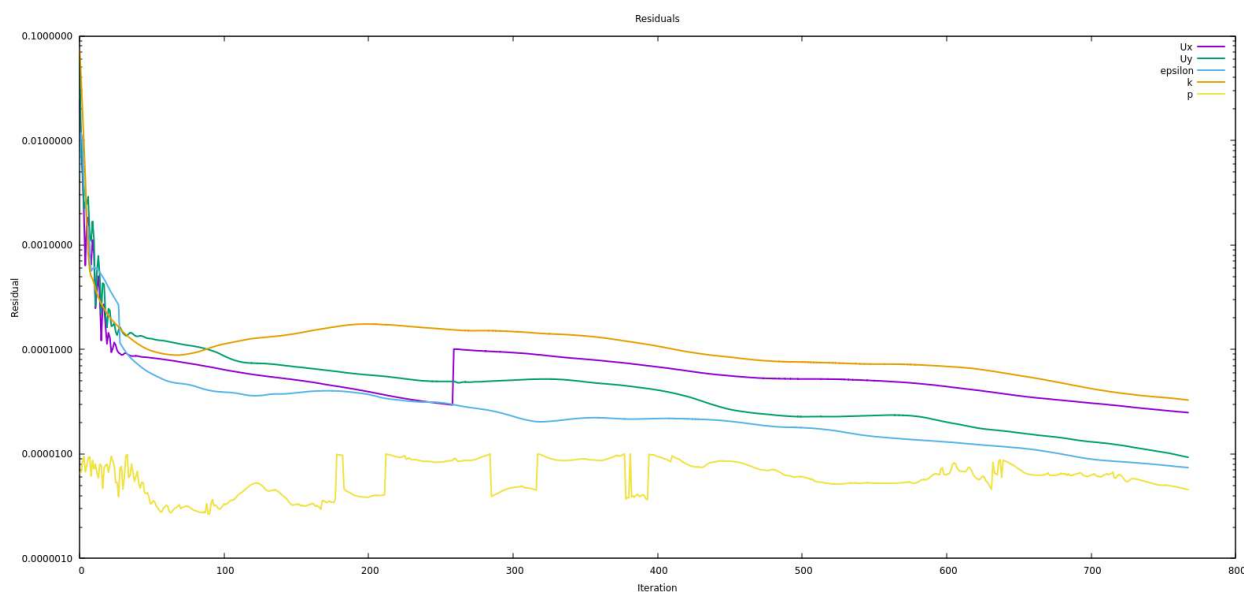
Slika 4.10. Konture brzina: (a) za cijelu domenu i (b) uvećani prikaz u području krova



Slika 4.11. Uvećani prikaz kontura brzina u području turbine uključujući vektore brzina

Slike 4.10. i 4.11. potvrđuju prethodno donesene zaključke na temelju raspodjele tlaka unutar domene, pri čemu se obrasci brzina poklapaju s očekivanim rezultatima. Nadalje, pomoću vektora brzine jasno je vidljivo da je rotacija unutar turbine vjerno simulirana korištenjem MRF pristupa, što dodatno potvrđuje točnost simulacije.

Simulacija je uspješno konvergirala nakon 768 iteracija, pri čemu je ukupno vrijeme izvođenja iznosilo 273 sekunde, koristeći 4 jezgre paralelno. Reziduali pokazuju stabilnu konvergenciju, što je prikazano na slici 4.12.



Slika 4.12. Reziduali za provedenu stacionarnu simulaciju

Dobiveni moment oko osi rotacije (os Z) za simulirani slučaj iznosi:

$$M_z = 5.97755 \text{ N/m}$$

Usvojen omjer obodne brzine lopatica i normalizirane brzine nadolazećeg vjetra iznosi:

$$\lambda = 0.45$$

Na temelju izraza (2.5), uz poznatu normaliziranu brzinu nadolazećeg vjetra i promjera rotora, moguće je izračunati obodnu brzinu lopatica:

$$\omega = \frac{u_\infty \cdot \lambda}{R} = \frac{10 \cdot 0.45}{0.25} = 18 \text{ rad/s} \quad (4.8)$$

Sada je moguće odrediti snagu turbine prema izrazu (2.7):

$$P_T = M_z \cdot \omega = 5.97755 \cdot 18 = 107.5959 \text{ W} \quad (4.9)$$

Površina na koju vjetar nasmujava jednaka je:

$$A = d_T \cdot L \quad (4.10)$$

gdje je:

$d_T$  promjer rotora turbine,

$L$  duljina rotora.

Budući da je kreirana mreža dubine 1 metar, duljina rotora iznosi upravo 1 metar. Kada se izraz (4.10) uvrsti u izraz (2.3), dobije se snaga vjetra:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 10^3 = 306.25 \text{ W} \quad (4.11)$$

Konačno, moguće je izračunati koeficijent snage turbine prema izrazu (2.5):

$$C_p = \frac{107.5959}{306.25} = 0.35133 \quad (4.12)$$

## 5 OPTIMIZACIJA

U ovom poglavlju dan je opis optimizacijskog problema te pripadajućih parametara i varijabli. Također je predstavljena kratka teoretska pozadina optimizacijskih metoda, kao i implementiranog optimizacijskog toka rada.

### 5.1 Formulacija optimizacijskog problema

Za formulaciju optimizacijskog problema potrebno je definirati tri ključne komponente:

- Optimizacijske varijable
- Ciljeve optimizacije
- Ograničenja

Optimizacijske varijable predstavljaju vrijednosti koje se mogu mijenjati unutar prostora pretraživanja s ciljem postizanja optimuma (minimuma funkcije). Ako postoji više optimizacijskih varijabli, one se prikazuju kao vektor čija dimenzija odgovara broju varijabli. N-dimenzionalni optimizacijski vektor zapisan je izrazom (5.1):

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in \chi \quad (5.1)$$

gdje su:

$\mathbf{x}$  optimizacijski vektor,

$\chi$  prostor pretraživanja.

Varijable u optimizacijskom vektoru mogu biti realne, cjelobrojne, kategorijske ili mješavina navedenih tipova varijabli. Svako ograničenje limitira skup mogućih rješenja, a sva ograničenja zajedno definiraju prostor rješenja. Moguća rješenja su samo ona koja ne krše nijedno ograničenje.

Ciljevi su funkcije optimizacijskog vektora koje je potrebno minimizirati ili maksimizirati. A priori cilj je minimizacijski i općenito se može zapisati kao:

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \chi \quad (5.2)$$

Ukoliko rješavamo maksimizacijski problem, potrebno je napraviti transformaciju izraza:

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{x}} -f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \mathcal{X} \quad (5.3)$$

Novi oblik optimizacijskog problema isti je kao i prethodni u smislu prostora pretraživanja, ali će za rezultat imati maksimizaciju funkcije  $f$  [31].

## 5.2 Parametri, varijable i ciljevi

U tablici 5.1. dan je pregled optimizacijskih varijabli i njihovih ograničenja.

Tablica 5.1. Optimizacijske varijable

Varijabla	Oznaka	Donja granica	Gornja granica
Početni kut gornjeg dijela kućišta	$\alpha_1$	$0^\circ$	$90^\circ$
Kutna širina gornjeg dijela kućišta	$\alpha_2$	$45^\circ$	$180^\circ$
Početni kut donjeg dijela kućišta	$\beta_1$	$-90^\circ$	$0^\circ$
Kutna širina donjeg dijela kućišta	$\beta_2$	$-180^\circ$	$-45^\circ$
Polumjer zakrivljenosti lopatice	$r_A$	0.04 m	0.015 m
Relativni kut lopatice i radijalne linije	$\beta_{lopatice}$	$0^\circ$	$70^\circ$
Ukupni kutni raspon lopatice	$\rho$	$20^\circ$	$100^\circ$
Duljina privodećeg lima	$X_5$	-5 m	0 m

Kutovi  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  i duljina  $x_5$  određuju oblik kućišta turbine, dok preostale varijable reguliraju oblik i položaj lopatica na kolu rotora. Granice raspona u kojima je moguće mijenjati optimizacijske varijable određene su tako da se očuva što veća moguća sloboda u dizajniranju, a s druge strane da generirana geometrija ima smisla u stvarnoj primjeni.

Međutim, s obzirom na to da nije moguće predvidjeti sve moguće izvedbe generirane geometrije, u rijetkim slučajevima može se dogoditi da određena geometrija nema fizikalno relevantno značenje. U takvim slučajevima, takva se geometrija penalizira, čime se optimizacijskom algoritmu daje do znanja da to rješenje nije izvedivo.

Osim toga, zbog prirode simulacija koje se provode, postoji mogućnost da simulacija ponekad ne uspije konvergirati, osobito jer je potrebno provesti nekoliko tisuća simulacija s manje strogim

kriterijima konvergencije. U takvim slučajevima, kada simulacija rezultira vrijednostima koje nemaju fizikalno relevantno značenje, ti se rezultati također penaliziraju, čime se ponovno signalizira optimizacijskom algoritmu da takvo rješenje, iako se nalazi unutar prostora mogućih rješenja, nije prihvatljivo.

Cilj optimizacijskog procesa bio je maksimizacija koeficijenta snage turbine  $C_p$ . S obzirom na konstantni promjer rotora, sve vrijednosti u formuli za  $C_p$ , definiranoj izrazom (2.8), ostaju konstantne osim momenta turbine. Stoga je usvojen pristup koji se fokusira na maksimizaciju momenta. Budući da je u većini optimizacijskih procesa pretpostavka minimizacija ciljne funkcije, stvarni cilj optimizacije definiran je kao:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{M_z(\mathbf{x})} \quad (5.1)$$

Minimiziranjem ove recipročne vrijednosti, optimizacija efektivno dovodi do maksimizacije momenta turbine, čime se postiže željeni porast koeficijenta snage.

### 5.3 Optimizacijske metode

Optimizacija je numerički postupak za rješavanje višedimenzionalnog minimizacijskog (ili maksimizacijskog) problema uz dane uvjete/ograničenja [4]. S matematičkog stajališta, optimizacijski problemi svode se na pronalaženje lokalnih minimuma i maksimuma realnih funkcija. Promatrane funkcije mogu biti linearne ili nelinearne, s jednom ili više varijabla koje ih definiraju.

Općenito, optimizacijski algoritmi mogu se podijeliti na determinističke i stohastičke algoritme. Deterministički algoritmi slijede rigoroznu proceduru te su putanje i vrijednosti optimizacijskih varijabli, kao i ciljeva, ponovljive. S druge strane, stohastički algoritmi uvijek koriste koncept nasumičnosti. Budući da bi ispitivanje svih kombinacija iscrpilo resurse i vremenski je neisplativo, pribjegava se stohastičkim metodama.

Stohastičke metode dijele se na heurističke i metaheurističke. Jednostavnije rečeno, heuristički znači pronaći nešto metodom pokušaja i pogrešaka. Na ovaj način kvalitetna rješenja teških optimizacijskih problema mogu se pronaći relativno brzo, ali nije zajamčeno da je pronađeno globalno najbolje rješenje.

Daljnji razvoj heurističkih algoritama doveo je do metaheurističkih algoritama. Ovi algoritmi najčešće su inspirirani prirodom i njenim procesima. Oslanjaju se na dvije ključne komponente: selekciju najboljih rješenja i slučajnost. Ta kombinacija osigurava konvergenciju prema globalnom optimumu, izbjegavajući zamke u lokalnim minimumima. Iako se metaheuristički algoritmi mogu klasificirati na mnogo načina, često se dijele na algoritme koji se temelje na populaciji i one temeljene na putanji. Populacijski algoritmi, poput optimizacije rojem čestica i genetičkih algoritama, koriste skupinu mogućih rješenja koja se procjenjuju tijekom vremena, pri čemu se odabiru i kombiniraju najbolji kandidati kako bi se konvergiralo prema optimalnom rješenju. S druge strane, optimizacijski algoritam simuliranog kaljenja koristi jedno rješenje koje se kreće kroz prostor mogućih rješenja. Uvijek se prihvaća bolji potez, dok se lošiji potez može prihvatiti s određenom vjerojatnošću. Koraci kroz prostor rješenja prate se kako bi se osiguralo da se putanja usmjerava prema globalnom optimumu [32]. Neki od poznatijih metaheurističkih algoritama uključuju:

- Genetički algoritam (GA)
- Simulirano kaljenje (SA)
- Optimizacija rojem čestica (PSO)
- Traženje harmonije (HS)
- Algoritam krijesnica (FA)

U ovom radu, optimizacija je provedena pomoću Pythonovog modula Indago 0.5.0. Indago sadrži nekoliko modernih metoda za optimizaciju realnih funkcija koristeći parametre iz realne domene. Razvijen je na Zavodu za mehaniku fluida i računalno inženjerstvo Tehničkog fakulteta u Rijeci, a njegova primarna namjena su istraživačke i nastavne svrhe. Indago nudi dvanaest optimizacijskih algoritama među kojim su:

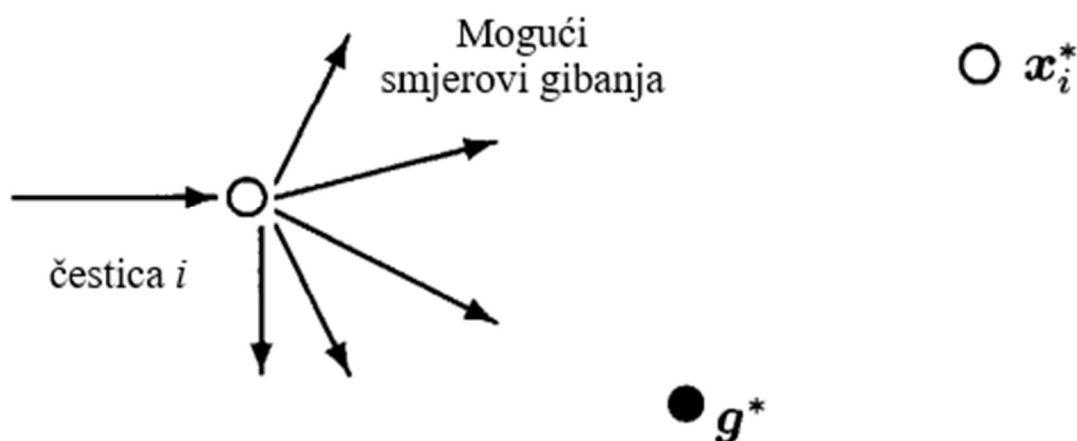
- Optimizacija rojem čestica (PSO)
- Algoritam vatrometa (FWA)
- Nelder-Mead (NM)
- Diferencijalna evolucija (DE)

### 5.3.1 Optimizacija rojem čestica (PSO)

Algoritam optimizacije rojem čestica (PSO) razvijen je od strane Kennedyja i Eberharta 1995. godine [32], inspiriran ponašanjem jata riba i ptica u prirodi. Iako PSO algoritam dijeli neke

sličnosti s genetičkim algoritmima, puno je jednostavniji jer ne koristi operatore mutacije ili križanja. Umjesto toga, oslanja se na slučajnost realnih brojeva i globalnu komunikaciju među česticama unutar roja.

Ovaj algoritam pretražuje prostor rješenja prilagođavanjem putanja pojedinih čestica. Gibanje svake čestice sastoji se od dvije glavne komponente: stohastičke i determinističke. Svaka čestica je privučena prema poziciji globalno najboljeg rješenja  $g^*$  i vlastitog lokalno najboljeg rješenja  $x_i^*$  ali također ima tendenciju gibati se nasumično. Na slici 5.1. dan je shematski prikaz gibanja čestice.



Slika 5.1. Shematski prikaz gibanja čestice kod optimizacije rojem čestica [32]

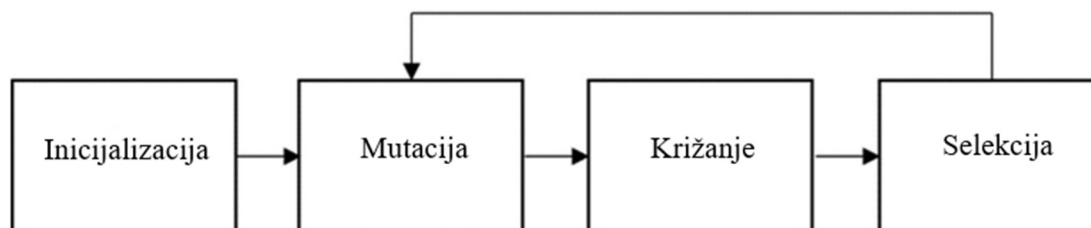
Kada čestica pronade lokaciju koja je bolja od svih prethodno pronađenih, ažurira tu poziciju kao novu najbolju lokaciju za tu česticu  $i$ . Postoji također i globalno najbolje rješenje koje se određuje za svih  $n$  čestica u svakoj iteraciji. Cilj algoritma je pronaći globalno najbolje rješenje među svim trenutno najboljim lokalnim rješenjima, sve dok se rješenje više ne može poboljšati.

### 5.3.2 Diferencijalna evolucija (DE)

Algoritam Diferencijalne evolucije (DE) moćan je, a ujedno i jednostavan alat za globalno pretraživanje najboljeg rješenja u kontinuiranom prostoru rješenja, koji su uveli Storn i Price [34]. Algoritam održava populaciju kandidata (vektora) koji se iterativno poboljšavaju kroz mutaciju,



križanje i selekciju. Nova rješenja generiraju se dodavanjem ponderirane razlike dvaju vektora trećem vektoru, a zatim se to probno rješenje kombinira s još jednim vektorom. Ako probno rješenje pokazuje bolje rezultate od postojećeg, ono ga zamjenjuje. Proces algoritma ilustriran je na slici 5.2.



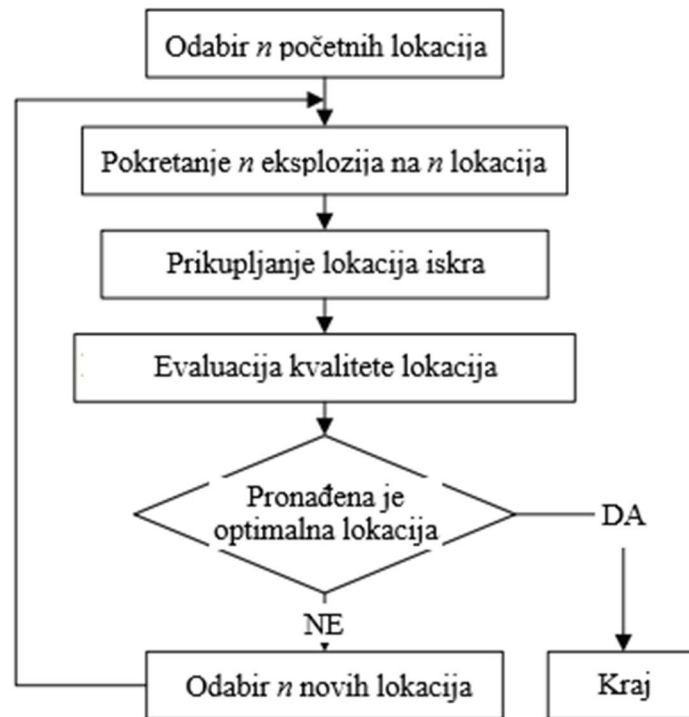
Slika 5.2. Proces DE algoritma [33]

DE algoritam je visoko cijenjen zbog svoje jednostavnosti i činjenice da zahtijeva samo nekoliko kontrolnih parametara, kao i zbog svoje robusnosti i široke primjenjivosti na razne optimizacijske probleme. Nadalje, algoritam je pogodan za paralelno izvođenje, što ga čini idealnim za optimizaciju složenih problema koji zahtijevaju značajne računalne resurse.

### 5.3.3 Algoritam vatrometa (FWA)

FWA algoritam inspiriran je eksplozijom vatrometa i namijenjen je pronalasku globalnog optimuma složenih funkcija, a predložili su ga Tan i Zhu [35]. Kada vatromet eksplodira, kiša iskra ispunjava lokalni prostor oko vatrometa. Ovaj proces može se poistovjetiti s pretraživanjem lokalnog prostora oko određene točke pomoću iskri nastalih u eksploziji.

U FWA algoritmu, za svaku generaciju odabire se  $n$  lokacija na kojima će eksplodirati vatrometi. Nakon eksplozije, provjerava se pozicija svake iskre i evaluira se njena kvaliteta. Kada se pronade optimalna lokacija, algoritam se zaustavlja. U suprotnom, za sljedeću generaciju eksplozija odabiru se novih  $n$  lokacija prema pozicijama najboljih iskri iz trenutne generacije. Uspjeh FWA algoritma uvelike ovisi o dobro dizajniranom procesu eksplozije i prikladnom izboru lokacija za eksploziju. Na slici 5.3. dan je shematski prikaz FWA algoritma.

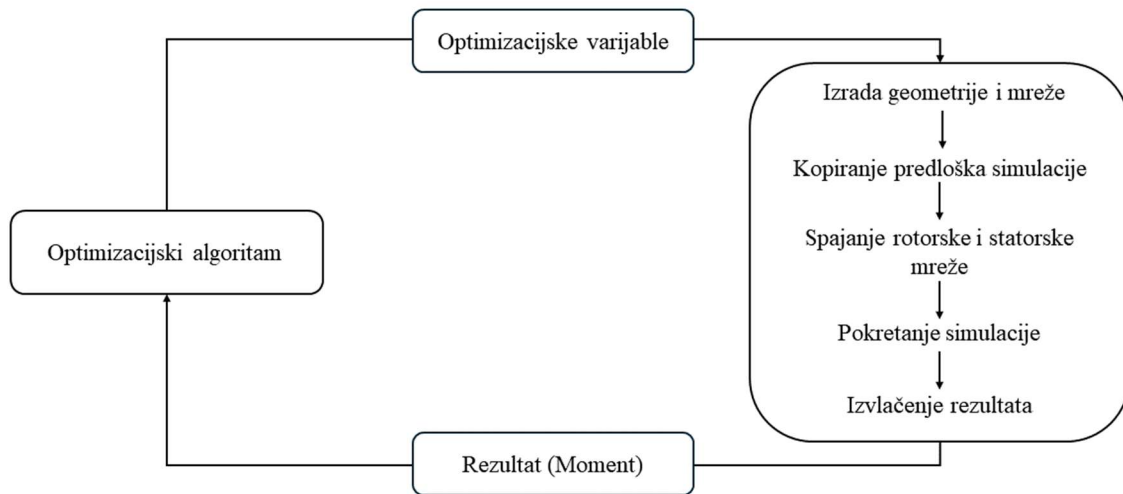


Slika 5.3. Shematski prikaz toka FWA algoritma

#### 5.4 Implementacija algoritma

Geometrija modela automatski se generira na temelju varijabli koje određuje optimizacijski algoritam. Nakon toga, generirana geometrija se automatski umrežava, a ovi procesi, uključujući generiranje geometrije i umrežavanje, izvode se pomoću GMSH Python API-ja. Za automatizirano izvođenje CFD simulacije pomoću *OpenFOAM*-a, potrebno je unaprijed pripremiti osnovne direktorije za pokretanje simulacije: *0*, *system*, i *constant*. Također, priprema se *shell* skripta koja obrađuje generirane mreže i pretvara ih u format pogodan za korištenje kao ulazne podatke u simulaciji. Predložak direktorija za simulaciju se kopira i dodjeljuje mu se jedinstveni naziv, nakon čega se poziva *shell* skripta koja obrađuje mreže, spaja ih i pokreće simulaciju. Kako bi se proces ubrzao, implementirano je paralelno izvođenje simulacije i optimizacije. Nakon svake simulacije, automatski se poziva funkcija koja čita rezultate iz datoteke generirane pomoću *OpenFOAM*-a. Očitana vrijednost vraća se evaluacijskoj funkciji, na temelju koje optimizacijski algoritam prilagođava varijable koje se zatim vraćaju u cijeli proces. Na taj način algoritam iterativno usavršava rješenje, do optimalnog rezultata.

Na slici 5.4. prikazan je optimizacijski proces i tijek informacija kroz taj proces.



*Slika 5.4. Optimizacijski proces*

## 6 REZULTATI

U ovom poglavlju prikazani su rezultati provedene optimizacije. Za optimizaciju je korištena PSO metoda s rojem od 10 čestica, uz ukupno 250 provedenih iteracija. Zadani ulazni podaci navedeni su u tablici 6.1.

Tablica 6.1. Zadani ulazni parametri

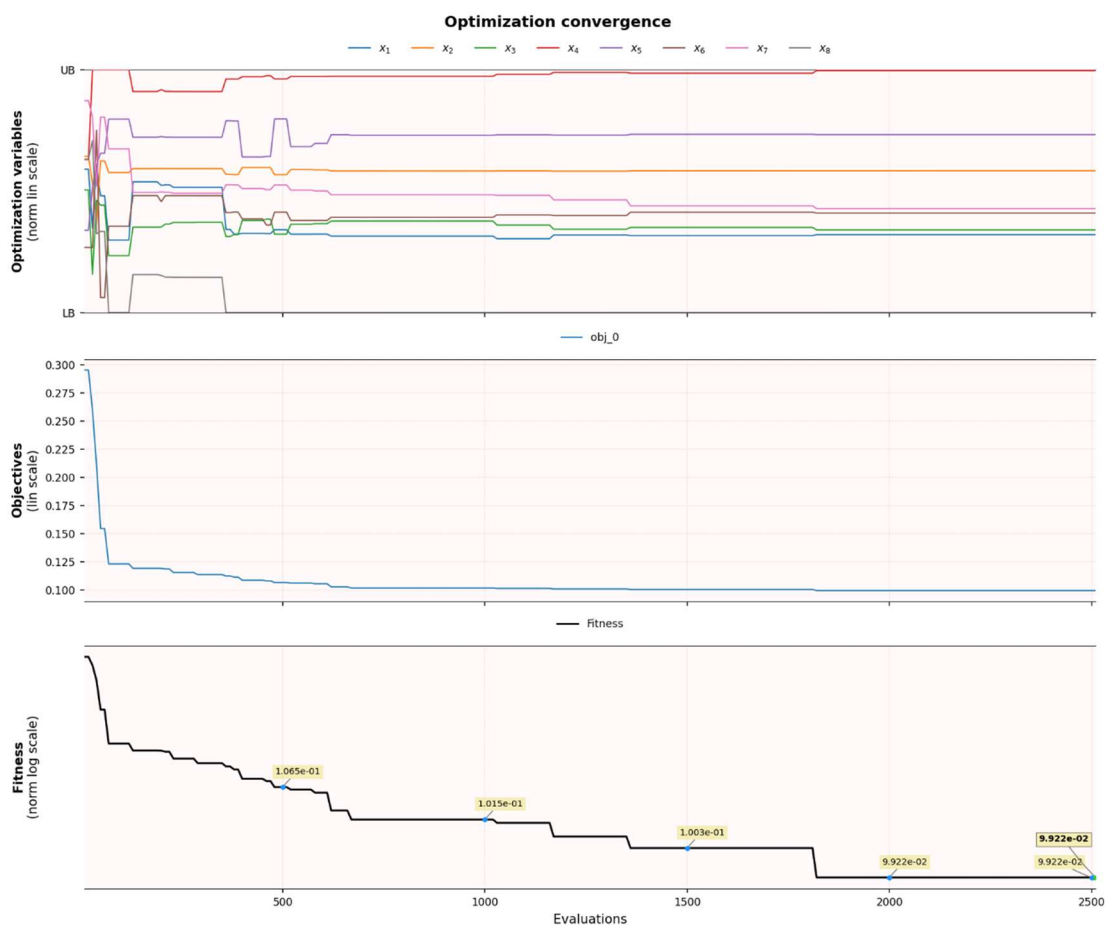
Varijabla	Oznaka	Vrijednost
Promjer rotora	$R$	0.25 m
Broj lopatica rotora	$n$	18
Debljina lopatica	$s$	0.005 m
Omjer obodne brzine i brzine vjetra	$\lambda$	0.45
Obodna brzina	$\omega$	18 rad/s
Raspon krova	/	10 m
Nagib krova	/	25°
Brzina vjetra	$u_\infty$	10 m/s

Promjer rotora nije optimiziran jer je izravno povezan s obodnom brzinom  $\omega$ , koja je pak izravno povezana sa snagom turbine, kao što je definirano izrazom (2.3). Veći promjer rotora dovodi do veće obodne brzine i veće snage, što čini optimizaciju ostalih varijabli upitnom, ili u najgorem slučaju manje bitnom. Debljina lopatica procijenjena je kao faktor  $s$  manjim utjecajem na snagu turbine, pa nije uključena u optimizaciju. Broj lopatica je diskretna vrijednost, što često predstavlja izazov za optimizacijske metode, te zbog toga ovaj parametar nije bio uključen u optimizaciju. Konačno, omjer obodne brzine i brzine vjetra je empirijska vrijednost preuzeta iz literature i nije podložan optimizaciji. Na temelju izraza (2.5) i usvojenog omjera određena je obodna brzina  $\omega$ .

### 6.1 Konvergencija

Na slici 6.1. prikazan je graf konvergencije provedene optimizacije. Graf u gornjem dijelu slike prikazuje konvergenciju optimizacijskih varijabli, gdje se mogu uočiti značajne promjene u vrijednostima tih varijabli tijekom prvih 700 evaluacija, dok algoritam istražuje prostor pretraživanja. Nakon otprilike 1800 evaluacija, sve krivulje se potpuno stabiliziraju, što ukazuje

na postizanje stabilnog rješenja. Grafovi u sredini i na dnu slike prikazuju konvergenciju fitness funkcije i ciljne funkcije, koje su u ovom slučaju istovjetne. Razlika između dva grafa proizlazi iz različite skale na apscisi—na srednjem grafu primijenjena je linearna skala, dok je na donjem logaritamska skala. Iz ovih grafova jasno je vidljivo da optimizacija relativno brzo pronalazi područje s optimalnim rješenjem, pri čemu se već nakon otprilike 700 evaluacija nalazi dobro rješenje koje se kasnije dodatno usavršava. Treći graf pokazuje da je nakon 1800 evaluacija pronađeno optimalno rješenje, a činjenica da se u narednih 700 evaluacija to rješenje nije značajno promijenilo ukazuje na to da je broj evaluacija bio dovoljan za postizanje stabilne konvergencije.



Slika 6.1. Graf konvergencije varijabli, funkcije fitness-a i funkcije cilja

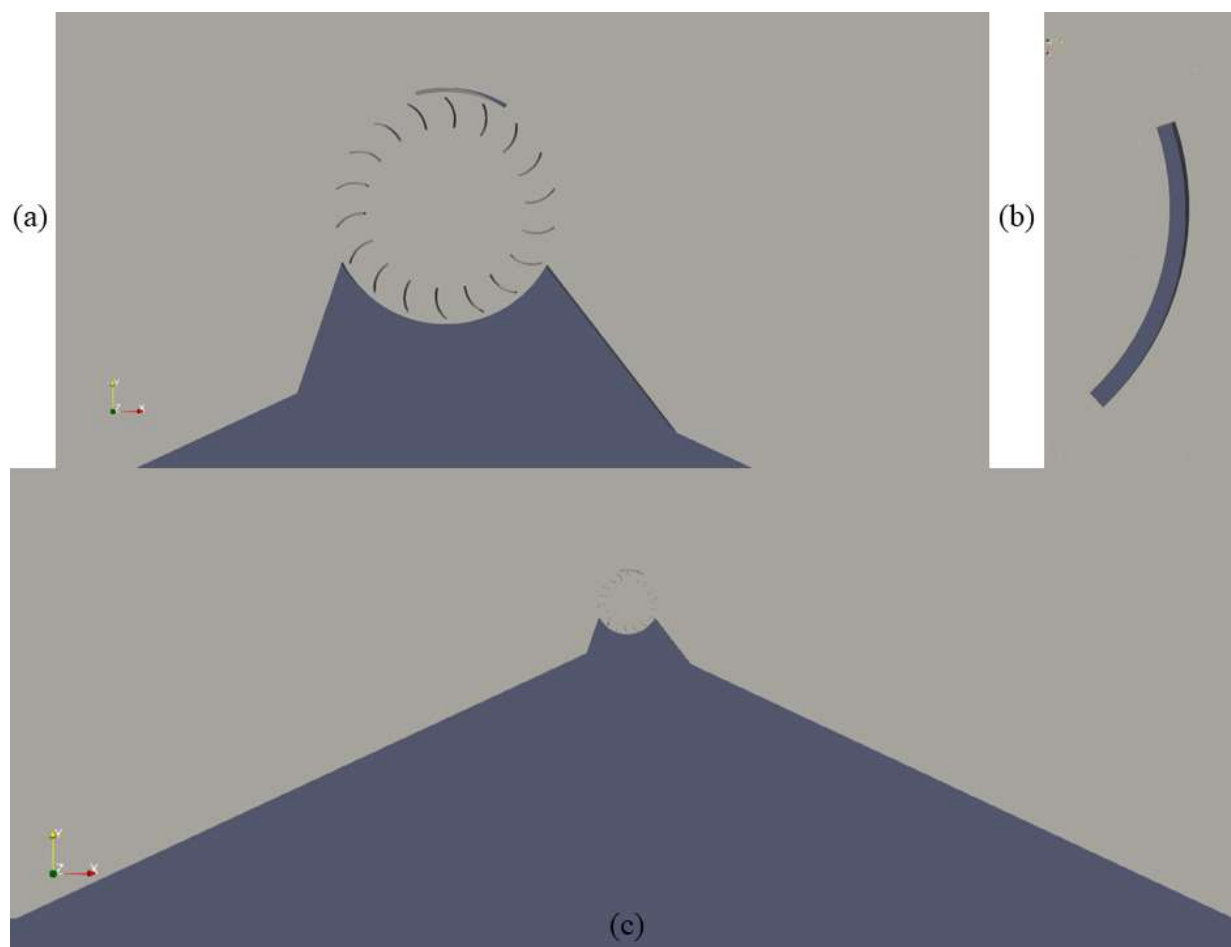
## 6.2 Optimalni dizajn

U tablici 6.2. dane su vrijednosti optimizacijskih varijabli u 250. iteraciji.

Tablica 6.2. Vrijednosti optimizacijskih varijabli

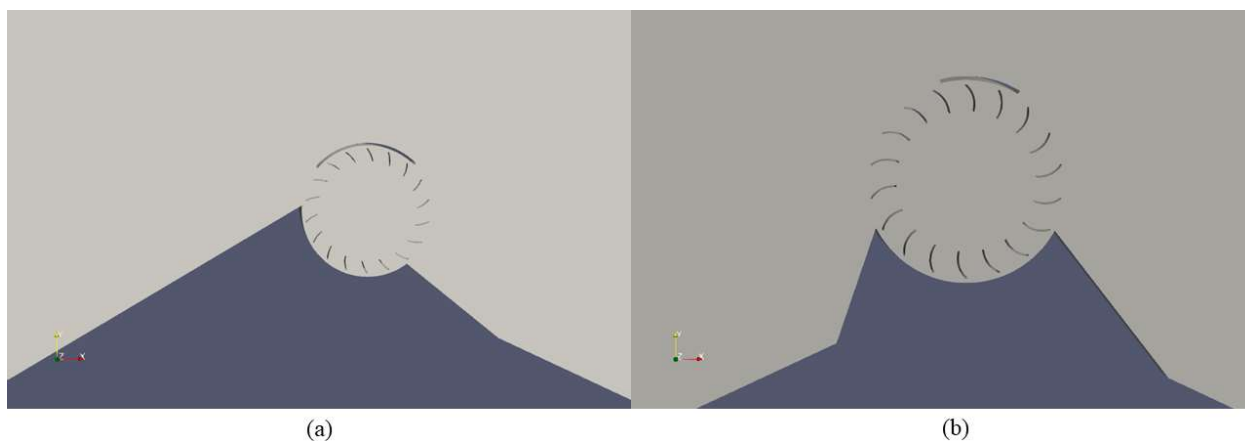
$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$r_A$	$\beta_{\text{lopaatice}}$	$\varphi$	$x_5$
59.35 °	45.4°	-28.9°	-123.9°	0.0693 m	41.3°	65.75°	-1.01 m

Na slici 6.2. prikazan je dizajn kućišta i lopatica nakon provedene optimizacije.



Slika 6.2. Prikaz optimalnog dizajna: (a) uvećani prikaz kućišta, (b) detaljni prikaz geometrije lopatice i (c) prikaz kućišta i krova.

Na slici 6.3. dana je usporedba dizajna nakon prve iteracije i nakon posljednje iteracije.



Slika 6.3. Dizajn kućišta i lopatica: (a) nakon prve iteracije i (b) nakon 250 iteracija

Vidljiva je značajna razlika u obliku kućišta i lopatica između prve iteracije i one nakon 250 iteracija. Kućište je značajno smanjeno, a ulazna površina u turbinu je maksimizirana, omogućujući većem volumenu zraka da struji kroz turbinu. Kratak i strm privodeći rub kućišta ubrzava zrak na ulazu, osiguravajući povoljan kut udara zraka u lopatice. Dizajn lopatica također je doživio značajne promjene između dva prikazana slučaja. Veće i zakrivljenije lopatice u slučaju (b) imaju veću površinu, što im omogućava zahvaćanje većeg volumena zraka. Osim toga, njihova zakrivljenost optimizira napadni kut, čime se poboljšava konverzija energije vjetra u mehaničku energiju.

### 6.3 Simulacija optimalnog dizajna

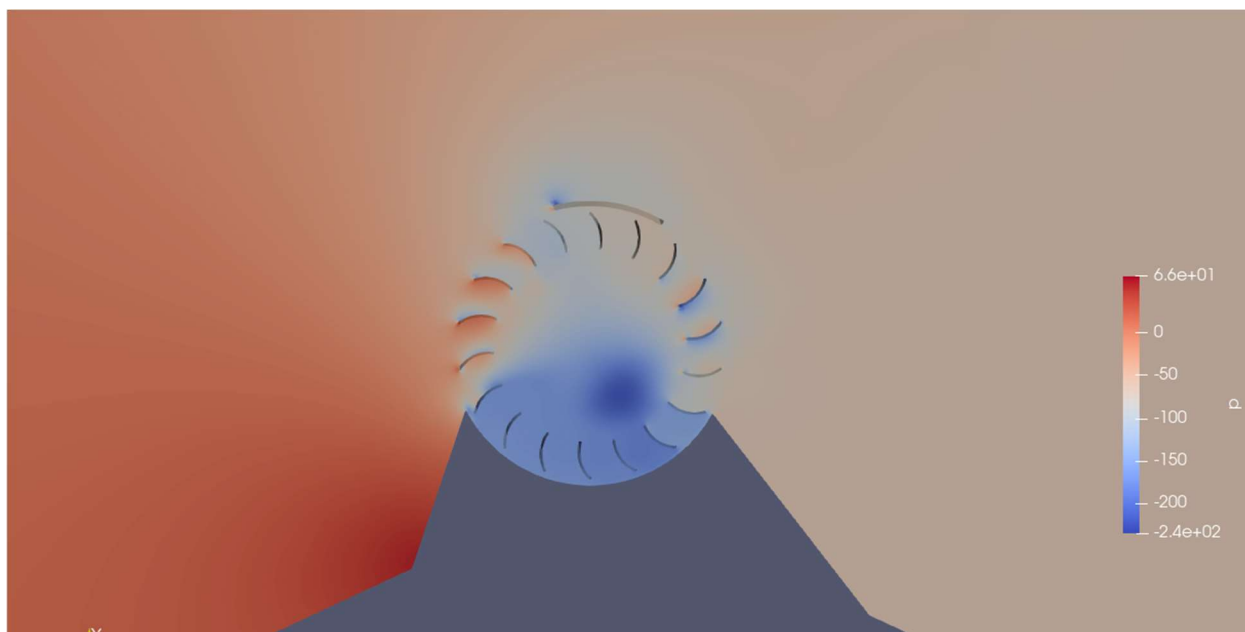
Na slici 6.4. prikazane su konture tlaka na području cijele domene.



Slika 6.4. Konture tlaka na području cijele domene

Raspodjela tlaka unutar domene odgovara očekivanjima. Na području ispred turbine, u smjeru strujanja zraka, javlja se povišeni tlak, dok se iza turbine formira zona sniženog tlaka, što ukazuje na učinkovitu pretvorbu energije vjetra u mehanički rad.

Na slici 6.5. dan je uvećan prikaz kontura tlaka u području same turbine.

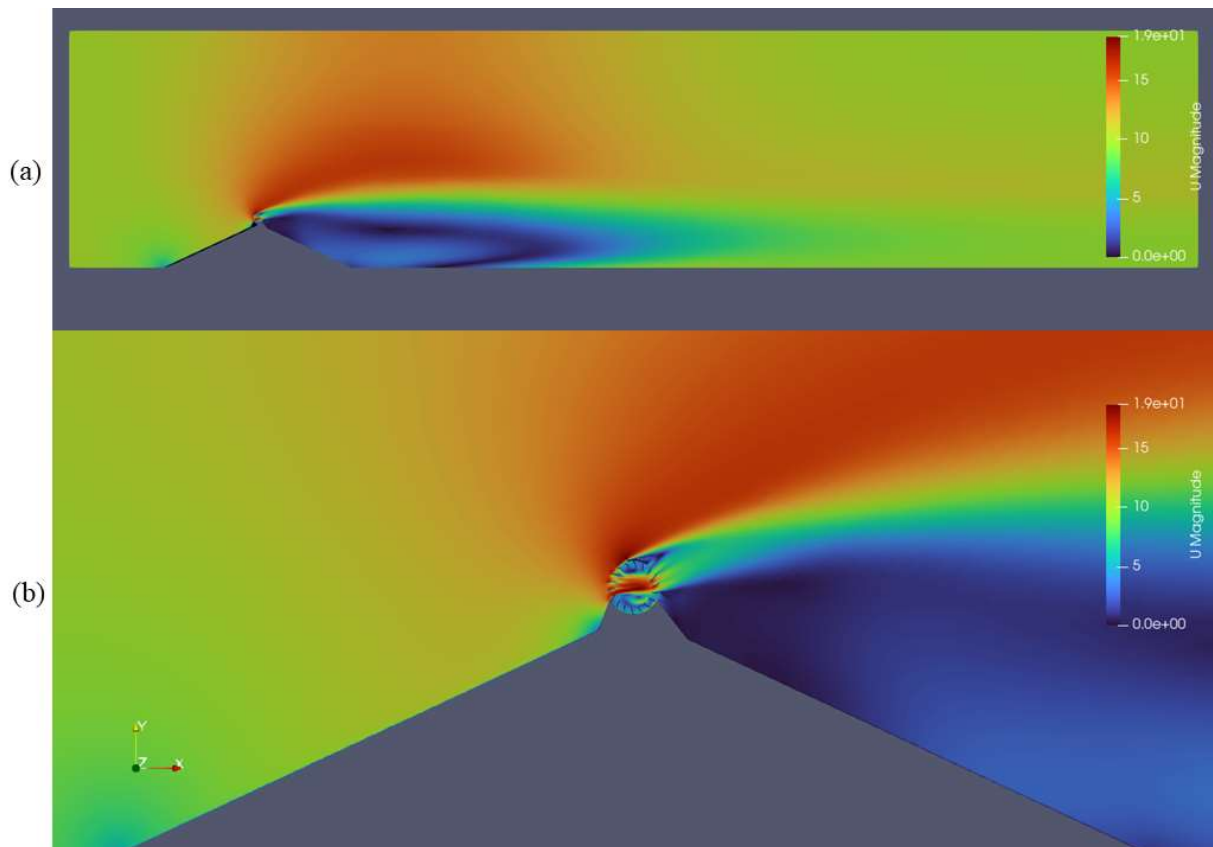


*Slika 6.5. Detalj kontura tlaka na području kućišta i turbine*

Pravilni gradijent tlaka oko lopatica ukazuje na kvalitetan dizajn koji minimizira turbulencije i odvajanje strujanja. Raspodjela tlaka unutar turbine pokazuje simetriju oko središnje osi, što sugerira da je protok zraka dobro usmjeren i dobro usklađen s osi turbine. Pad tlaka unutar same turbine uzorkovan je pretvaranjem energije vjetra u mehaničku energiju. Značajna razlika u tlakovima ukazuje na to da se veliki dio energije vjetra pretvara u mehaničku energiju.

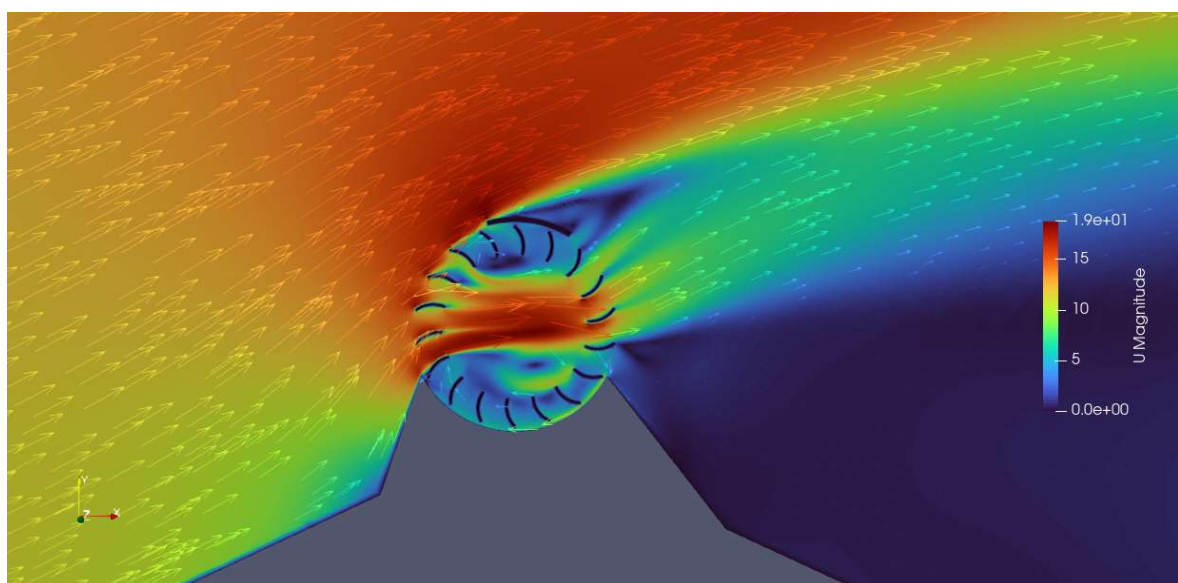
Na slici 6.6. prikazane su konture brzina na cijeloj domeni i uvećani prikaz kontura brzina na područja krova.





*Slika 6.6. Prikaz kontura brzina: (a) na području cijele domene i (b) na području oko krova*

Na slici 6.7. prikazan je detaljni prikaz kontura brzina u području turbine, uključujući i vektore brzina, čime se omogućuje precizniji prikaz strujanja u ovoj kritičnoj zoni.



*Slika 6.7. Prikaz kontura brzina i vektora brzina u području turbine*

Na temelju prikazanih slika može se zaključiti da je kućište optimizirano za maksimalan unos zraka u turbinu, što je vidljivo iz velike količine zraka koji struji velikom brzinom, označenom crvenom bojom. Osim toga, protok zraka unutar turbine je prilično ujednačen, što dodatno doprinosi smanjenju energetske gubitaka.

Vrijednost momenta ovako dizajnirane turbine iznosi:

$$M_z = 10.079 \text{ N/m}$$

Snaga turbine iznosi:

$$P = 10.079 \cdot 18 = 181.422 \text{ W} \quad (6.1)$$

Obzirom da su sve potrebne vrijednosti sada poznate, moguće je odrediti koeficijent snage ovakve turbine pomoću izraza (2.8):

$$C_p = \frac{10.079 \cdot 18}{\frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 0.5 \cdot 1 \cdot 10^3} = 0.5924 \quad (6.2)$$

Dobiveni koeficijent snage ukazuje na izvrsnu iskoristivost turbine i potvrđuje da je optimizacija uspješno maksimizirala proizvedeni moment. Dizajn kućišta i smještaj turbine omogućuju povećan prtok zraka u turbinu, što rezultira boljom iskoristivošću. Međutim, potrebno je uzeti u obzir da je razmatrani slučaj simuliran u idealnim uvjetima s konstantnom brzinom strujanja vjetra, što je u stvarnim uvjetima gotovo nemoguće. To znači da bi stvarni koeficijent snage turbine vjerojatno bio manji od simuliranog.

#### 6.4 Validacija rezultata nestacionarnom simulacijom

Za validaciju rezultata dobivenih stacionarnom simulacijom MRF pristupom, provedena je nestacionarna simulacija s dinamičkom mrežom. Usrednjeni moment dobiven dinamičkom simulacijom koji odgovara momentu  $M_z$  iz prethodnog poglavlja iznosi:

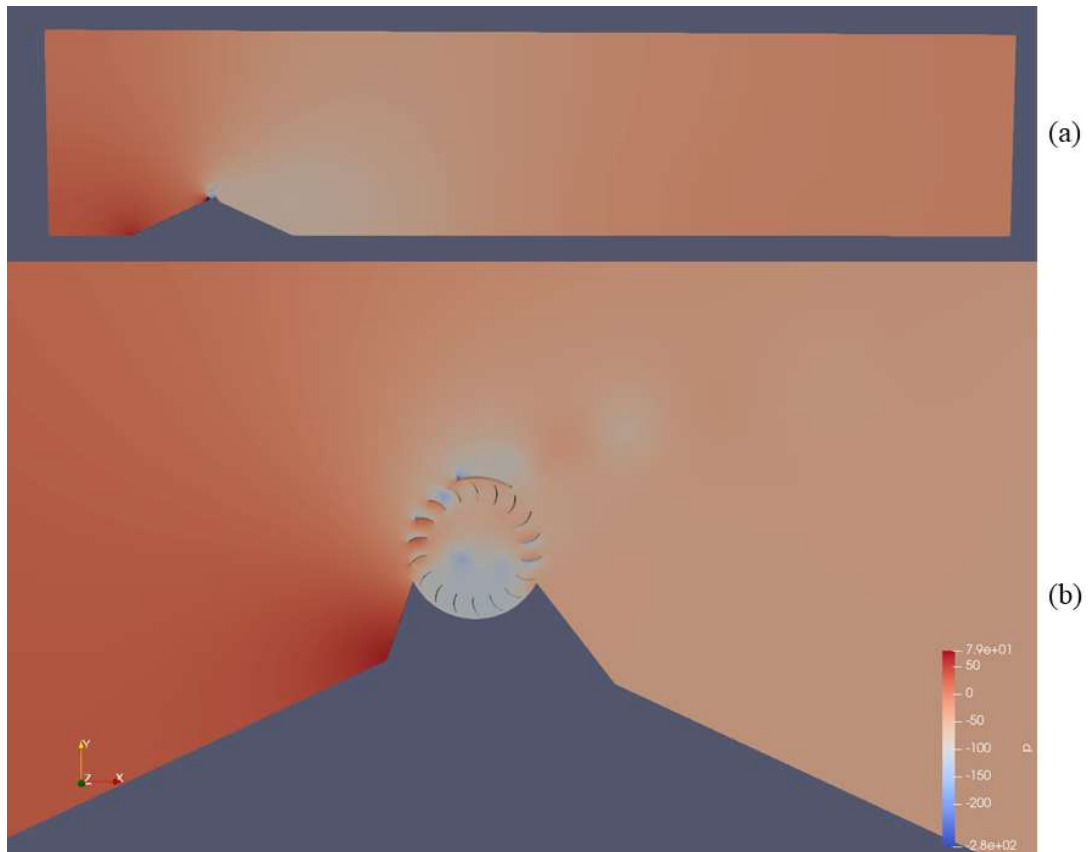
$$\overline{M_z} = 9.985 \text{ N/m}$$

Snaga turbine u ovom slučaju iznosi:

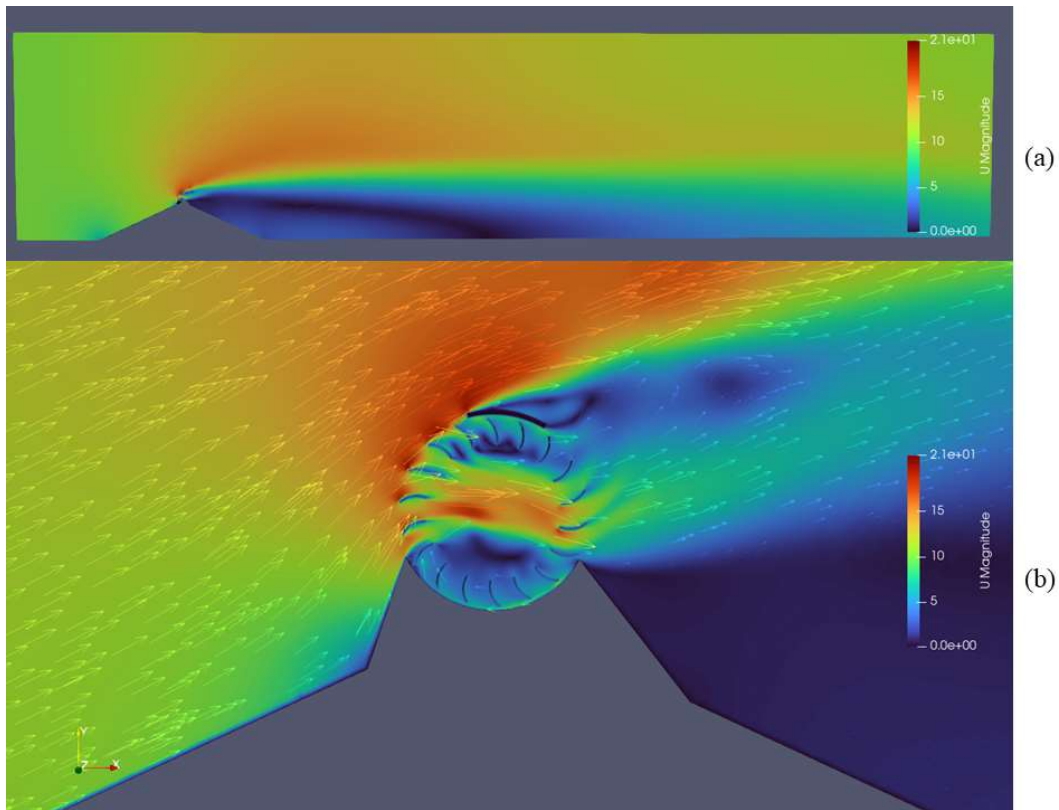
$$P = 9.985 \cdot 18 = 179.73 \text{ W} \quad (6.3)$$

Odstupanje između momenta dobivenog MRF pristupom i onog iz dinamičke simulacije je zanemarivo, što potvrđuje da je MRF pristup pouzdana aproksimacija dinamičke simulacije. Time se opravdava primjena ovog pristupa za smanjenje potrebnih računalnih resursa.

Na slici 6.8. dan je prikaz kontura tlakova na cijeloj domeni i uvećani prikaz područja turbine. Na slici 6.9. prikazana je kontura brzina na cijeloj domeni i uvećani prikaz u području turbine s prikazanim vektorima brzina.



*Slika 6.8. Prikaz kontura tlakova: (a) na cijeloj domeni i (b) u području turbine*



Slika 6.9. Prikaz kontura brzina: (a) na cijeloj domeni i (b) uvećani prikaz u području turbine

Obrasci kontura brzina i kontura tlakova u dinamičkoj simulaciji odgovaraju onima dobivenim MRF pristupom. Iako se ne podudaraju u potpunosti, što je očekivano s obzirom na to da se u dinamičkoj simulaciji distribucija tlakova i brzina neprestano mijenja tijekom vremena, dok MRF pristup daje statičan prikaz u posljednjem vremenskom koraku. S obzirom na te razlike, može se zaključiti da raspodjele odgovaraju, ali dinamička simulacija pruža detaljniji i cjelovitiji uvid u promjene strujanja fluida kroz turbinu tijekom vremena, te jasnije prikazuje stvarnu dinamiku strujanja. Uvid u promjene raspodjele tlakova i brzina u vremenu nije presudan za sam proces optimizacije, ali predstavlja vrijedan alat za validaciju optimalnog dizajna.

## 7 USPOREDBA OPTIMIZACIJSKIH METODA

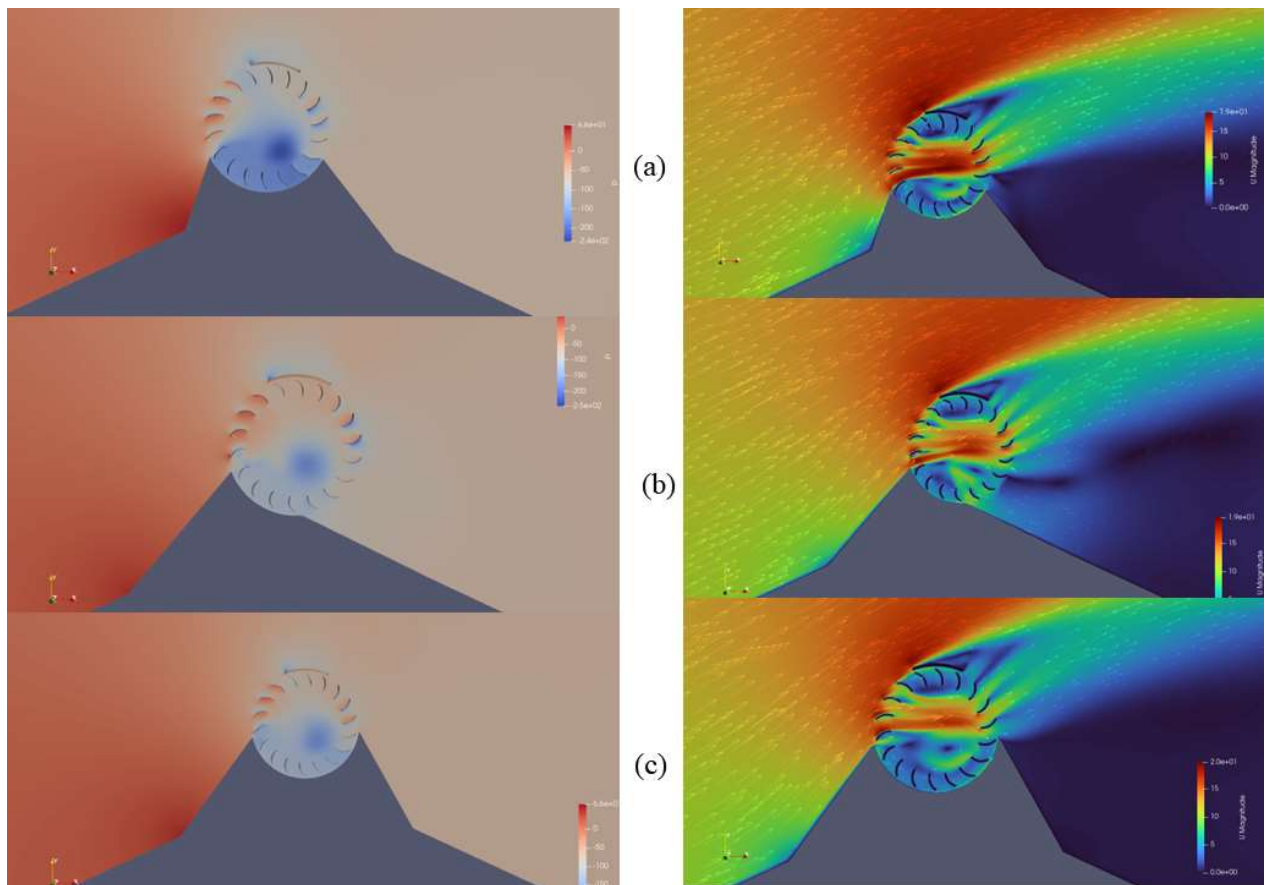
Optimizacija je provedena pomoću DE i FWA algoritma s ciljem usporedbe dobivenih rezultata i ocjene kvalitete rezultata dobivenih primjenom PSO metode. Optimizacije DW i DWA algoritmima odvijale su se pod istim uvjetima kao i PSO optimizacija, s veličinom populacije od 10 jedinki odnosno 10 lokacija i 250 iteracija. U tablici 7.1. prikazana je usporedba vrijednosti optimiziranih varijabli i funkcije cilja dobivenih PSO i DE metodama.

Tablica 7.1. Usporedba dobivenih rezultata različitim optimizacijskim metodama

Varijabla	PSO	DE	FWA
$\alpha_1$	59.35°	60.92°	65.37°
$\alpha_2$	45.4°	51.96°	45.56°
$\beta_1$	-28.9°	-84.82°	-7.05°
$\beta_2$	-123.9°	-73.9°	-169.7°
$r_A$	0.069 m	0.045 m	0.061 m
$\beta_{lopatice}$	41.13°	21.08°	31.1°
$\rho$	65.75°	97.17°	75.1°
$X_5$	-0.101 m	-0.3866 m	-0.346 m
Cilj	10.079 N/m	10.37 N/m	9.18 N/m
$C_p$	0.5924	0.6095	0.54
P	181.422 W	186.66 W	165.24 W

Prema vrijednostima funkcije cilja, razlika između PSO i DE metoda je minimalna, dok je FWA metoda rezultirala nešto manjim momentom. Vrijednosti optimizacijskih varijabli su raznolike, što sugerira da postoji više od jednog optimalnog rješenja. Ovo je očekivano kod ovakvog tipa optimizacije s velikim brojem optimizacijskih varijabli.

Na slici 7.1. dana je usporedba kontura tlakova i kontura brzina s prikazanim vektorima brzina u području turbine za sve tri metode.



Slika 7.1. Prikaz kontura tlakova (lijevo) i brzina (desno) za dizajn dobiven (a) PSO metodom, (b) DE metodom i (c) FWA metodom

Vidljivo je da dizajni (a) i (c) dijele mnoge sličnosti, dok je dizajn (b) prilično različit. Ta razlika vjerojatno proizlazi iz činjenice da se u dizajnu (b) događa usis zraka na desnoj strani turbine, što fiktivno povećava proizvedeni moment turbine, čineći ga optimizacijski najboljim, iako to u stvarnosti vjerojatno nije slučaj s obzirom na to da takvo gibanje fluida nije vjerojatno. Takav rezultat optimizacije ponekad se ne može izbjeći jer nije moguće predvidjeti sve ishode simulacije, a ovakav ishod nije moguće unaprijed penalizirati.

Sličnosti između dizajna (a) i (c) sugeriraju da se optimalan dizajn nalazi u blizini tog prostora rješenja. Dizajn (a) postiže veći proizvedeni moment zbog vidljivo veće količine zraka koja struji velikom brzinom kroz turbinu, što ga čini optimizacijski najpovoljnijim dizajnom s obzirom na najbolje performanse. Dizajn (c), s druge strane, proizvodi nešto niži moment, i ima blaži gradijent tlaka unutar turbine, što upućuje na nešto manju konverziju energije vjetera u mehaničku energiju.

Sve tri optimizacijske metode dale su slične vrijednosti funkcije cilja, što ukazuje na to da za ovu turbinu ovih dimenzija i u ovim uvjetima, postignuti rezultat doista predstavlja njezin maksimum. Dizajni (a) i (c) predstavljaju dobru polazišnu točku za daljnje usavršavanje dizajna.

Sve tri optimizacije provedene su u istim uvjetima na jednakom broju procesora. Vremena trajanja optimizacije za PSO i DE algoritme bila su slična, približno 10 sati, dok se FWA metoda istaknula svojim vrlo kratkim vremenom izvođenja od samo 5 sati. Usprkos znatno kraćem vremenu izvođenja, FWA metoda se uspješno približila optimalnom rješenju, što je čini efikasnijom u potrazi za globalnim optimumom s kratkim vremenom izvršavanja. PSO algoritam zasigurno je temeljitije pretražio lokalni prostor globalnog rješenja, što potvrđuje činjenica da je PSO metoda dala najbolji iznos funkcije cilja, ali uz značajno duže vrijeme izvođenja.

## 8 ZAKLJUČAK

Zadatak ovog diplomskog rada bio je primijeniti optimizacijske metode na parametriziranu konstrukciju crossflow turbine i njenog kućišta. Definirani su numerički modeli i metode korištene za simuliranje strujanja fluida. Dan je detaljan opis načina parametrizacije geometrije, primijenjene mreže i uvjeta simulacije. Također, dan je pregled algoritama optimizacije i njihove namjene, uz detaljan opis korištenih optimizacijskih metoda.

Za potrebe optimizacije, simulacija se provodila pomoću MRF pristupa, s obzirom na to da dinamička simulacija zahtijeva mnogo računalnih resursa i ima dugo vrijeme izvršavanja. Najuspješnijom se pokazala optimizacija rojem čestica, pri čemu konstrukcija dobivena ovom metodom proizvodi najveći moment u realnim uvjetima strujanja zraka kroz turbinu. Rješenje dobiveno MRF pristupom validirano je dinamičkom simulacijom, pri čemu je razlika između dobivenih momenta gotovo zanemariva. Kako bi rezultati bili usporedivi, korištena je ista razina točnosti pri provođenju obje simulacije. Povećanjem razine točnosti svakako bi se dobila preciznija simulacija strujanja fluida, ali to bi vrijedilo za oba pristupa.

Usporedbom metoda, uz PSO metodu istaknula se i FWA metoda zbog kratkog vremena izvođenja i rezultata vrlo bliskih onima dobivenim PSO metodom. PSO metoda je svakako bolje pretražila lokalni prostor oko globalno najboljeg rješenja, što potvrđuje i najbolji rezultat dobiven upravo ovom metodom.

Ovim radom jasno je dokazano da se kombinacijom numeričke simulacije strujanja i optimizacije može značajno poboljšati dizajn turbine i njenog kućišta, čime bi *crossflow* turbine u urbanim područjima mogle predstavljati adekvatno rješenje za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora.

Ovaj rad predstavlja polazišnu točku za daljnje usavršavanje dizajna lopatica turbine i njenog kućišta, s obzirom na to da dizajn kućišta i turbine međusobno utječu jedan na drugoga najbolji rezultati bit će dobiveni razmatranjem oba dijela zajedno.

Daljnja proširenja ovog rada mogu uključiti optimizaciju broja lopatica, što značajno utječe na proizvedeni moment turbine i na sam dizajn lopatica, a posljedično i kućišta. Za optimizaciju broja lopatica bilo bi korisno provesti niz optimizacija u istim uvjetima te vidjeti koji broj lopatica pruža najveći proizvedeni moment. Još jedno korisno proširenje ovog problema bilo bi ispitivanje utjecaja okoline, odnosno izgleda i nagiba krova, na performanse turbine. Sigurno je da bi moderni



krov bez nagiba zahtijevao drastičnu promjenu u dizajnu kućišta. Osim toga, moglo bi se ispitati kako smjer vjetra utječe na rad turbine.

## Bibliografija

- [1] Sefidgar, Z.; Ahmadi Joneidi, A.; i Arabkoohsar, A.: „A Comprehensive Review on Development and Applications of Cross-Flow Wind Turbines“, *MDPI*, 2023.
- [2] Zanforlin, S.; Letizia, S.: „Effects of upstream buildings on the performance of a synergistic roof-and-diffuser augmentation system for cross flow wind turbines“, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, sv. 184, str. 329–341, 2019.
- [3] Shigemitsu, T.; Fukutomi, J.; Takeyama, Y.: „Study on Performance Improvement of Cross-Flow Wind Turbine with Symmetrical Casing“, *Journal of Environment and Engineering*, sv. 4, izd. 3, str. 490–501, 2009.
- [4] Ivić, S.: „Optimizacije u tehnici“, materijali za predavanja, Optimizacije u tehnici, Tehnički fakultet u Rijeci, 2023.
- [5] Wolf, I.: „Obnovljivi izvori energije OIE-značaj, vrste, potencijal“, materijali za predavanja, Obnovljivi izvori energije, Tehnički fakultet u Rijeci, 2023.
- [6] „Electricity from renewable sources up to 41% in 2022“, s Interneta, pristupljeno 26.8.2024., <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/w/ddn-20240221-1>
- [7] „Tlak“, s Interneta, pristupljeno 26.8.2024., <https://www.enciklopedija.hr/clanak/tlak>
- [8] „Global Wind Patterns“, s Interneta, pristupljeno 27.8.2024., <https://transportgeography.org/contents/chapter1/transportation-and-space/global-wind-patterns/>
- [9] „Snaga“, s Interneta, pristupljeno 25.8.2024., <https://enciklopedija.hr/clanak/snaga>
- [10] Boyle, G.: „Renewable Energy“, 1998.
- [11] „Vjetrena turbina“, s Interneta, pristupljeno 20.8.2024., <https://enciklopedija.hr/clanak/vjetrena-turbina>.
- [12] Casini, M.: „Small Vertical Axis Wind Turbines for Energy Efficiency of Buildings“, *Journal of Clean Energy Technologies*, sv. 4, izd. 1, str. 56–65, 2015.
- [13] Hosseini, A.; Cannon, D. T.; Vassel-Be-Hagh, A.: „Tip Speed Ratio Optimization: More Energy Production with Reduced Rotor Speed“, *Wind*, sv. 2, izd. 4, str. 691–711, 2022.

- [14] Kaleeswari, M.: „Wind Turbine Concepts for Energy Efficiency in Buildings“, 2018.
- [15] „Rooftop wind system delivers 150% the energy of solar per dollar“, s Interneta, pristupljeno 28.8.2024., <https://newatlas.com/energy/aeromine-rooftop-wind/>
- [16] „Small vertical axis wind turbine for homes, close up of small power generator mounted on the house facade“, s Interneta, pristupljeno 28.8.2024., <https://stock.adobe.com/images/small-vertical-axis-wind-turbine-for-homes-close-up-of-small-power-generator-mounted-on-the-house-facade/489742193>
- [17] „Ridgeblade“, s Interneta, pristupljeno 5.8.2024., <https://ridgeblade.com/>
- [18] Haase, M.; Löfström, E.: Building augmented wind turbines-BAWT INTEGRATED SOLUTIONS AND TECHNOLOGIES OF SMALL WIND TURBINES, 2015.
- [19] „Bahrain World Trade Center: A Marvel of Modern Design and Sustainability“, s Interneta, pristupljeno 28.8.2024., <https://medium.com/@nitisharora41/bahrain-world-trade-center-a-marvel-of-modern-design-and-sustainability-7f8633da675b>
- [20] Mockmore, C. A.; Merryfield, F.: „The Banki Water Turbine“, Oregon State College, 1949.
- [21] Sivamani, S. i dr.: „Assessing small cross flow wind turbine for urban rooftop power generation“, u Lecture Notes in Electrical Engineering, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, str. 105–114, 2020.
- [22] Jakac, K.; i dr.: „Approximation of sea surface velocity field by fitting surrogate two-dimensional flow to scattered measurements“, 2024.
- [23] Kranjcević, L.: "Mehanika fluida, skripta za studente", Tehnički fakultet, Rijeka, 2020.
- [24] Chiam, H. W.; i dr.: „Numerical study of nanofluid heat transfer for different tube geometries – A comprehensive review on performance“, Elsevier *Ltd*, 2020.
- [25] „What  $y^+$  should I use? Part 1 - Understanding the physics of boundary layers“, s Interneta, pristupljeno 28.8.2024., [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/)
- [26] „An Internet Book on Fluid Dynamics“, s Interneta, pristupljeno 28.8.2024., <http://brennen.caltech.edu/fluidbook/basicfluidynamics/turbulence/lawofthewall.pdf>
- [27] Maric, T.; Mooney, K. G.; Höpken, J.: „The OpenFOAM Technology Primer (Version v2012)“, 2012.

- [28] „All About The Convergence Criteria“, s Interneta, pristupljeno 24.8.2024., <https://skill-lync.com/blogs/technical-blogs/cfd-all-about-the-convergence-criteria>.
- [29] Geuzaine, C.; Remacle, J.-F.: „Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities“, 2009.
- [30] „OpenFOAM“, s Interneta, pristupljeno 28.8.2024., <https://hr.m.wikipedia.org/wiki/OpenFOAM>.
- [31] Kochenderfer, M.J.; Wheeler, T. A: „Algorithms for Optimization“, MIT press, London, 2019
- [32] Yang, X.: „Engineering optimization“, Wiley, 2010.
- [33] Ahmad, M. F.; i dr.: „Differential evolution: A recent review based on state-of-the-art works“, *Alexandria Engineering Journal*, sv. 61, izd. 5, str. 3831–3872, 2022.
- [34] Storn, R.; Price, K.: „Differential Evolution-A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces“, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [35] Tan, Y.; Zhu, Y.: „Fireworks algorithm for optimization“, u *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, str. 355–364, 2010.

## Popis slika

Slika 2.1. Udio izvora obnovljive energije u bruto potrošnji električne energije u EU 2022. godine [6] .....	5
Slika 2.2. Globalni obrasci vjetra [8] .....	6
Slika 2.3. Razne vrste vjetroturbina [12].....	8
Slika 2.4. "Izvedbe vjetroturbina montiranih na krov kuće ili zgrade. Različita rješenja (gore prema dole) [15], [16], [17].....	10
Slika 2.5. Strata stambeni toranj s tri integrirane vjetroturbine [18].....	11
Slika 2.6. Bahrein world trade center [19] .....	11
Slika 2.7. Crossflow vjetroturbina: (a) shematski prikaz turbine i (b) prikaz toka zraka kroz turbinu .....	12
Slika 2.8. Dijelovi i struktura crossflow turbine .....	13
Slika 2.9. Načini montiranja crossflow turbine; vertikalno (lijevo) i horizontalno (desno). .....	13
Slika 3.1. Računalna složenost modela turbulencije .....	16
Slika 3.2. Shema graničnog sloja [25].....	17
Slika 3.3. Izgled mreže u blizini stijenke: (a) rješavanje viskoznog sloja i (b) modeliranje viskoznog sloja funkcijom zida [25] .....	18
Slika 3.4. Domena fluida: (a) kontinuirana domena protoka i (b) diskretizirana domena protoka .....	20
Slika 3.5. Shematski prikaz direktorija .....	22
Slika 3.6. Prikaz rezultata simulacije proveden u OpenFOAM-u pomoću Paraview [30] .....	22
Slika 4.1. Crossflow turbina postavljena na greben krova [17] .....	23
Slika 4.2. Prikaz geometrije promatranog problema: (a) prikaz cijele računске domene, (b) uvećani prikaz krova i (c) uvećani prikaz turbine i kućišta .....	24
Slika 4.3. Parametrizacija kućišta .....	25

Slika 4.4. Razne izvedbe kućišta i privodećeg lima .....	26
Slika 4.5. Parametri lopatice turbine .....	27
Slika 4.6. Razne izvedbe lopatica turbine .....	28
Slika 4.7. Numerička mreža: (a) prikaz cijele domene, (b) uvećani prikaz mreže na području krova, (c) detaljni prikaz mreže u području rotora .....	30
Slika 4.8. Postavljeni rubni uvjeti: (a) na području domene i (b) uvećani prikaz primijenjenih rubnih uvjeta kućišta i turbine .....	31
Tablica 4.1. Ulazni parametri simulacije.....	33
Slika 4.9. Konture tlaka: (a) u cijeloj domeni, (b) uvećani prikaz područja oko krova i (c) uvećani prikaz područja turbine.....	34
Slika 4.10. Konture brzina: (a) za cijelu domenu i (b) uvećani prikaz u području krova .....	35
Slika 4.11. Uvećani prikaz kontura brzina u području turbine uključujući vektore brzina.....	35
Slika 4.12. Reziduali za provedenu stacionarnu simulaciju.....	36
Tablica 5.1. Optimizacijske varijable .....	39
Slika 5.1. Shematski prikaz gibanja čestice kod optimizacije rojem čestica [32].....	42
Slika 5.2. Proces DE algoritma [33].....	43
Slika 5.3. Shematski prikaz toka FWA algoritma.....	44
Slika 5.4. Optimizacijski proces.....	45
Tablica 6.1. Zadani ulazni parametri .....	46
Slika 6.1. Graf konvergencije varijabli, funkcije fitness-a i funkcije cilja.....	47
Tablica 6.2. Vrijednosti optimizacijskih varijabli .....	48
Slika 6.2. Prikaz optimalnog dizajna: (a) uvećani prikaz kućišta, (b) detaljni prikaz geometrije lopatice i (c) prikaz kućišta i krova. ....	48
Slika 6.3. Dizajn kućišta i lopatica: (a) nakon prve iteracije i (b) nakon 250 iteracija .....	49
Slika 6.4. Konture tlaka na području cijele domene .....	49
Slika 6.5. Detalj kontura tlaka na području kućišta i turbine .....	50

Slika 6.6. Prikaz kontura brzina: (a) na području cijele domene i (b) na području oko krova .....	51
Slika 6.7. Prikaz kontura brzina i vektora brzina u području turbine.....	51
Slika 6.8. Prikaz kontura tlakova: (a) na cijeloj domeni i (b) u području turbine.....	53
Slika 6.9. Prikaz kontura brzina: (a) na cijeloj domeni i (b) uvećani prikaz u području turbine ..	54
Tablica 7.1. Usporedba dobivenih rezultata različitim optimizacijskim metodama .....	55
Slika 7.1. Prikaz kontura tlakova (lijevo) i brzina (desno) za dizajn dobiven (a) PSO metodom, (b) DE metodom i (c) FWA metodom.....	56

## Popis tablica

Tablica 4.1. Ulazni parametri simulacije.....	33
Tablica 5.1. Optimizacijske varijable .....	39
Tablica 6.1. Zadani ulazni parametri .....	46
Tablica 6.2. Vrijednosti optimizacijskih varijabli .....	48
Tablica 7.1. Usporedba dobivenih rezultata različitim optimizacijskim metodama .....	55



## **Sažetak**

U ovom radu predstavljena je optimizacija crossflow vjetroturbine u urbanom području, gdje tradicionalna rješenja za proizvodnju električne energije iz vjetra nailaze na značajne izazove. Glavni cilj bio je maksimizirati koeficijent snage turbine kombinacijom numeričkih simulacija i optimizacijskih algoritama. Za simulaciju strujanja korišten je software OpenFOAM, dok je GMSH korišten za izradu geometrije i numeričke mreže. Primijenjeni su optimizacijski algoritmi PSO, DE i FWA za optimizaciju ključnih parametara, poput kutova nagiba lopatica i konfiguracije kućišta. Rezultati su pokazali da se promjenom dizajna kućišta i lopatica može značajno poboljšati koeficijent snage. Daljnja istraživanja crossflow turbine mogla bi predstavljati održivo rješenje za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora u urbanim sredinama.

***Ključne riječi*** – Numerička simulacija, optimizacija, *crossflow* turbina, vjetar

## **Abstract**

In this masters thesis, the optimization of a crossflow wind turbine in an urban setting is presented, where traditional solutions for harvesting wind energy face challenges. The main goal was to maximize the power coefficient through a combination of CFD simulations and optimization methods. OpenFOAM was used to conduct flow simulations, while the geometry and mesh were created using GMSH. PSO, DE and FWA optimization algorithms were employed to optimize key parameters such as blade angles and housing configuration. The results showed a significant improvement in the power coefficient with the optimized design, indicating that with further investigation, crossflow wind turbines could be a viable option for use in urban environments.

***Keywords*** – CFD simulation, optimization, crossflow turbine, wind