

Analiza utjecaja geometrijskih parametara na strujanje fluida oko Savonious turbine

Briški, Ana

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:934688>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA UTJECAJA GEOMETRIJSKIH PARAMETARA NA
STRUJANJE FLUIDA OKO SAVONIUS TURBINE**

Rijeka, srpanj 2023.

Ana Briški

0069082237

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA UTJECAJA GEOMETRIJSKIH PARAMETARA NA
STRUJANJE FLUIDA OKO SAVONIUS TURBINE**

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Komentor: Dr. sc. Ivana Lučin

Rijeka, srpanj 2023.

Ana Briški

0069082237

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Sukladno članku 11. „Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija“ Tehničkog fakulteta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradila završni rad prema zadanom zadatku.

Rijeka, srpanj 2023.

Ana Briški

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Čariji i komentorici dr. sc. Ivani Lučin na strpljenju, pomoći i savjetima oko izrade ovog rada.

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na pruženoj podršci tijekom studiranja.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. VJETROENERGIJA	2
2.1. Vjetroturbine	3
2.2. Vjetroturbine s horizontalnom osi.....	6
2.3. Vjetroturbine s okomitom osi.....	8
2.4. Savonious turbina.....	10
3. RAČUNARSKA DINAMIKA FLUIDA (ENG. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS – CFD)	13
3.1. Osnovne jednađbe dinamike fluida	14
3.2. Navier – Stokesove jednađbe	16
3.3. Model turbulencije	16
3.4. k – epsilon model turbulencije	16
4. IZRADA GEOMETRIJE I NUMERIČKE MREŽE	17
4.1. Izrada geometrije.....	17
4.2. Izrada numeričke mreže	19
5. POSTAVKE ZA SIMULACIJU NESTACIONARNOG STRUJANJA.....	22
5.1. Kutna brzina i računanje vremenskog koraka.....	24
5.2. Koeficijent snage i torzije	25
6. REZULTATI	26
7. ZAKLJUČAK.....	37
LITERATURA.....	38

1. UVOD

Energija vjetra je obnovljiv izvor energije i odlična zamjena za fosilna goriva. Zadnjih desetljeća se sve više istražuje i razvija, posebno u Europskim zemljama. Teži se tome da se u budućnosti većina, ako ne i sva proizvedena energija dobiva upravo iz obnovljivih izvora energije. Cilj je smanjenje upotrebe fosilnih goriva čija rezerva postaje sve manja, kao i smanjenje negativnog utjecaja štetnih plinova, prvenstveno ugljičnog dioksida, koji uzrokuju zagađenje atmosfere i utječu na globalno zatopljenje. Energija vjetra se iskorištava pomoću vjetroturbina u vjetroparkovima. Postoji više izvedbi turbina, turbine s horizontalnom i vertikalnom osi vrtnje. Svaki tip turbine nije namijenjen za postavljanje na svakoj lokaciji. Na izbor vrste turbine utječe mnogo parametara kao što su nadmorska visina, brzina vjetra i oblik reljefa. Iako je najviši udio postavljenih vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje, nekad su one ograničene izvedbom koja utječe na njihovu efikasnost. U urbanim područjima i područjima sa niskim brzinama vjetra postavljaju se vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje. Neke od glavnih prednosti tog tipa turbina su jednostavna konstrukcija, niska cijena održavanja kao i niska razina buke koju proizvode. Upravo u ovu skupinu turbina pripada Savonius turbina koja će se analizirati u ovome radu.

U ovom radu napraviti će se analiza Savoniusove vjetroturbine u programskom paketu ANSYS. Promotrit će se različite izvedbe lopatica, provesti tri simulacije i analizirati dobiveni rezultati. U drugom poglavlju kratko su opisani obnovljivi izvori energije s naglaskom na energiju vjetra. Navedene su teorijske osnove vjetroturbina: glavni dijelovi, podjela i karakteristike svakog tipa turbina. Detaljno je opisana Savoniusova turbina. Opisan je princip rada i glavne prednosti i nedostaci Savonius turbine, te različite izvedbe i modifikacije. Treće poglavlje sadrži teorijske osnove računalne dinamike fluida i temeljne jednadžbe mehanike fluida. U četvrtom i petom poglavlju opisana je izrada numeričke mreže, rubni uvjeti i postavke za simulaciju u Fluentu. Šesto poglavlje sadrži dobivene rezultate (konture tlakova, vektore brzina i grafove koeficijenta momenta) za sve izvedbe lopatica Savonius turbine. Zadnje poglavlje sadrži zaključak.

2. VJETROENERGIJA

Tijekom posljednja dva desetljeća intenzivno se traži alternativa neobnovljivim izvorima energije u vidu obnovljivih izvora energije. Obnovljivi izvori energije su energija sunca, energija vjetra, energija vode i biomasa. Neiscrpan su i vrlo čist izvor energije. Imaju važnu ulogu u smanjenju emisije ugljičnog dioksida (CO_2) u atmosferu. Među dostupnim izvorima obnovljive energije, energija vjetra predstavlja inovativno rješenje.

Vjetar se javlja kao posljedica neravnomjernog zagrijavanja atmosfere, Zemljine površine i rotacije kada se zrak iz područja visokog tlaka kreće prema području niskog tlaka. Vjetar predstavlja jednu od najsigurnijih i najčišćih metoda za proizvodnju električne energije. Obnovljiv je izvor energije, ne uzrokuje nikakva zagađenja ni emisije štetnih plinova. Nedostatak vjetroelektrana je proizvodnja visoke razine buke. Trenutno je velik dio potencijala energije vjetra neiskorišten, samo se mali postotak energije dobiva na taj način.

Glavni parametri koji se prate su strujanje i brzina vjetra. Oni najviše ovise o geografskom području, vodi, reljefu i vegetaciji. Vjetro turbine se postavljaju na blago uzvišenim lokacijama s konstantnom brzinom vjetra, bez većih prepreka koje bi ometale strujanje zraka.

Prema izvoru [2], Europa je vodeća u svijetu po udjelu energije koju dobiva od vjetra. Dobiva 17% energije od ukupno potrebne iz vjetroelektrana, 13% više nego prije pet godina. Najviše postavljenih vjetroelektrana u Europi imaju Norveška, Belgija, Finska, Portugal, Danska, Poljska i Nizozemska. Hrvatska još uvijek najveći udio energije dobiva iz elektrana na fosilna goriva i hidroelektrana. Tek u zadnjem desetljeću počinje koristiti potencijal vjetroelektrana. Najpovoljnije lokacije za izgradnju vjetroelektrana u Hrvatskoj nalaze se na otocima i u priobalju. U Hrvatskoj se trenutno nalaze 23 vjetroelektrane ukupno instalirane snage od 790 MW. Sastoji se od ukupno 325 vjetroagregata koji godišnje isporučuju 1788 GW električne energije. Jedna od prvih vjetroelektrana izgrađenih u Hrvatskoj nalazi se na otoku Pagu. Sastoji se od 7 vjetroagregata ukupne snage 5.95. MW. Postavljena je na brdu Ravno gdje prosječna godišnja brzina vjetra iznosi od 6 do 6.5 m/s.

U 2021. godini su u pogonu bile 23 vjetroelektrane ukupno instalirane snage od 801.75 MW s odobrenom snagom u iznosu od 794.95 MW, te dodatne 3 koje su u probnom radu ili procesu izgradnje. Te godine se proizvelo ukupno 2071.47 GW energije. Ostale vjetroelektrane u Hrvatskoj se nalaze u Zadarskoj, Šibensko-kninskoj, Ličko-senjskoj, Splitsko-dalmatinskoj i Dubrovačko-neretvanskoj županiji [3].

2.1. Vjetroturbine

U današnje doba kada se želi smanjiti ovisnost o fosilnim gorivima i suočiti se s izazovima klimatskih promjena, vjetroturbine su se istaknule kao ključna tehnologija. Vjetroturbine su visoko učinkovite, obnovljive i lako dostupne, te predstavljaju snažan potencijal za održivu energetska budućnost.

Vjetroturbine su uređaji koji pretvaraju kinetičku energiju vjetra u mehanički rad koji se koristi za pogon električnih generatora. Razvile su se iz vjetrenjača. Glavni dijelovi vjetroturbine (slika 2.1.) su stup, gondola, rotor s lopaticama, kočioni sustav, generator, prijenosnik snage, sustav za zakretanje, upravljački sustav i anemometar.

Stup može biti različitih konstrukcijskih izvedbi. Razlikujemo konusne, teleskopske, cjevaste i rešetkaste čelične stupove. Najčešće se koriste cjevasti stupovi, čelični ili betonski, zbog visoke čvrstoće i otpornosti na vibracije. Promjer rotora određuje visinu stupa, što je stup viši, rotor može iskoristiti veće brzine vjetra i time proizvesti više električne energije.

Gondola služi kao kućište za generatorski sustav i nalazi se na vrhu stupa. Štiti ga od negativnih utjecaja okoliša i smanjuje buku nastalu radom generatorskog sustava.

Rotor s lopaticama može vršiti regulaciju snage na način da se regulacija kuta vrši zakretanjem lopatica u optimalni položaj ili korištenjem aerodinamičkog efekta poremećenosti trokuta brzina. Većina turbina ima sustav s dvije ili tri lopatice. Lopatice mogu biti sa krilcima ili sa zakretnim vrhovima i imaju ulogu sekundarnog kočionog sustava u slučaju kvara mehaničke kočnice ograničavaju brzinu vrtnje.

Kočioni sustav ima ulogu usporavanja i kočenja rotora kada vjetar prijeđe maksimalnu vrijednost brzine. Također ima ulogu održavanja konstantne brzine vrtnje za koju je vjetroturbina projektirana.

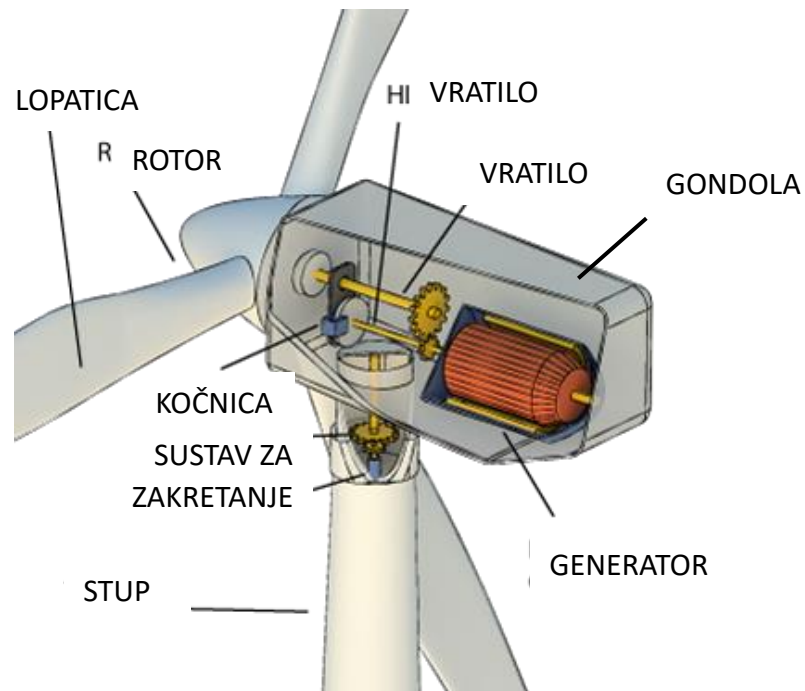
Generator je pogonjen rotorom, kočnicama i prijenosnikom snage. Prema vrsti struje koju proizvode mogu se podijeliti na istosmjerne i izmjenične. Istosmjerni generatori imaju problema s pouzdanošću, pa se najčešće koriste izmjenični.

Prijenosnik snage spaja sporookretnu i brzo okretnu osovinu te povećava brzinu vrtnje rotora s oko 30 – 60 okretaja u minuti na brzinu od 1000 – 1800 okretaja u minuti potrebnu za stvaranje električne energije. Zbog visoke cijene i težine prijenosnika, istražuju se načini za izravan pogon.

Sustav za zakretanje služi za zakretanje turbinsko – generatorskog sustava. Vršiti ga motor preko pužnog prijenosa i na njemu se nalazi kočnica koja onemogućuje zakretanje kod naleta vjetra. Ovaj sustav se nalazi ispod kućišta vjetroturbine, na vrhu stupa.

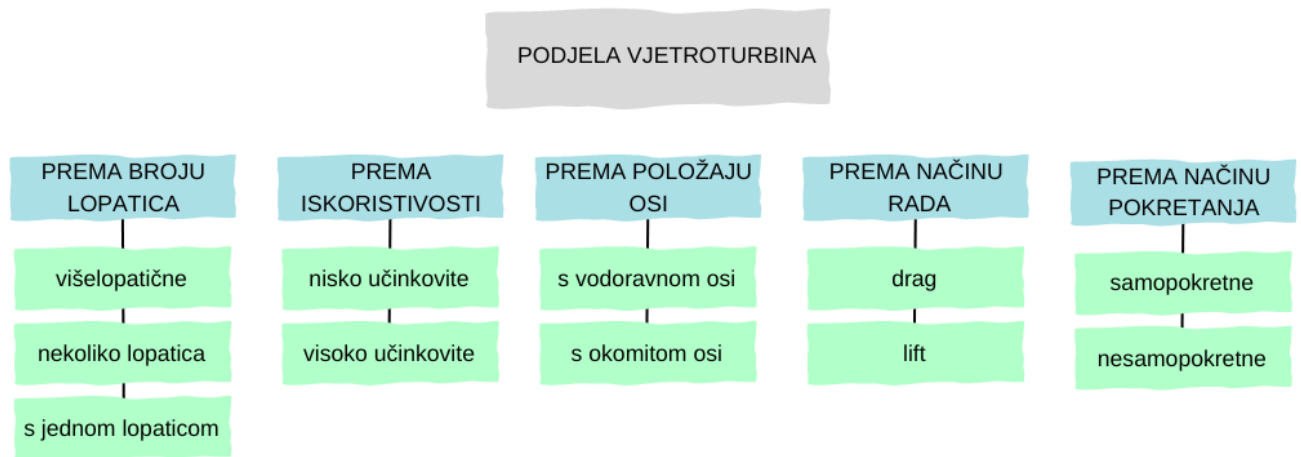
Upravljački sustav je zadužen za cjelokupno upravljanje i nadziranje rada vjetroturbine.

Anemometar je uređaj za mjerenje brzine vjetra. Izmjerene vrijednosti šalje sustavu za nadzor i kontrolu.



Slika 2.1. Glavni dijelovi vjetroturbine

Vjetroturbine se mogu podijeliti prema brzini vjetra za koji su dimenzionirane, prema broju lopatica, prema iskoristivosti, prema položaju osi, prema načinu rada i prema načinu pokretanja (slika 2.2.)



Slika 2.2. Podjela vjetroturbina

2.2. Vjetroturbine s horizontalnom osi

Os rotacije horizontalnih turbina vodoravna je u odnosu na tlo i gotovo paralelna sa protokom fluida. Danas najčešće korištene vjetroturbine su upravo HAT vjetroturbine (*eng. Horizontal Axis Turbine*), slika 2.3. Broj lopatica rotora ovisi o primjeni i režimu rada, a uvelike utječe na učinkovitost i snagu vjetroturbine. HAT turbine se klasificiraju prema broju lopatica na turbine s jednom, dvije, tri ili više lopatica. Turbine s jednom lopaticom su zbog uštede na materijalu relativno jeftinije od izvedbi s više lopatica i gubici otpora na površini lopatice su manji. No ta izvedba nije najbolja zbog problema s balansiranjem i izgledom [5]. Većina modernih vjetroelektrana koristi HAT s tri lopatice. Izvedbe s više lopatica (slika 2.4) koriste se za specifične primjene poput crpljenja vode.



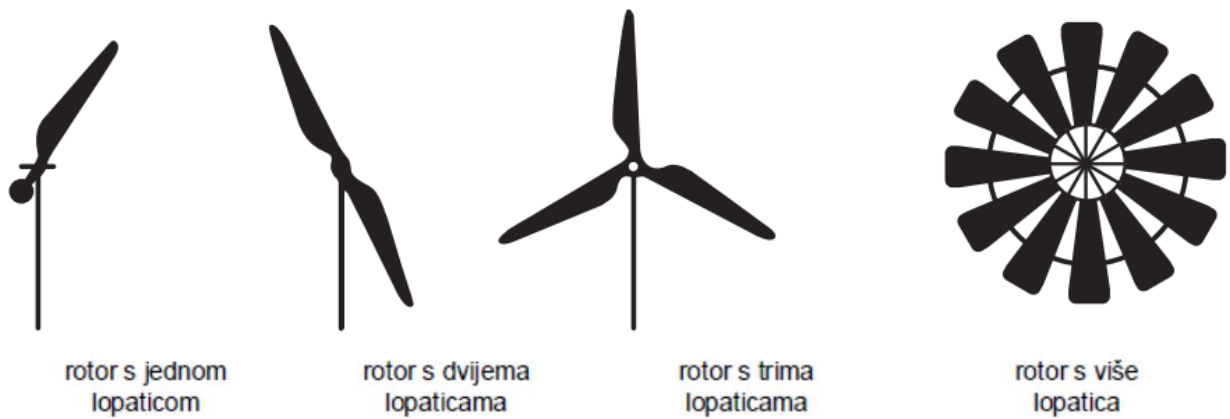
Slika 2.3. Horizontalni tip vjetroturbine

Prednosti HAT turbina:

- visoka efikasnost i pouzdanost
- postižu visoku izlaznu snagu
- turbine se pokreću same
- mogućnost zakretanja lopatica u smjeru vjetra

Nedostaci HAT turbina:

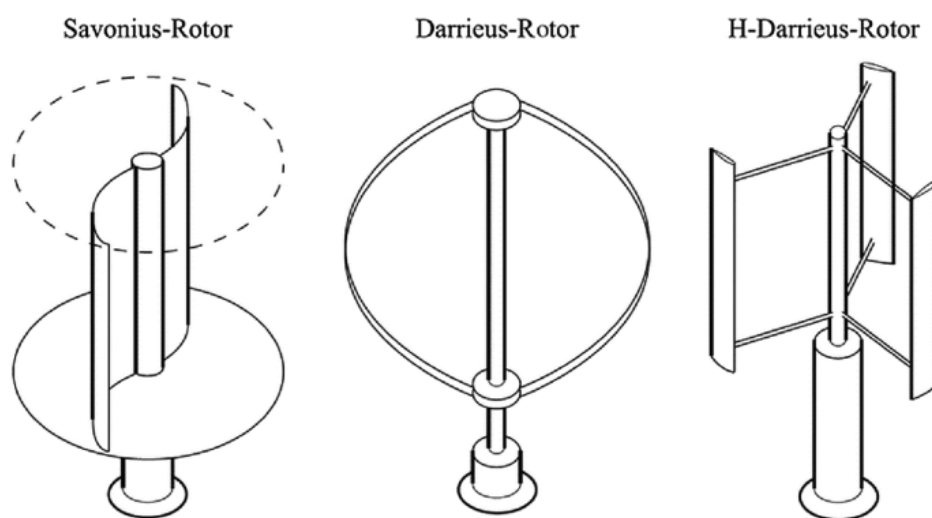
- visoka razina buke
- masivna konstrukcija
- teška instalacija i održavanje zbog visine
- iskoristive su u uvjetima stalnog vjetra velike brzine



Slika 2.4. Horizontalne vjetroturbine s različitim brojem lopatica

2.3. Vjetroturbine s okomitom osi

Vjetroturbine s okomitom osi vrtnje (*eng. Vertical Axis Turbines - VAT*), su turbine čija je os rotacije okomita na tlo i gotovo okomita na smjer protoka fluida. To im omogućuje „hvatanje“ vjetra iz bilo kojeg smjera i ne zahtijevaju pogone za skretanje kako bi se orijentirale prema vjetru. To ih čini konstrukcijski jednostavnijim od HAT i smanjuje troškove održavanja. Izložnije su turbulentnim strujanjima zraka zbog čega se više i brže troše. Jednostavnost i niska cijena konstrukcije VAT (slika 2.5) omogućuje njihovo postavljanje na zemlju i krovove kuća, a zbog relativno niske razine buke su pogodnije za naseljena područja [5].



Slika 2.5. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje

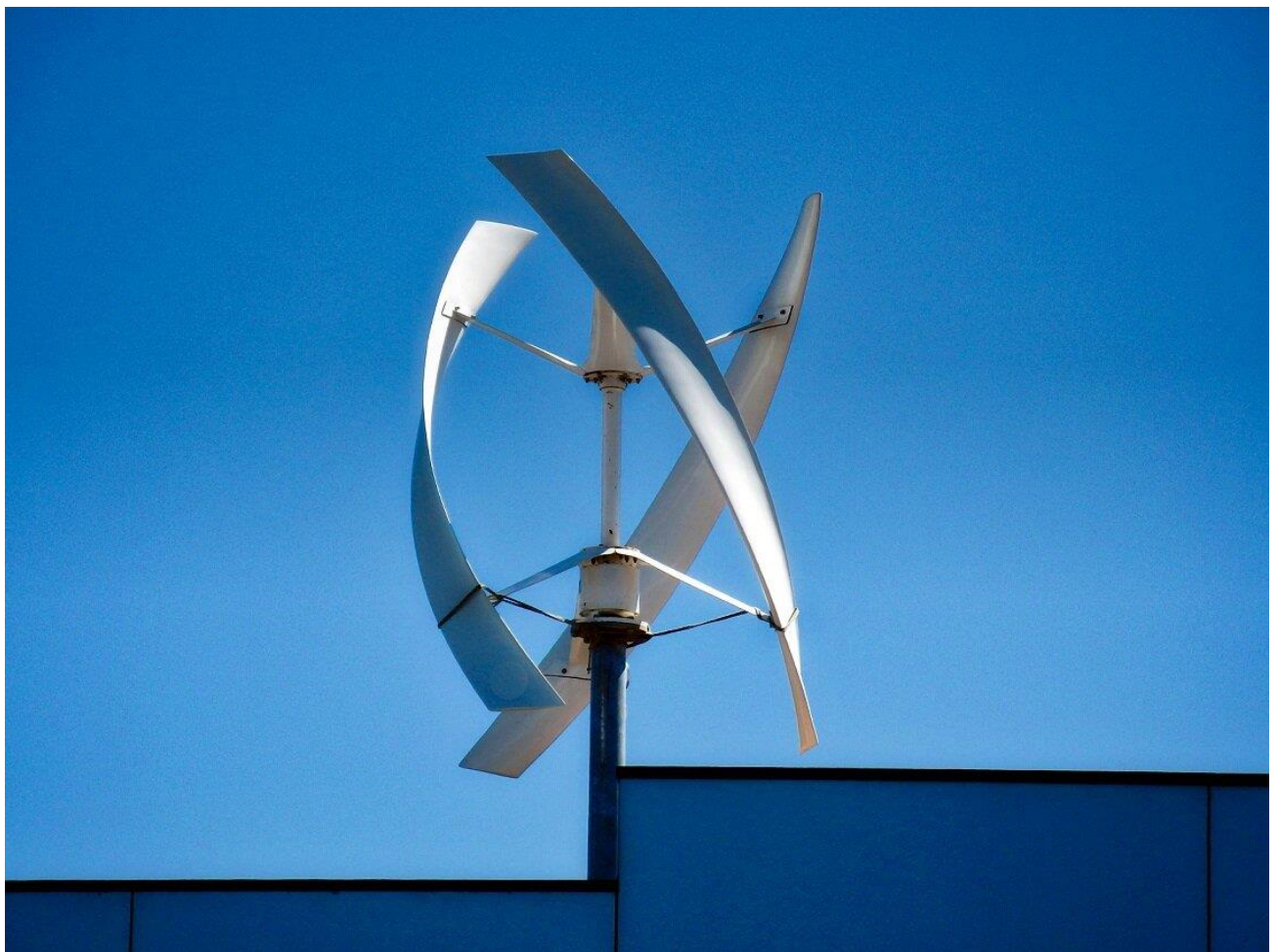
Glavne prednosti VAT turbina:

- ne moraju biti usmjerene prema vjetru
- ne zahtijevaju pogone za skretanje
- uređaji za kontrolu turbine i generator mogu biti smješteni na tlu
- dobra iskoristivost za niske brzine vjetra
- jednostavna i jeftina konstrukcija
- niska cijena održavanja

Glavni nedostaci VAT turbina:

- niska brzina rotacije koja za posljedicu ima visok moment vrtnje i visoko dinamičko opterećenje na lopatice, nizak koeficijent snage
- ne pokreću se same, osim konstrukcija pokretanih otporom (Savonius turbina), pa nisu prikladne za samostalnu primjenu
- visina tornja je niska pa ne mogu iskoristiti veće brzine vjetra na visinama
- u prosjeku proizvode manje energije od HAT turbina (niža iskoristivost)

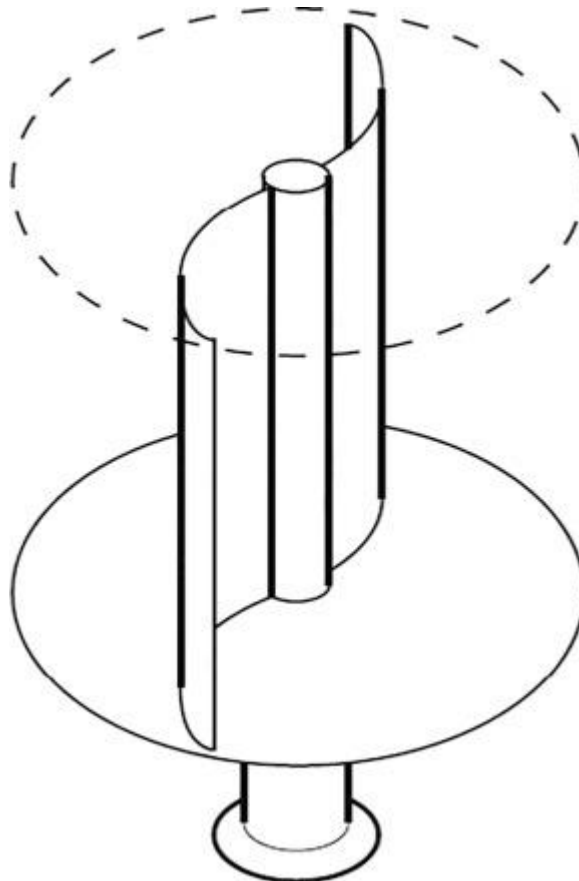
Na slici 2.6. prikazana je jedna od modifikacija Darrieusove turbine.



Slika 2.6. Darrieus vjetroturbina sa spiralnim lopaticama

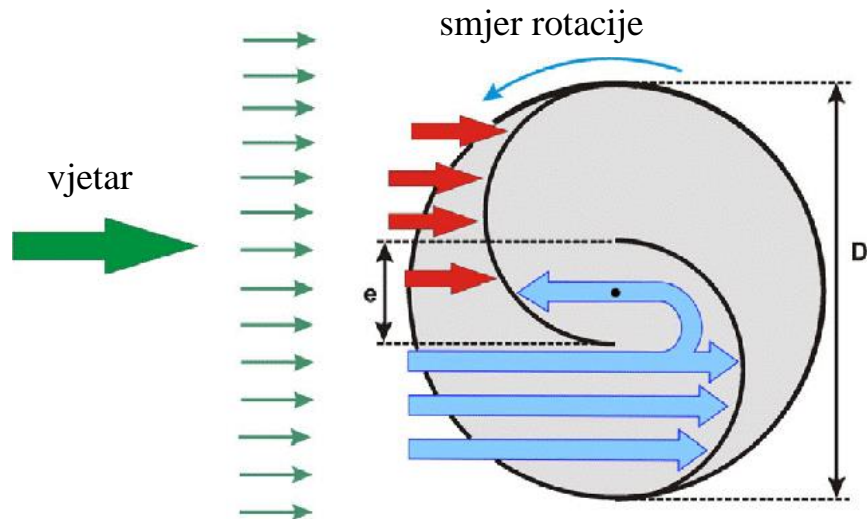
2.4. Savonius turbina

Savoniusova turbina pripada skupini turbina s vertikalnom osi vrtnje koju je izmislio finski inženjer Sigurd J. Savonius 1922. godine po kome je i nazvana. Poznata je po jednostavnom dizajnu i sposobnosti učinkovitog rada pri niskim brzinama vjetra [5].



Slika 2.7. Savonius turbina

Savoniusova turbina se sastoji od dvije ili više lopatica postavljenih okomito na os rotacije. Lopatice su zakrivljene i u poprečnom presjeku nalikuju na slovo „S“. Turbina radi na principu otpora, što znači da izvlači energiju iz vjetra stvarajući otpor na lopaticama. Kada vjetar puše prema lopaticama, stvara se razlika tlaka između unutarnje i vanjske strane lopatica. Brzina vjetra koji struji preko vanjske strane lopatice ima veću brzinu i niži tlak, dok vjetar koji struji preko unutarnje strane lopatice ima manju brzinu i veći tlak. Rotacijom se mehanička energija prenosi na središnju osovinu koja se dalje koristi za pogon generatora električne struje ili bilo kojeg drugog opterećenja.



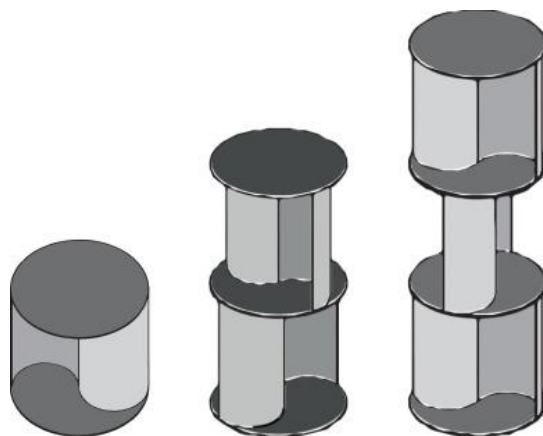
Slika 2.8. Princip rada Savonius turbine

Glavne prednosti Savoniusove turbine su jednostavna i jeftina konstrukcija i održavanje, a zbog vertikalne osi rotacije ne zahtijevaju usmjeravanje prema vjetru. To ih čini pogodnima za korištenje u urbanim sredinama i lokacijama s promjenjivim smjerom vjetra. Savoniusove turbine imaju niži stupanj učinkovitosti od ostalih turbina [5].

Nedostaci Savoniusove turbine su relativno niska učinkovitost i potreba za dodatnim pogonom za pokretanje. Turbine su instalirane na kraćim stupovima i stoga ne mogu iskoristiti veće brzine vjetra na većim visinama. Zbog „punije“ konstrukcije potrebno je više materijala za izradu po jedinici nazivne snage [5].

Postoji više izvedbi turbine, kao što su izvedba s dvije ili tri lopatice, mogu se izvesti na više etaža (slika 2.9.) ili kombinirati s drugim vrstama vjetroturbina s vertikalnom osi. Postoji hibridna verzija turbine koja je kombinacija Savoniusove turbine i zakrivljenih aeroprofila Darrieusove turbine. Oba tipa turbina imaju svoje prednosti i mane, a njihovom kombinacijom iskorištavaju prednosti pojedinog tipa turbine. Lopatice Savoniusove turbine omogućuju pokretanje turbine pri niskim brzinama vjetra, dok lopatice Darrieusove turbine omogućuju veću efikasnost kod većih brzina vrtnje koje taj tip turbine može postići.

Također, postoje modifikacije Savoniusove turbine koje se koriste u vodi (slika 2.10). Pogodne su za instalaciju na rijekama sa mirnijim tokom vode i u morima. Nedostatak im je niska efikasnost i iskoristivost zbog čega nisu prvi izbor za instalaciju u vodi. Također, pretvorba Savoniusove turbine u vodnu turbinu još uvijek je u fazi istraživanja.



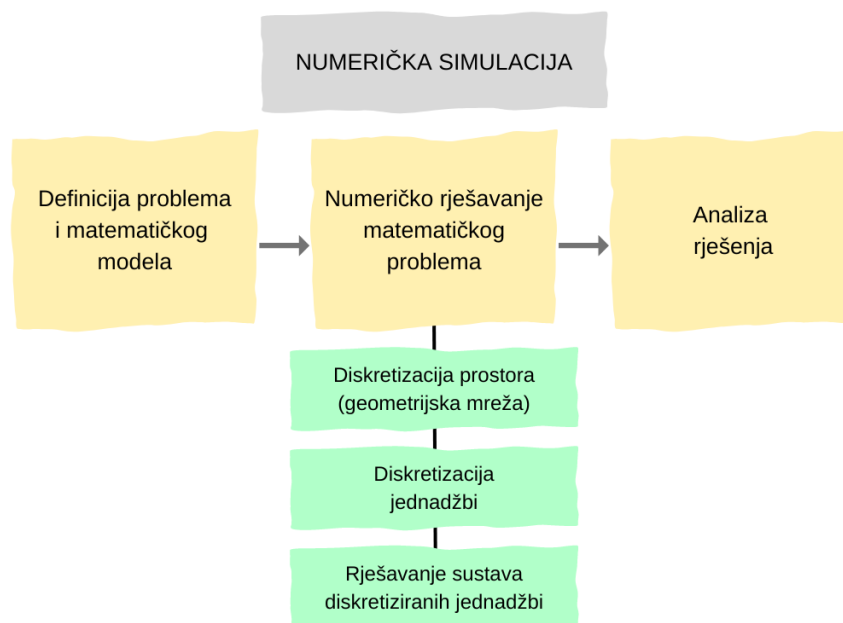
Slika 2.9. Izvedba Savonius turbine na više etaža

3. RAČUNARSKA DINAMIKA FLUIDA (ENG. COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS – CFD)

Računarska dinamika fluida (RDF) je grana mehanike fluida koja se bavi analizom strujanja fluida i prijenosom topline. Problem dinamike fluida se javlja u tome što je većina strujanja fluida opisana parcijalnim diferencijalnim jednadžbama koje nemaju općeg analitičkog rješenja. Navier – Stokesove jednadžbe moguće je analitički riješiti samo za određen broj slučajeva i to za laminarno strujanje. Nekada su se takvi problemi mogli riješiti samo eksperimentalnim metodama koje su davale ograničen broj povratnih informacija o promatranoj pojavi, a razvoj računala omogućio je rješavanje kompleksnih matematičkih modela numeričkim metodama. Računarska dinamika fluida povezuje teorijski i eksperimentalni pristup rješavanju problema. Daje veći broj informacija od eksperimentalnog pristupa, no dobivene informacije nisu uvijek pouzdane i primjena je ograničena na slučajeve za koje postoji dobar matematički model. Za probleme za koje ne postoji dobar matematički model, potreban je eksperimentalni pristup čiji rezultati pomažu u razvitku i poboljšanju postojećih matematičkih modela [7].

Numeričke simulacije se provode u tri koraka (slika 3.1.). Prvi korak je definicija problema i odabir odgovarajućeg matematičkog modela. Matematički model je prikazan sustavom parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Zatim slijedi numeričko rješavanje matematičkog modela. U ovom dijelu se radi diskretizacija prostora (izrada geometrijske mreže), diskretizacija jednadžbi i rješavanje sustava diskretiziranih jednadžbi. Drugi naziv za diskretizirani prostor je proračunska domena. Proračunska domena se podijeli na određen broj malenih volumena kojima se dodijeli jedan ili više čvorova u kojima se računaju tražene vrijednosti iz jednadžbi matematičkog modela. Zatim se diskretizacija jednadžbi izvodi pomoću nekoliko metoda: metodom konačnih volumena, metodom konačnih razlika, metodom konačnih elemenata, itd. Njome se dobiva sustav linearnih ili nelinearnih algebarskih jednadžbi, što ovisi o vrsti polazne diferencijalne jednadžbe. Zadnji korak je rješavanje dobivenih algebarskih jednadžbi. Nakon dobivenog rješenja slijedi analiza koja podrazumijeva prikaz skalarnih, vektorskih i tenzorskih polja, sila, momenata i po potrebi dijagramski prikaz tih veličina.

Računalni i eksperimentalni pristup rješavanju problema su komplementarni. Najčešće se računalni pristup koristi za dobivanje rezultata, a eksperimentalni za njihovu validaciju.



Slika 3.1. Shematski prikaz postupaka izvođenja numeričke simulacije

3.1. Osnovne jednačbe dinamike fluida

Strujanje fluida opisano je zakonom očuvanja mase, zakonom ravnoteže količine gibanja, zakonom ravnoteže momenata količine gibanja i zakonom ravnoteže energije (prvi zakon termodinamike) za materijalni volumen [8]. Materijalni volumen (MV) je sustav beskonačnog broja beskonačno malenih materijalnih čestica i u svakom vremenskom trenutku se sastoji od tih istih čestica. Tijekom strujanja fluid se deformira, a s njime se deformira i materijalna površina koja je nepoznata funkcija vremena. Materijalni volumen nije pogodan u inženjerstvu i umjesto njega se uvodi pojam kontrolnog volumena.

Kontrolni volumen (CV) je proizvoljno maleni volumen promjenjive mase i ograničen je kontrolnom površinom. Kontrolna površina (CS) omeđuje dio prostora i ovisno o želji promatrača može se gibati ili mirovati. Svrha kontrolnog volumena je izračunavanje fizikalnih svojstva fluida koji kroz njega prolaze. Pojmovi kontrolnog volumena i površine pripadaju Eulerovom opisu strujanja fluida, dok materijalni volumen pripada Lagrangeovom opisu strujanja [8].

Materijalni i kontrolni volumen povezujemo Reynoldsovim transportnim teoremom. Teorem nam omogućuje transformaciju zakona očuvanja za materijalni volumen na kontrolni volumen. Daje vezu između vremenske promjene neke fizikalne veličine unutar gibajućeg deformabilnog materijalnog volumena i promjenjivog svojstva u vremenu unutar nepokretnog kontrolnog volumena nepromjenjivog oblika i površine.

Kod transformacije se promatra trenutak koincidencije kada se materijalni i kontrolni volumen preklapaju. Nakon toga materijalni volumen „odstruji“, dok kontrolni volumen miruje ili se giba po volji promatrača.

Zakon očuvanja mase (jednadžba kontinuiteta) govori da je brzina promjene mase kontrolnog volumena jednaka nuli. Matematički zapisano:

$$\int_{CV} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{CS} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (3.1)$$

Zakon ravnoteže količine gibanja govori da je brzina promjene količine gibanja kontrolnog volumena i protok količine gibanja kroz kontrolnu površinu jednaka sumi vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na kontrolni volumen. Matematički zapisano:

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} dV + \int_{CS} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \int_{CV} \vec{f} \rho dV + \int_{CS} \vec{\sigma}_n dS \quad (3.2)$$

Zakon ravnoteže momenta količine gibanja govori da brzina promjene momenta količine gibanja kontrolnog volumena i protok momenta količine gibanja kroz kontrolnu površinu jednaka je sumi momenata vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na kontrolni volumen. Matematički zapisano:

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{r} \times \vec{v}) dV + \int_{CS} (\rho \vec{r} \times \vec{v})(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \sum \vec{r} \times \vec{F} \quad (3.3)$$

Zakon ravnoteže energije za kontrolni volumen može se napisati u obliku:

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho e) dV + \int_{CS} \rho \left(\frac{p}{\rho} + e \right) (\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \dot{Q}_H + \dot{W}_S \quad (3.4)$$

gdje je e totalna energija po jedinici mase, \dot{Q}_H toplina i \dot{W}_S rad tangencijalnih sila predan sustavu.

3.2. Navier – Stokesove jednadžbe

Navier – Stokesove jednadžbe opisuju gibanje nestlačivih viskozni fluida. Povezuju tlak, brzinu, temperaturu i gustoću fluida u gibanju. Sastoje se od parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koje su nerješive analitičkim putem. Sadrže vremenski zavisne jednadžbe očuvanja mase, tri vremenski zavisne jednadžbe ravnoteže količine gibanja i vremenski zavisne jednadžbe ravnoteže energije.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x \quad (3.5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho f_y \quad (3.6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.7)$$

3.3. Model turbulencije

Turbulentno strujanje je najčešći oblik strujanja u prirodi i pojavljuje se kod strujanja kod kojih Reynoldsov broj iznosi više od 4000. Opisuje ga nemirno i kaotično strujanje naizgled slučajno gibanje fluida s velikim udjelom vrtloženja. Uglavnom se razvije kada brzina strujanja dosegne kritičnu brzinu koja ovisi o gustoći i viskoznosti fluida, te obliku tijela oko kojeg fluid opstrujava [7].

Modeli turbulencije dijele se s obzirom na red korelacije za koju se rješava transportna jednadžba na modele prvog, drugog i trećeg reda. U ovom radu je korišten k - epsilon model turbulencije koji pripada modelima prvog reda i opisan je sa dvije diferencijalne jednadžbe.

3.4. k – epsilon model turbulencije

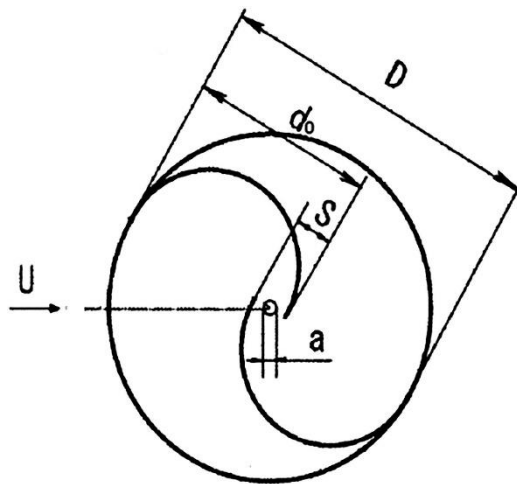
k – epsilon model turbulencije je jedan od najkorištenijih modela za analizu turbulentnog strujanja. Glavne karakteristike k – epsilon modela su robusnost, ekonomičnost i dovoljna točnost za različite vrste turbulentnog strujanja. Temelji se na pretpostavci da je strujanje turbulentno i da su efekti molekularne viskoznosti zanemarivi. Zbog toga je ispravan samo za potpuno razvijena turbulentna strujanja [7].

4. IZRADA GEOMETRIJE I NUMERICKE MREŽE

2D geometrija rotora turbine izrađene su u ANSYS programskom paketu po shemi (slika 4.1.). Geometrija rotora je jednostavna, sastoji se od dvije polucilindrične lopatice koje se gibaju uslijed razlike sile otpora na zahvaćenoj i nezahvaćenoj lopatici.

4.1. Izrada geometrije

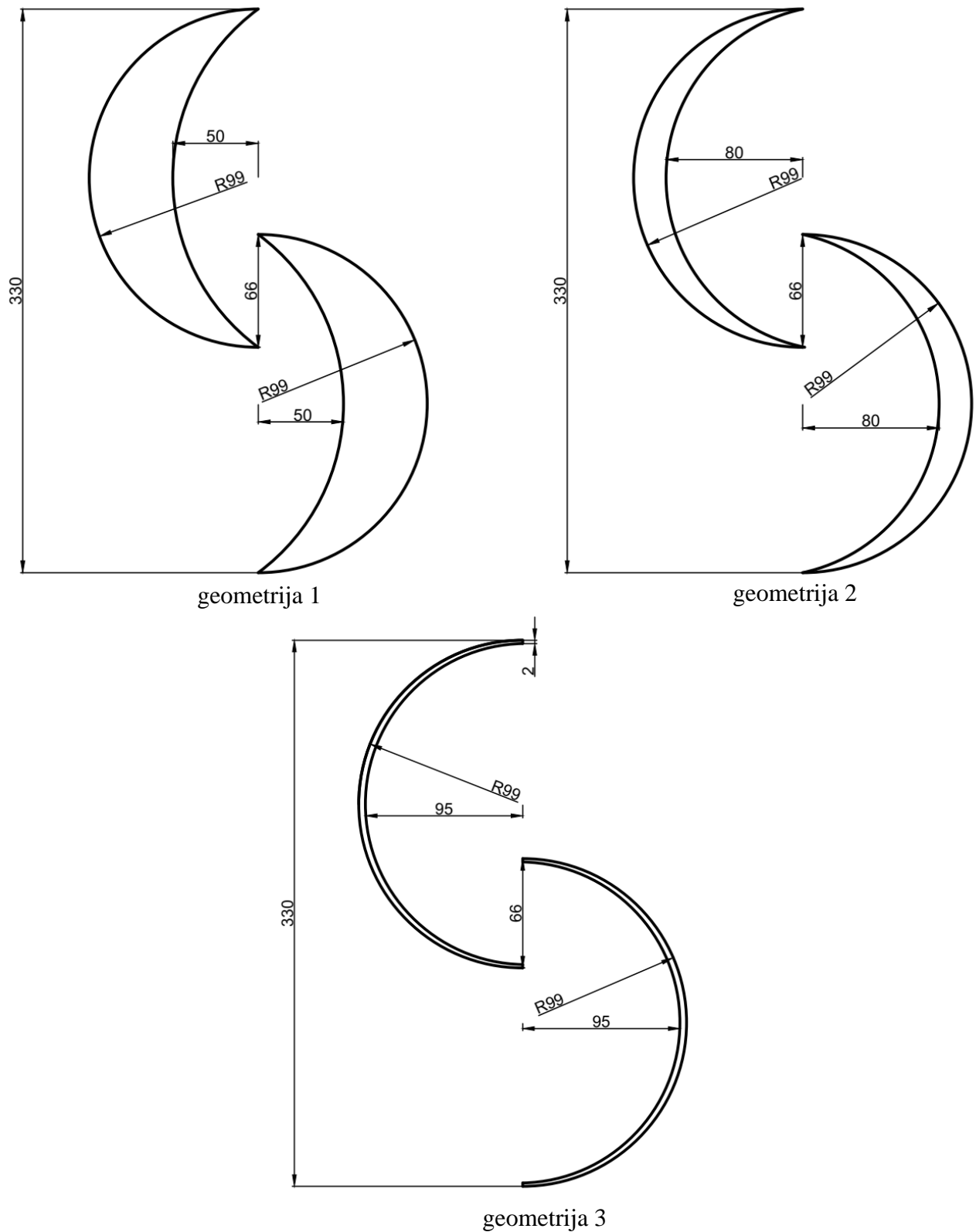
Geometrijski parametar koji se tijekom analize mijenjao je debljina lopatica. Analiza je izvršena za tri različite debljine lopatica i provodila se za turbulentno strujanje. Cilj je odrediti utjecaj oblika lopatica na koeficijent snage. Na slici 4.1. prikazana je shema Savoniusove turbine gdje D predstavlja promjer lopatica, d_0 polumjer lopatica i S preklapajući dio lopatica. U ovome radu zanemaren je utjecaj centralne osovine. Dimenzije rotora, Tablica 1, uzete su iz literature [1].



Slika 4.1. Shema rotora Savonius turbine [1]

Tablica 4.1 Dimenzije Savonius rotora u mm [1]

d_0	D	e	S	t
198	330	0.2	66	2

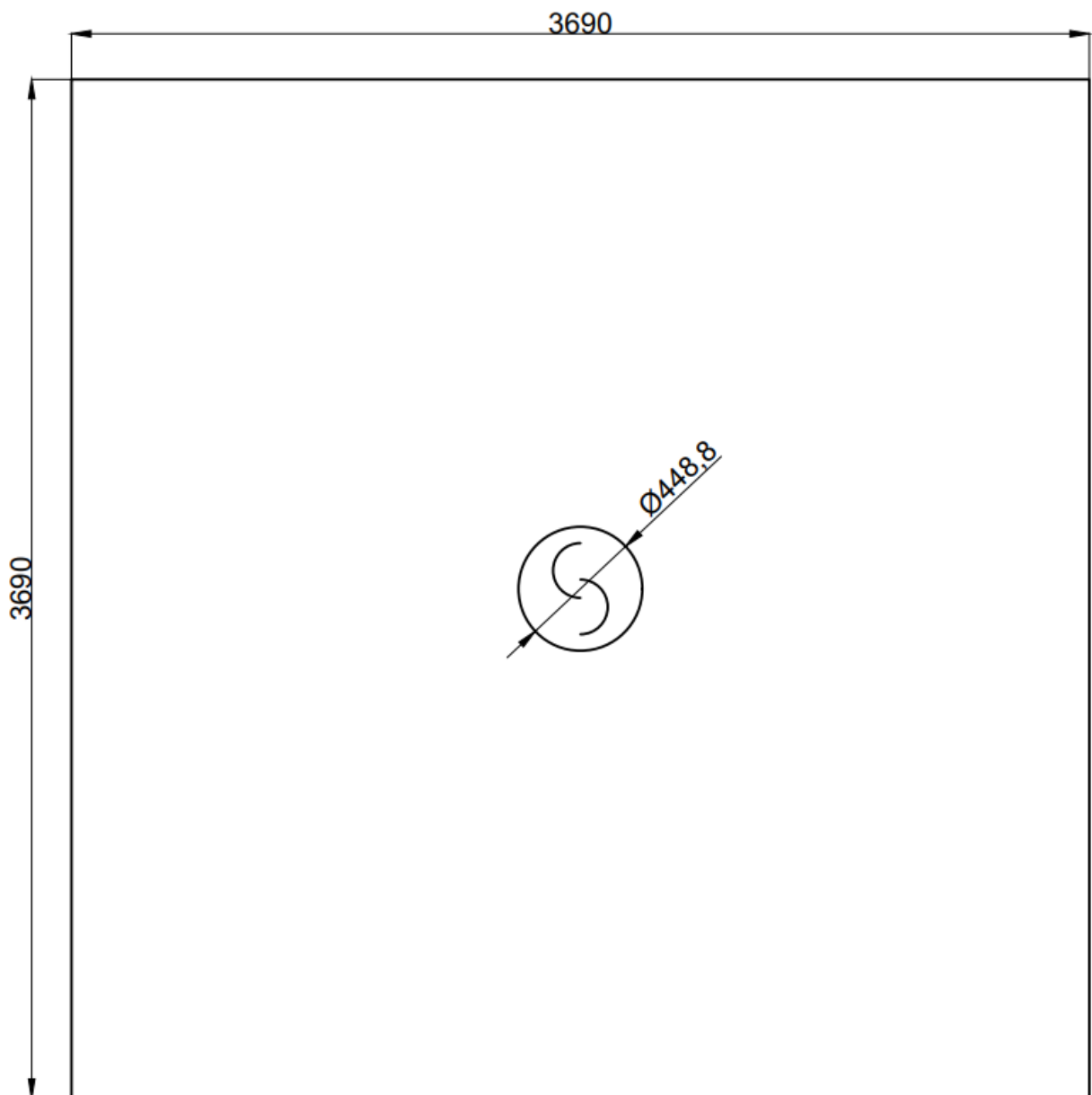


Slika 4.2. Dimenzije lopatica (geometrija lopatica 1, 2 i 3)

4.2. Izrada numeričke mreže

Nakon definiranja geometrije slijedi diskretizacija cijele domene. Numerička mreža se sastoji od fiksne (mirujuće) domene i rotirajuće domene s lopaticama. Međusobno su povezane „interfaceom“ koji omogućuje pravilan protok fluida između dvije domene.

Mirujuća domena (slika 4.3.) je dovoljno velika da se izbjegne mogući utjecaj izabranih rubnih uvjeta. Promjer rotirajuće domene je 1.36 puta veći od promjera turbine i iznosi 0.4488 m.

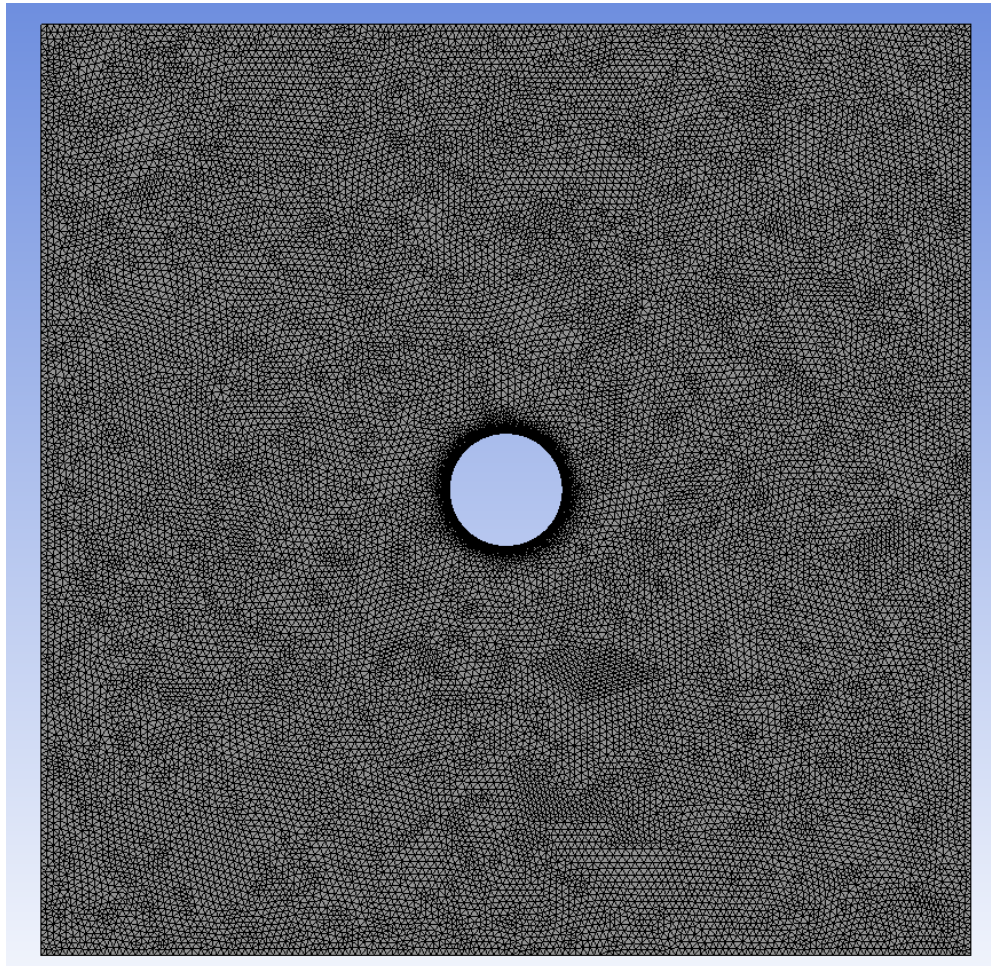


Slika 4.3. Geometrija mirujuće domene

Domena je diskretizirana metodom konačnih volumena. Metoda konačnih volumena (MKV) je numerička metoda za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednačbi na način da domenu podijeli u puno malih i nepreklapajućih volumena.

Domena se može diskretizirati strukturiranom ili nestrukturiranom numeričkom mrežom. Strukturirana mreža je složena na način da je svaka unutarnja ćelija domene spojena s jednakim brojem susjednih ćelija, dok to nije slučaj kod nestrukturirane mreže. U ovom radu obje domene su omrežene nestrukturiranom mrežom (slika 4.4. i 4.5.).

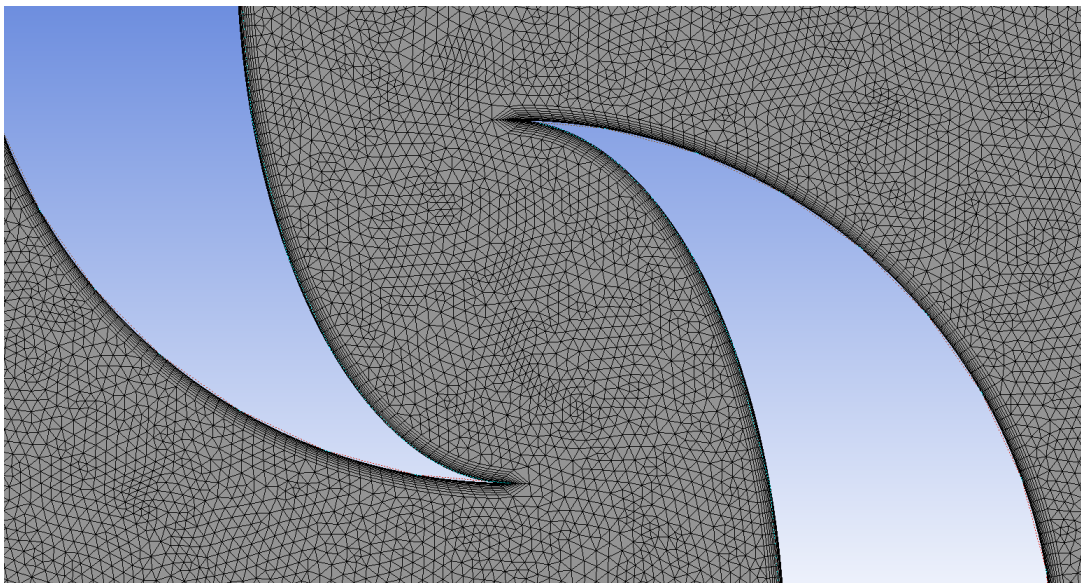
Veličina elemenata u mirujućoj domeni je 0.025 m, dok kod ugušćenja mreže prema rotirajućoj domeni iznosi 0.0025 m. Veličina elemenata u rotirajućoj domeni iznosi 0.0025 m. Oko rubova lopatica (slika 4.6.) napravljena je inflacija rasta 1.2 u 10 slojeva s visinom prvog elementa od 0.00012 m.



Slika 4.4. Numerička mreža mirujuće domene



Slika 4.5. Numerička mreža rotirajuće domene

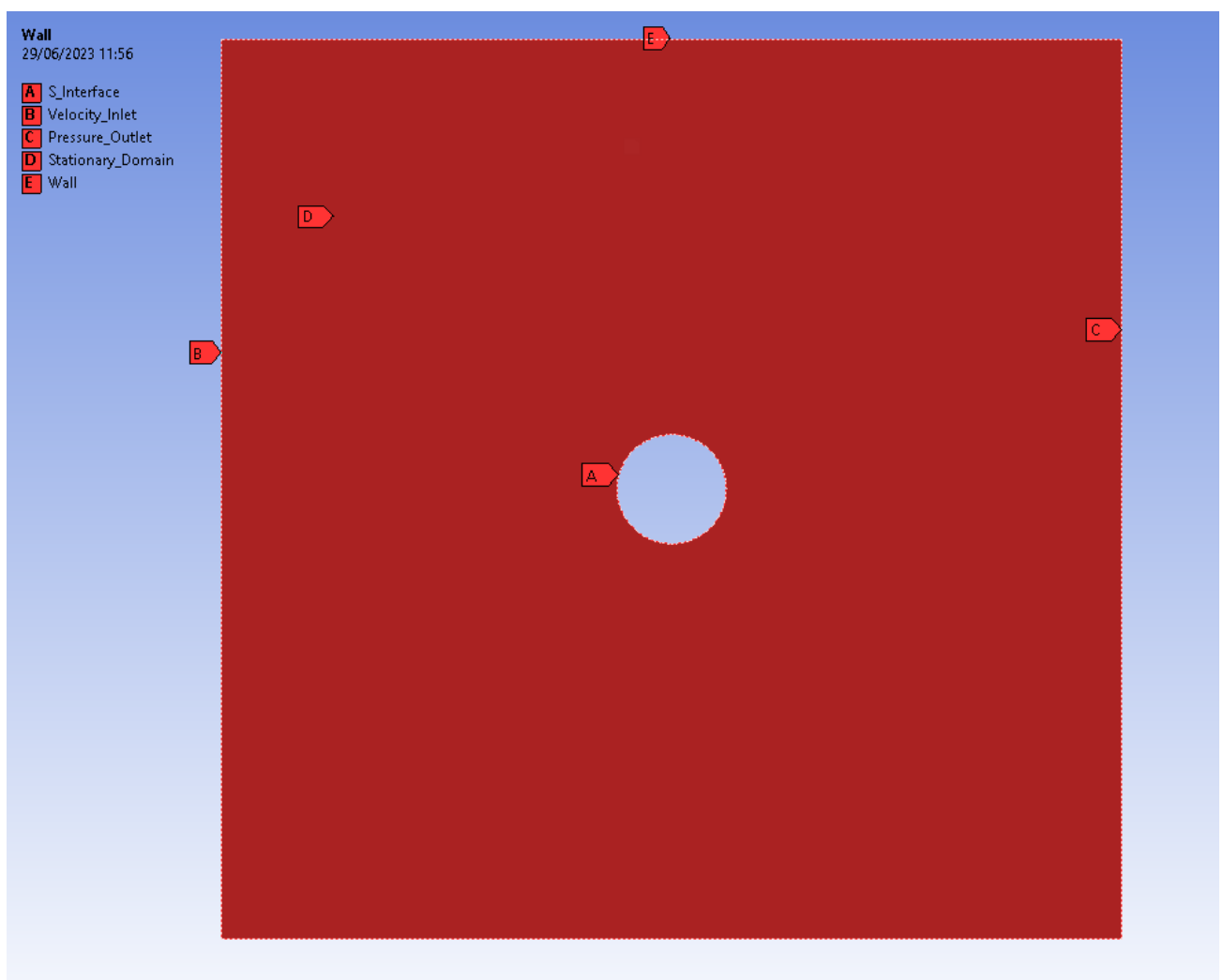


Slika 4.6. Numerička mreža oko ruba lopatica

5. POSTAVKE ZA SIMULACIJU NESTACIONARNOG STRUJANJA

Za provođenje analize u Fluentu potrebno je pravilno postaviti rubne uvjete, rješavače i metode. Za simulaciju rotacije rotora korištena je „sliding mesh“ tehnika. Numerička mreža rotora rotira konstantnom brzinom vrtnje, a položaj ovisi o vremenu. Simulacija je provedena kao nestacionarno strujanje.

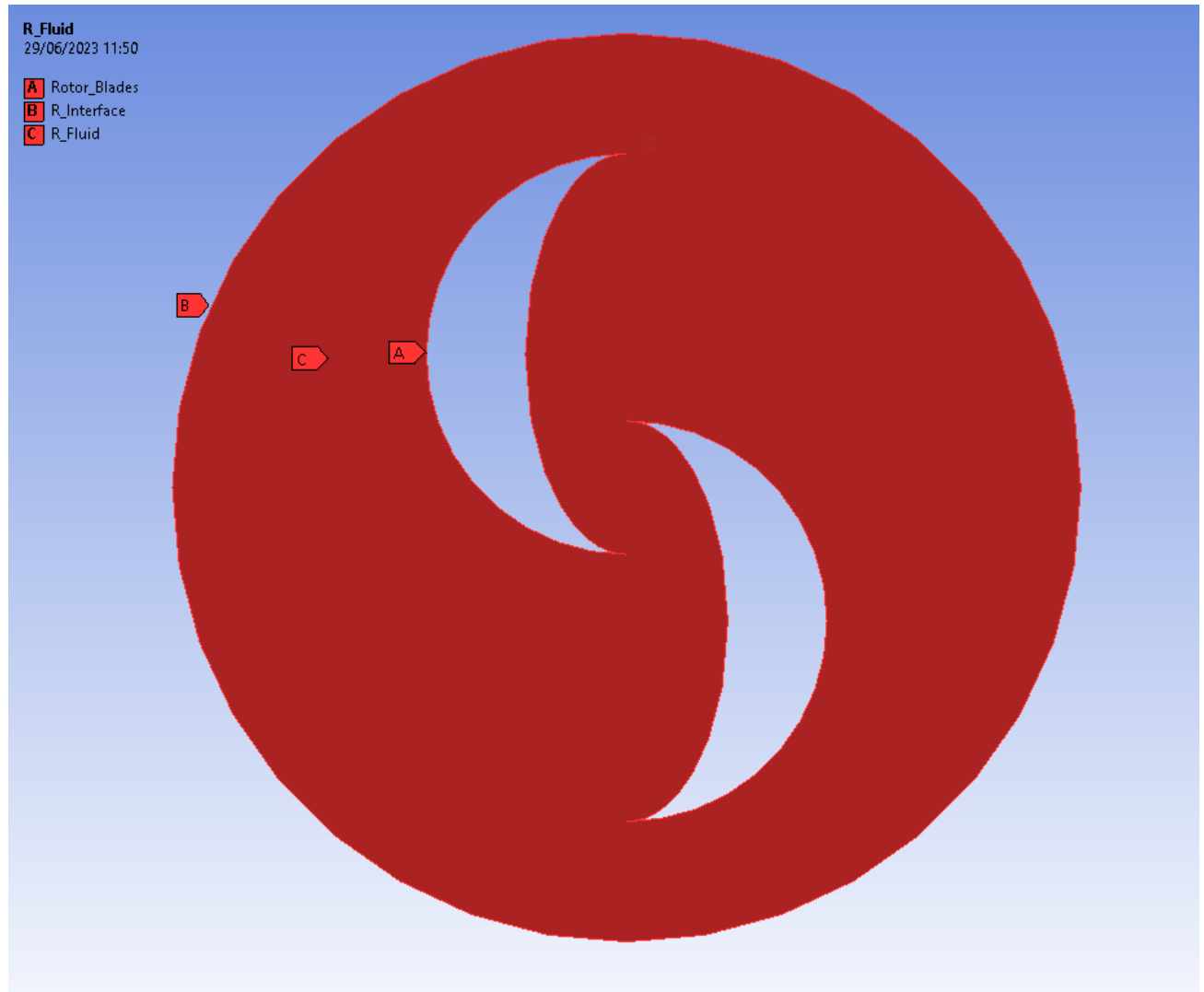
Mirujuća domena (slika 5.1.) se sastoji od „velocity inleta“ sa zadanom ulaznom brzinom vjetra od 9 m/s i „pressure outleta“. Gornja i donja granica domene definirane su kao „symmetry“ što znači da je kroz te dijelove domene slobodan protok zraka.



Slika 5.1. Rubni uvjeti za mirujući dio domene

Rotirajući dio domene (slika 5.2.) se sastoji od lopatica na kojima je postavljen rubni uvjet zida i „no slip“ uvjet što znači da je brzina uz stjenku jednaka nuli.

Granice rotirajuće i stacionarne domene definirane su kao S_Interface i R_Interface. Na prijelazu iz mirujuće u rotirajuću domenu napravljeno je ugušćenje mreže.



Slika 5.2. Rubni uvjeti za rotacijski dio domene

5.1. Kutna brzina i računanje vremenskog koraka

Parametar koji povezuje brzinu vjetra i kutnu brzinu turbine je Tip Speed Ratio, λ (5.1.):

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{U} \quad (5.1)$$

R – radijus [m]

ω – kutna brzina [rad/s]

U – brzina vjetra [m/s]

Iz [1] su preuzete vrijednosti brzine vjetra od $U = 9$ m/s, Tip Speed Ratio koji iznosi $\lambda = 0.7$ i kutna brzina turbine, $\omega = 365$ okr/min .

Budući da se rješenje mijenja ovisno o vremenu, simulacija zahtjeva vremenski ovisno računanje. Vremenski korak ($\Delta t|_{1^\circ}$) ovisi o kutnoj brzini i kutnom pomaku turbine (5.2). Vremenski korak se definira kao (5.4).

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (5.2)$$

$\Delta\varphi$ [rad] – kutni pomak

$$\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{\omega} \quad (5.3)$$

$$\Delta t|_{1^\circ} = \frac{1}{\omega(\text{rps}) \cdot 360} \quad (5.4)$$

Tablica 5.1. Ulazne vrijednosti za simulaciju

Promjer, D [m]	0.330
Brzina vjetra [m/s]	9
Kutna brzina [okr/min]	365
Vremenski korak [s]	0.000457

5.2. Koeficijent snage i torzije

Cilj ovog rada je odrediti koeficijent momenta za svaku debljinu lopatica. Izraz za koeficijent snage glasi:

$$C_p = \frac{P_t}{P_a} = \frac{M\omega}{\frac{1}{2}\rho AU^3} \quad (5.5)$$

C_p – koeficijent snage

M [Nm] - moment

ρ [kg/m³] – gustoća zraka

A [m²] - površina

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2}AL\rho v^3} \quad (5.6)$$

C_m [-] – koeficijent momenta

v [m/s] – brzina vjetra

Pomoću izraza (5.6), koeficijent snage se može izraziti kao:

$$C_p = \frac{C_m \frac{1}{2}\rho v^2 AL\omega}{\frac{1}{2}A\rho v^3} = C_m \frac{\omega L}{v} \quad (5.5)$$

Kod 2D problema vrijednost duljine L jednaka je radijusu R pa izraz glasi:

$$C_p = C_m \frac{\omega R}{v} \quad (5.6)$$

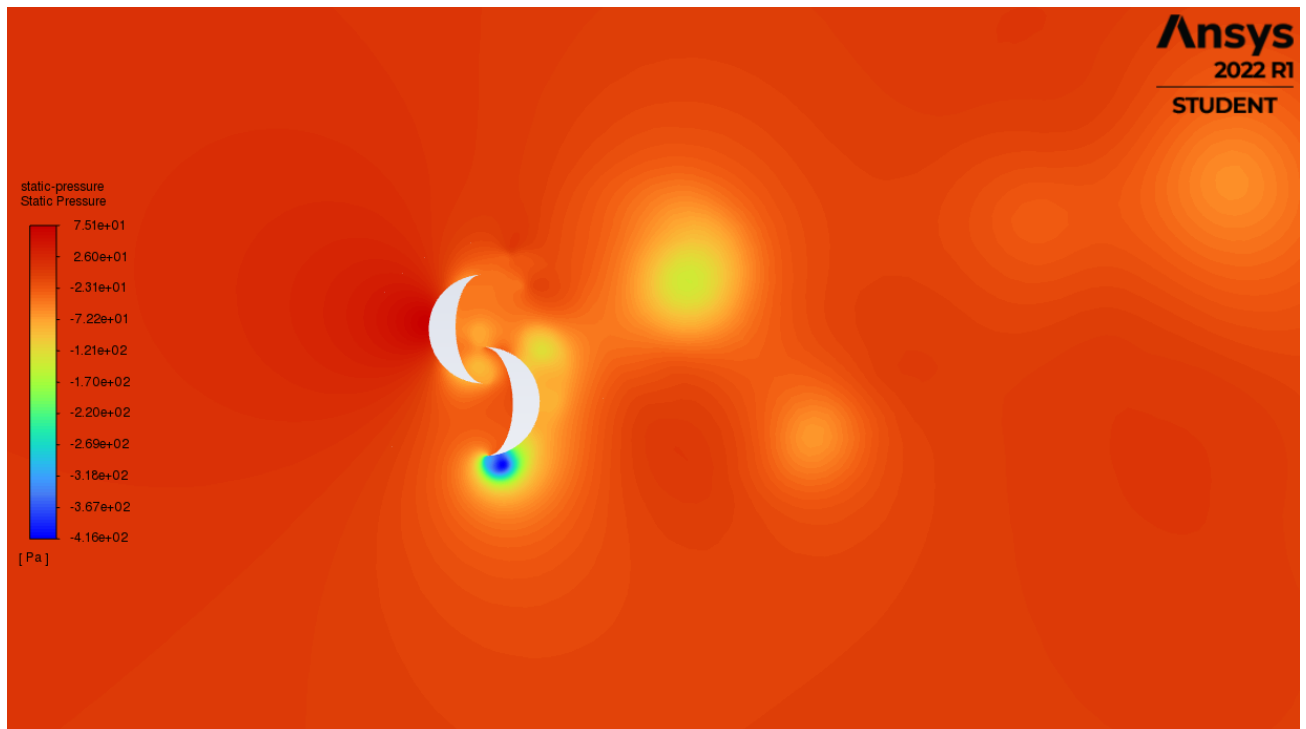
Kada se uvrsti izraz za Tip Speed Ratio (5.1) dolazimo do jednostavnog izraza:

$$C_p = C_m \lambda \quad (5.7)$$

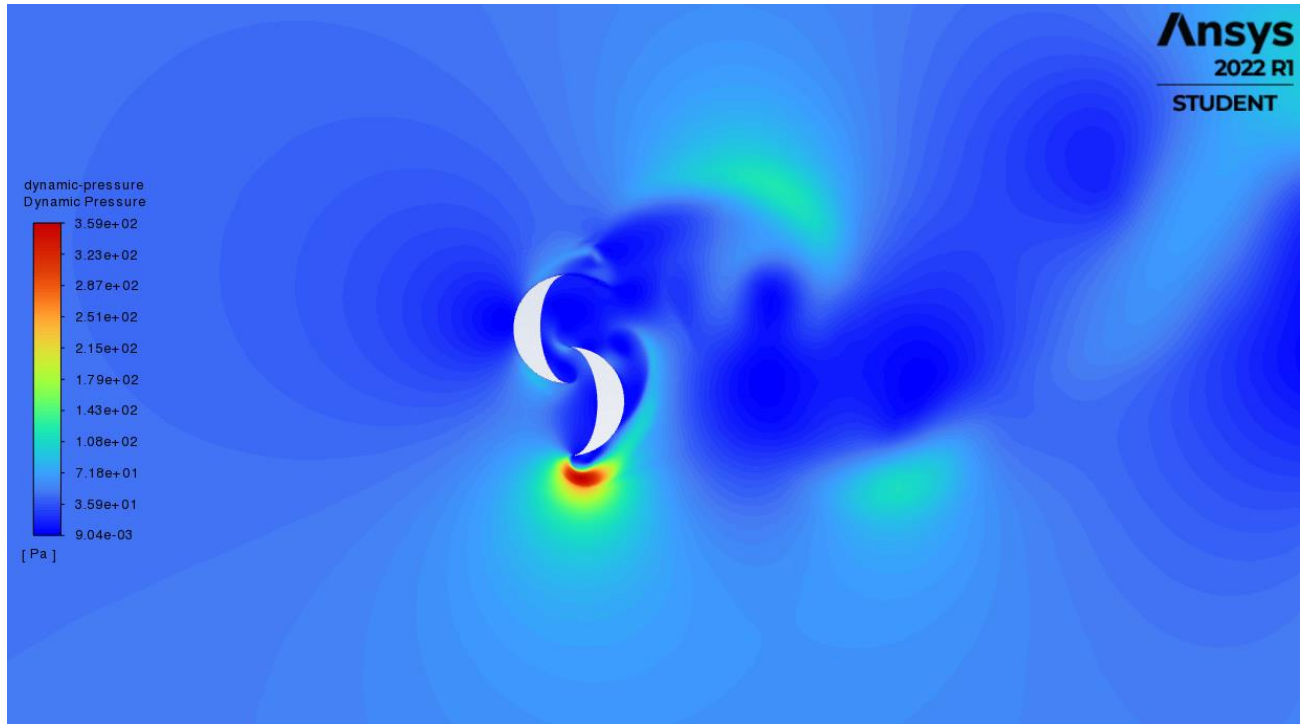
6. REZULTATI

Na slikama su prikazani rezultati provedene simulacije za tri različite geometrije turbine. Simulacija je provedena za 1 sekundu ili 6 okretaja turbine.

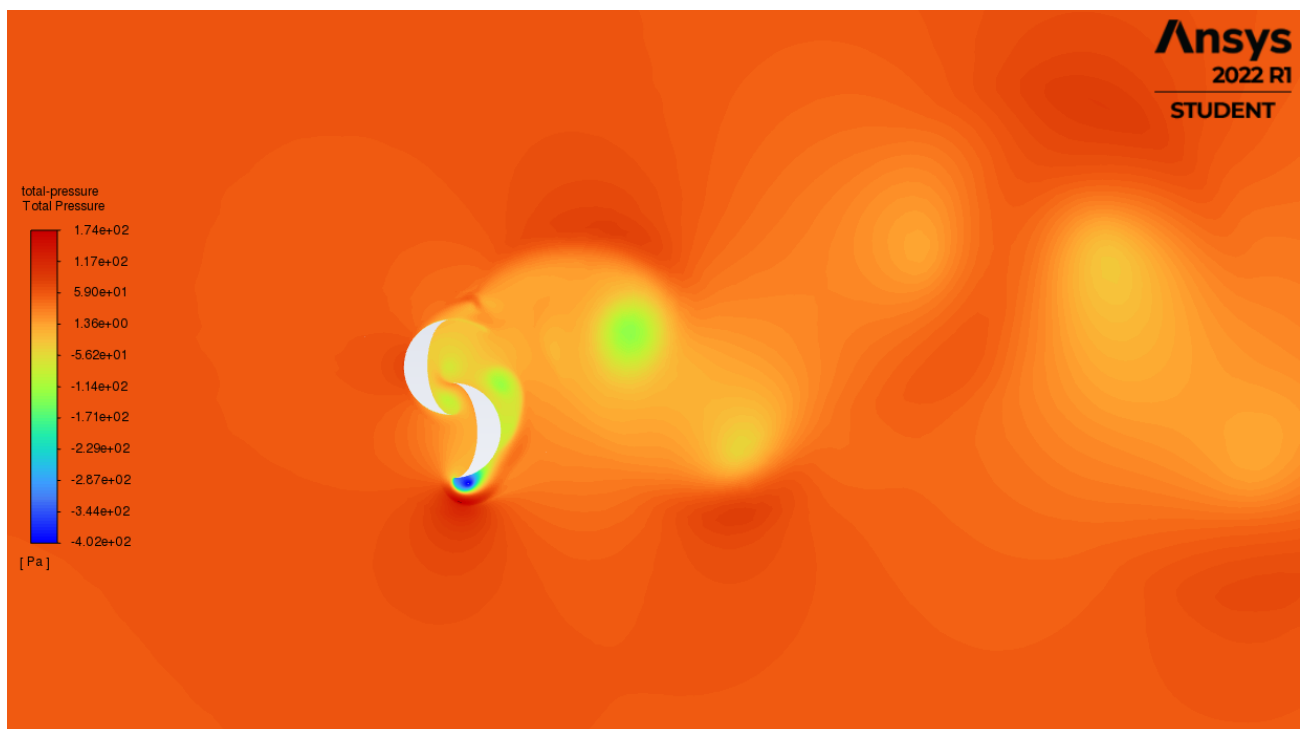
Na sljedećim slikama prikazane su konture statičkog (slika 6.1.), dinamičkog (slika 6.2.) i totalnog (slika 6.3.) tlaka te vektori brzina (slika 6.4.) za geometriju lopatica 1.



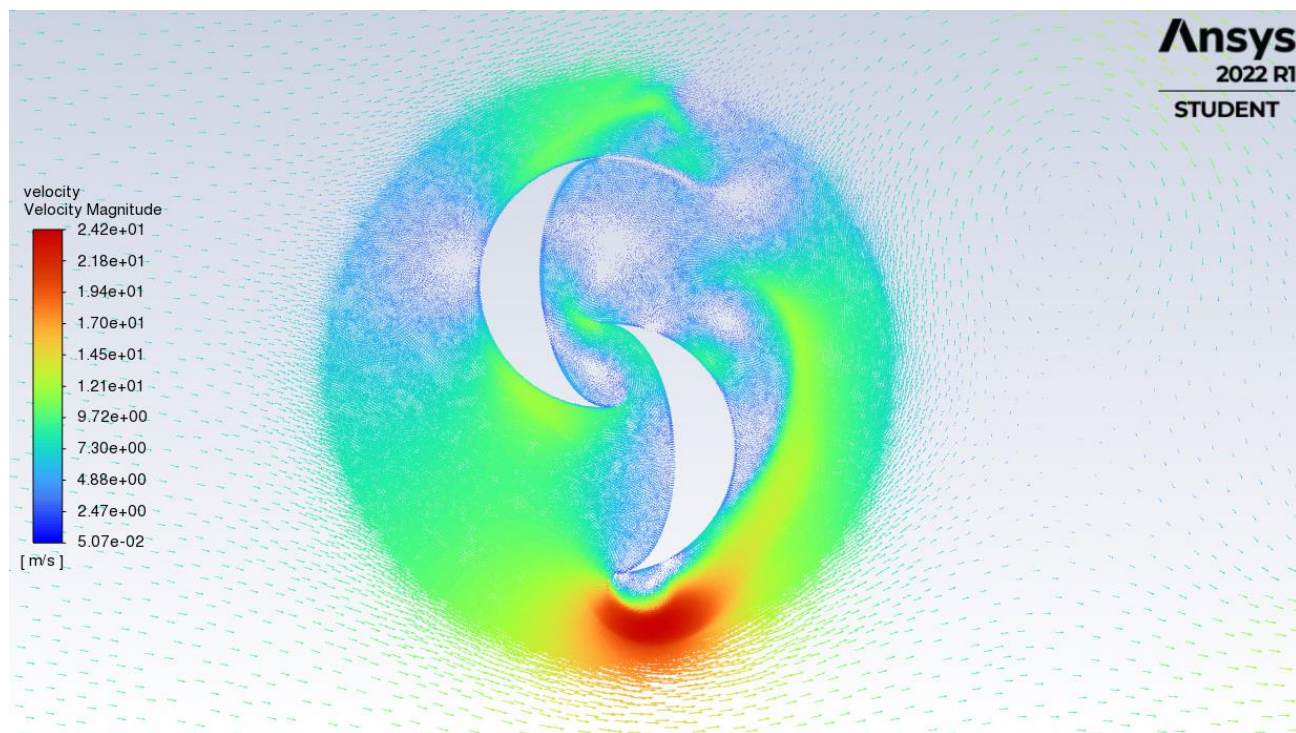
Slika 6.1. Konture statičkog tlaka geometrije lopatica 1



Slika 6.2. Konture dinamičkog tlaka geometrije lopatica 1

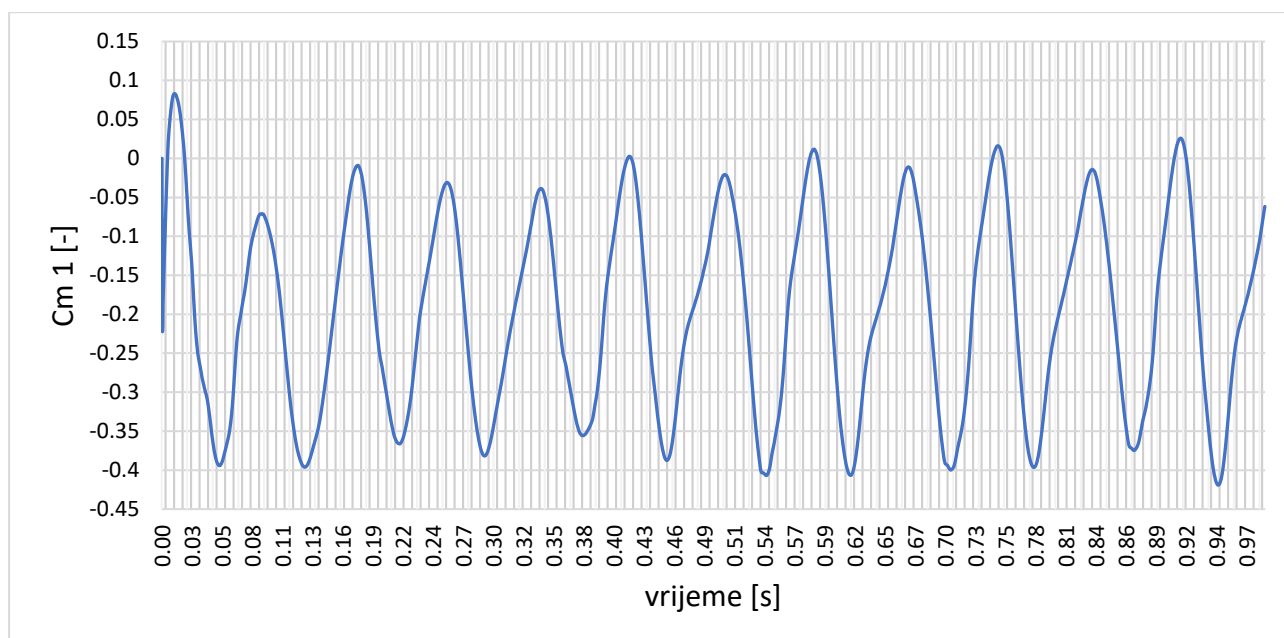


Slika 6.3. Konture totalnog tlaka geometrije lopatica 1



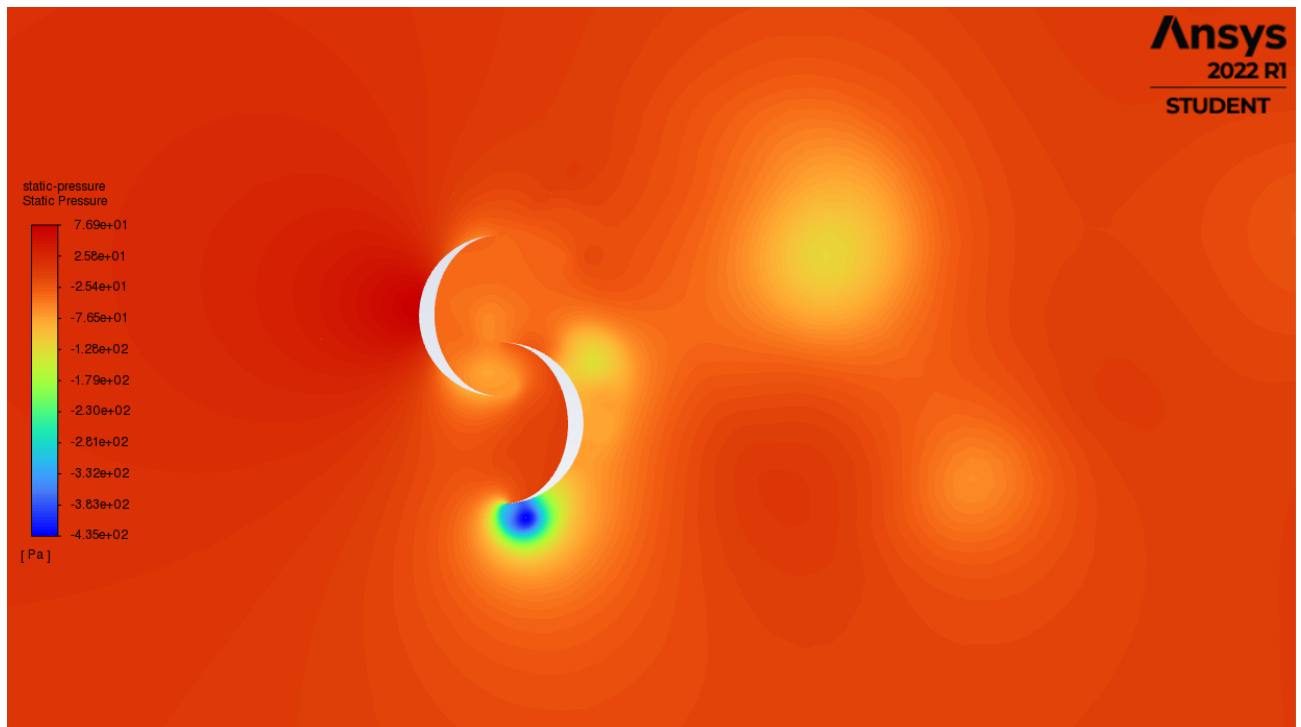
Slika 6.4. Vektori brzine geometrije lopatica 1

Na temelju podataka dobivenih analizom dobije se koeficijent momenta, C_m u iznosu od -0.061667044 (slika 6.5.).

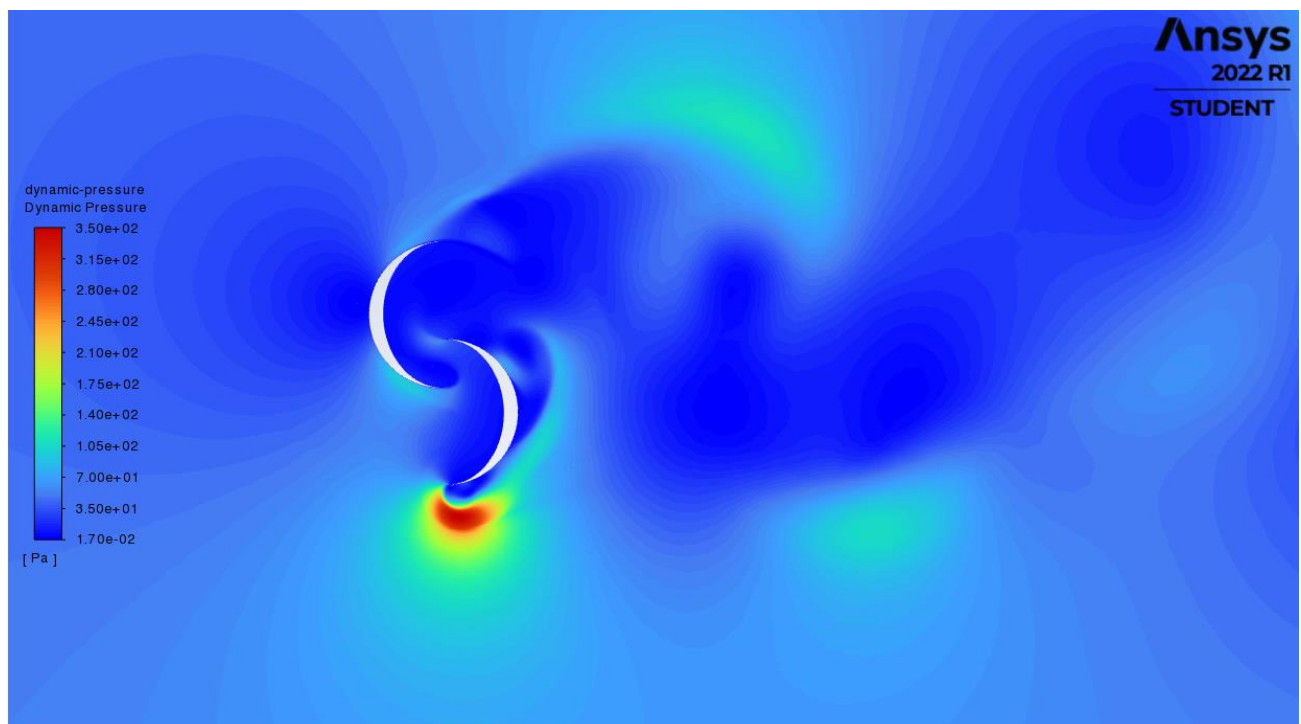


Slika 6.5. Koeficijent momenta (C_m) za geometriju lopatica 1

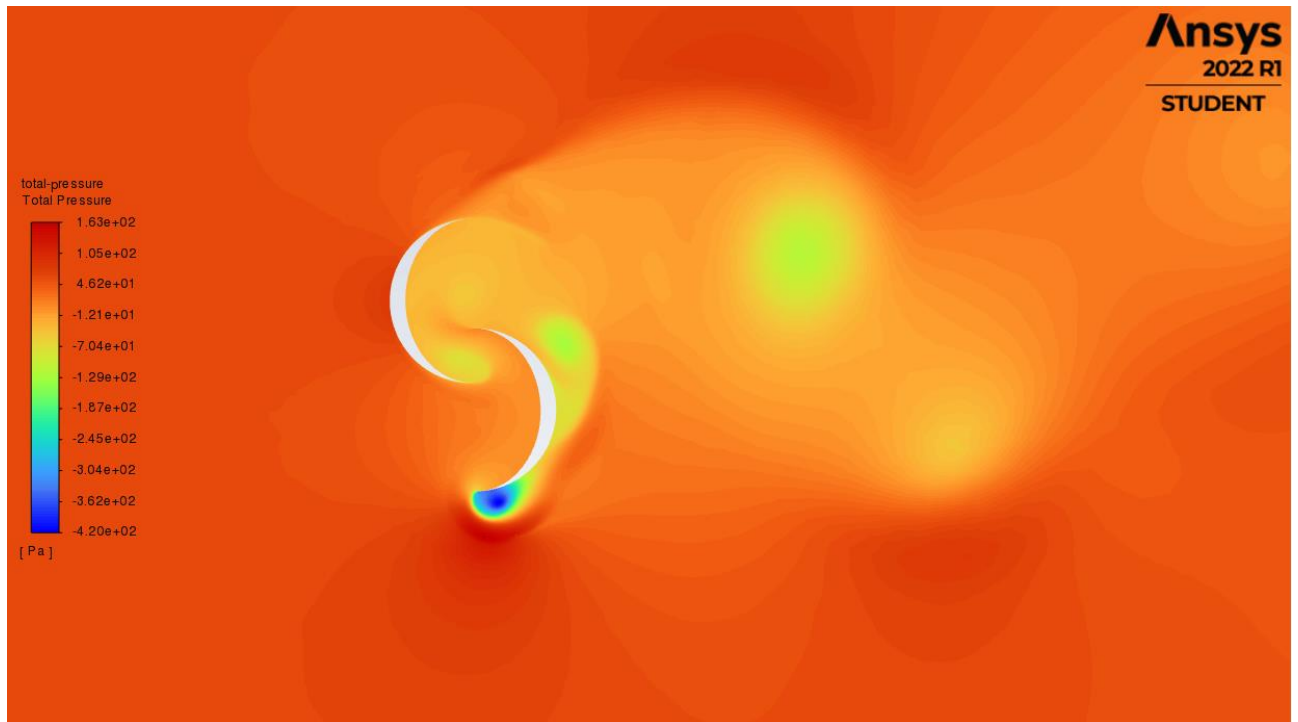
Na sljedećim slikama prikazane su konture statičkog (slika 6.6.), dinamičkog (slika 6.7.) i totalnog (slika 6.8.) tlaka te vektori brzina (slika 6.9.) za geometriju lopatica 2.



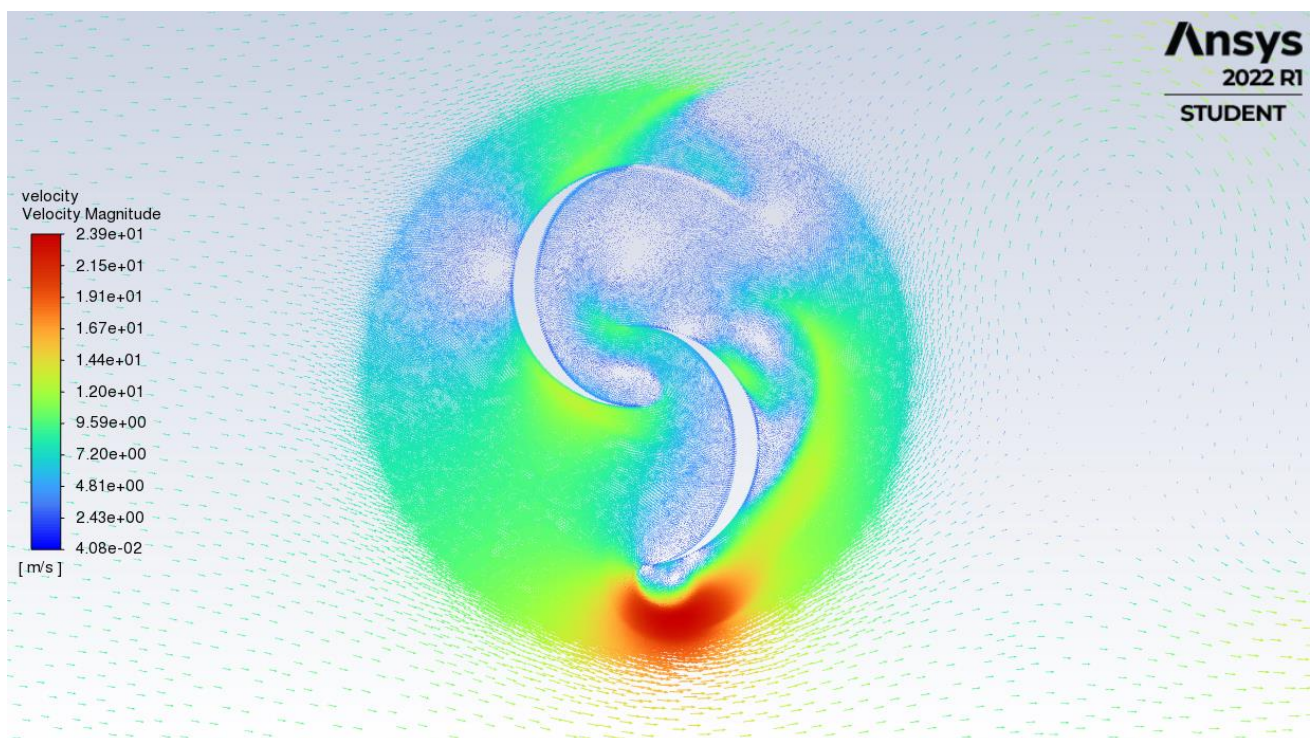
Slika 6.6. Konture statičkog tlaka geometrije lopatica 2



Slika 6.7. Konture dinamičkog tlaka geometrije lopatica 2

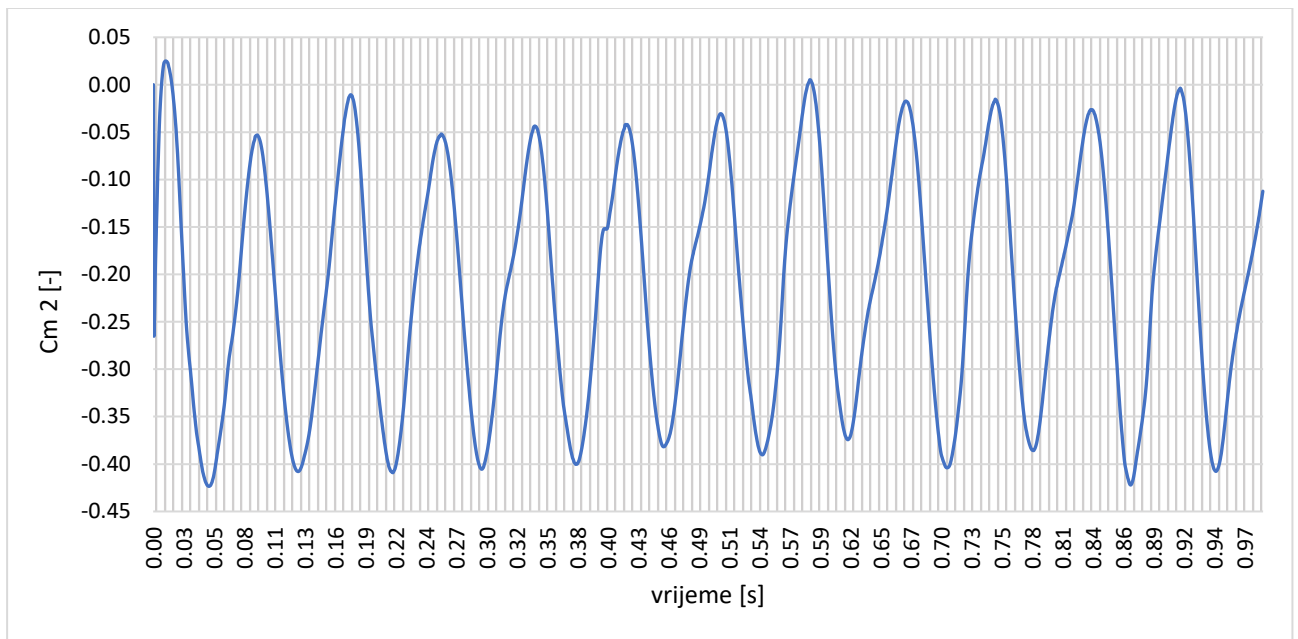


Slika 6.8. Konture totalnog tlaka geometrije lopatica 2



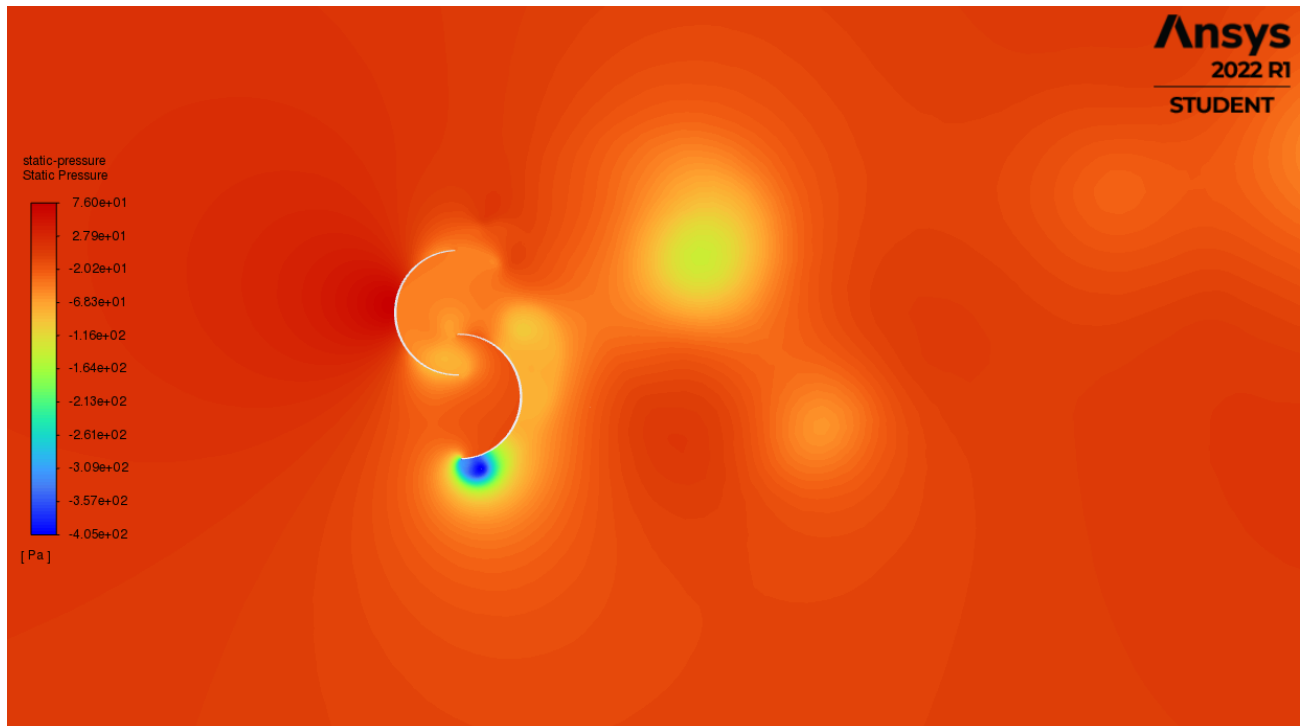
Slika 6.9. Vektori brzina geometrije lopatica 2

Za geometriju lopatica 2 dobiveni koeficijent momenta, C_m iznosi - 0.1123254 (slika 6.10).

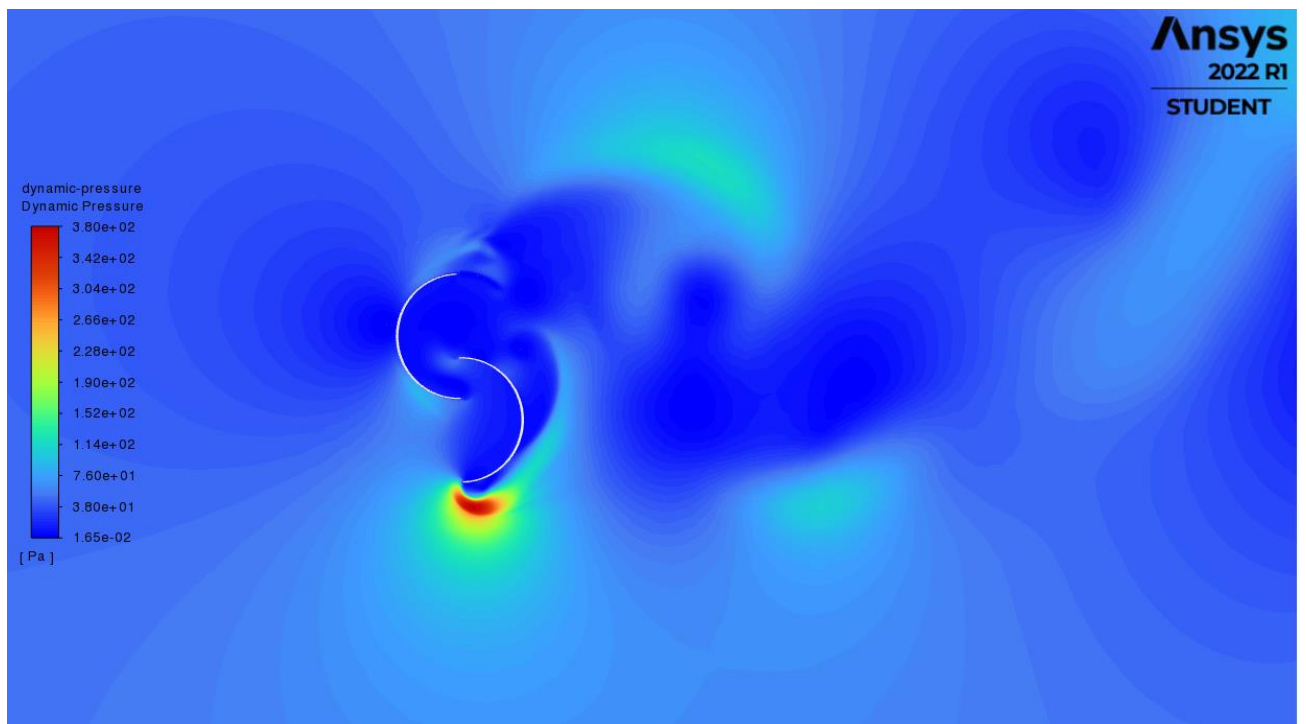


Slika 6.10. Graf koeficijenta momenta (C_m) za geometriju lopatica 2

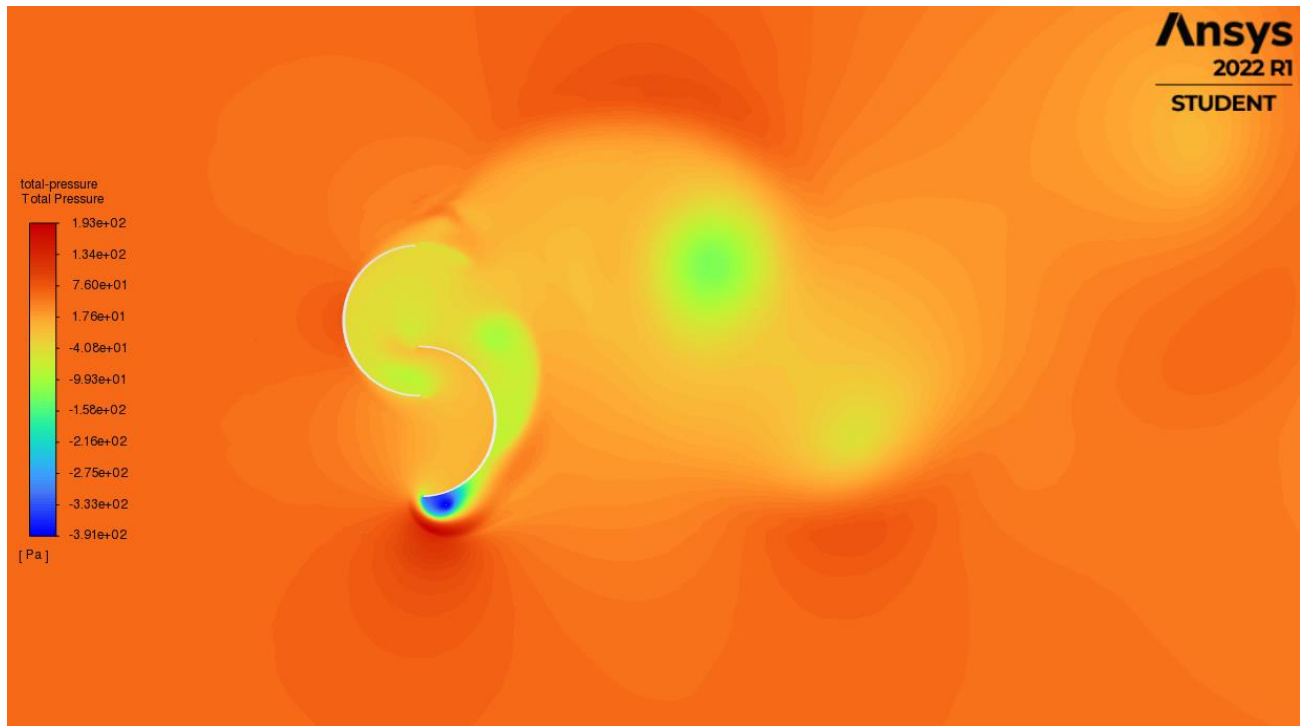
Na sljedećim slikama prikazane su konture statičkog (slika 6.11.), dinamičkog (slika 6.12.) i totalnog (slika 6.13.) tlaka te vektori brzina (slika 6.14.) za geometriju lopatica 3.



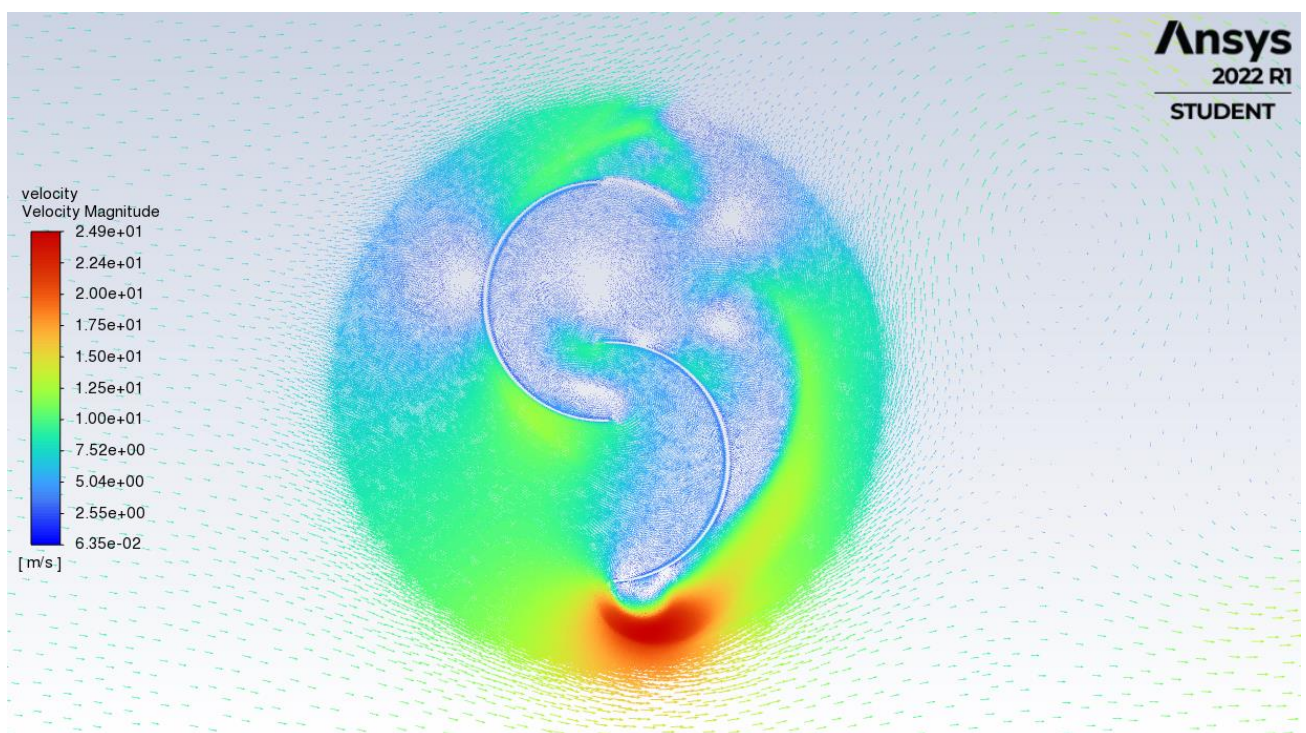
Slika 6.11. Konture statičkog tlaka geometrije lopatica 3



Slika 6.12. Konture dinamičkog tlaka geometrije lopatica 3

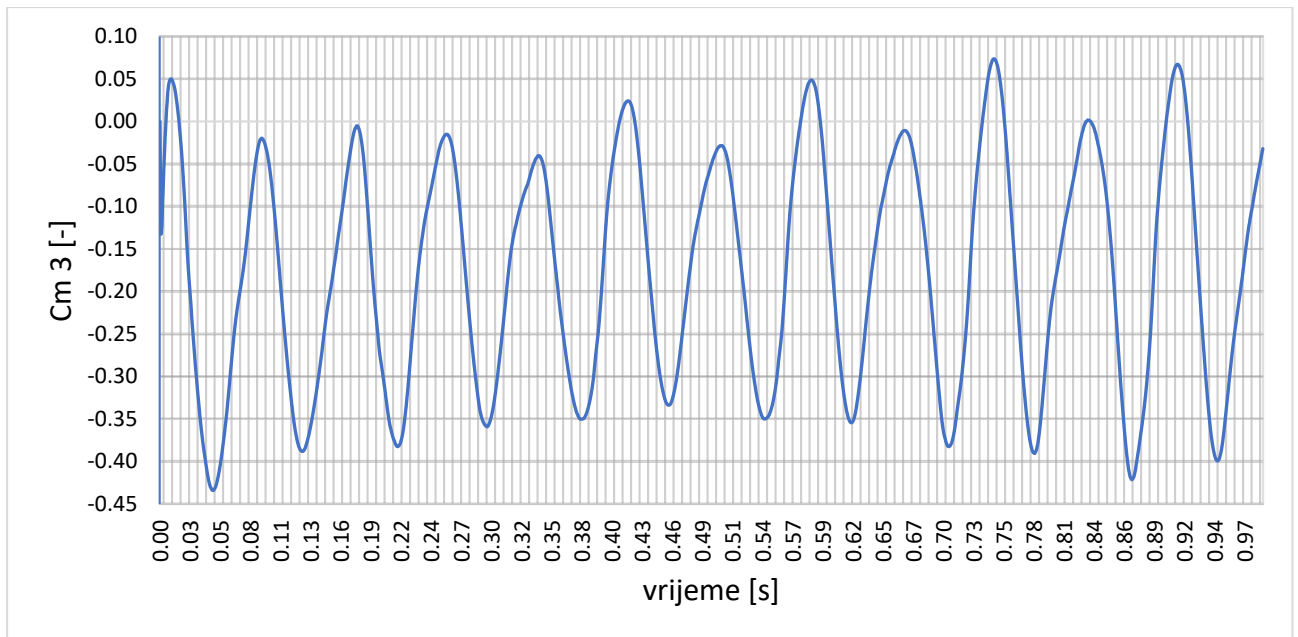


Slika 6.13. Konture totalnog tlaka geometrije lopatica 3



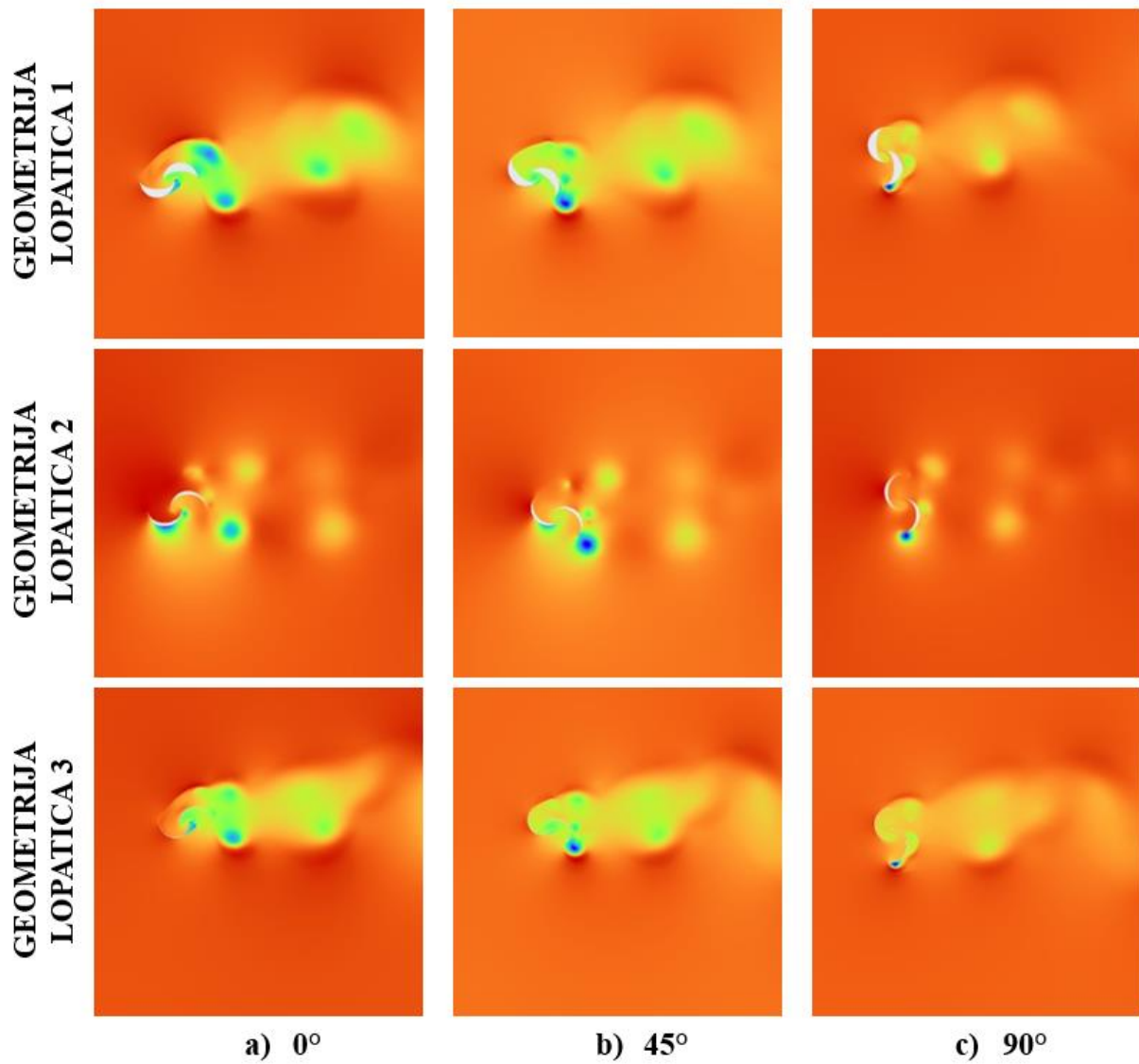
Slika 6.14. Vektori brzina geometrije lopatica 3

Za geometriju lopatica 3 dobiveni koeficijent momenta, C_m iznosi -0.031994457 (slika 6.15.).



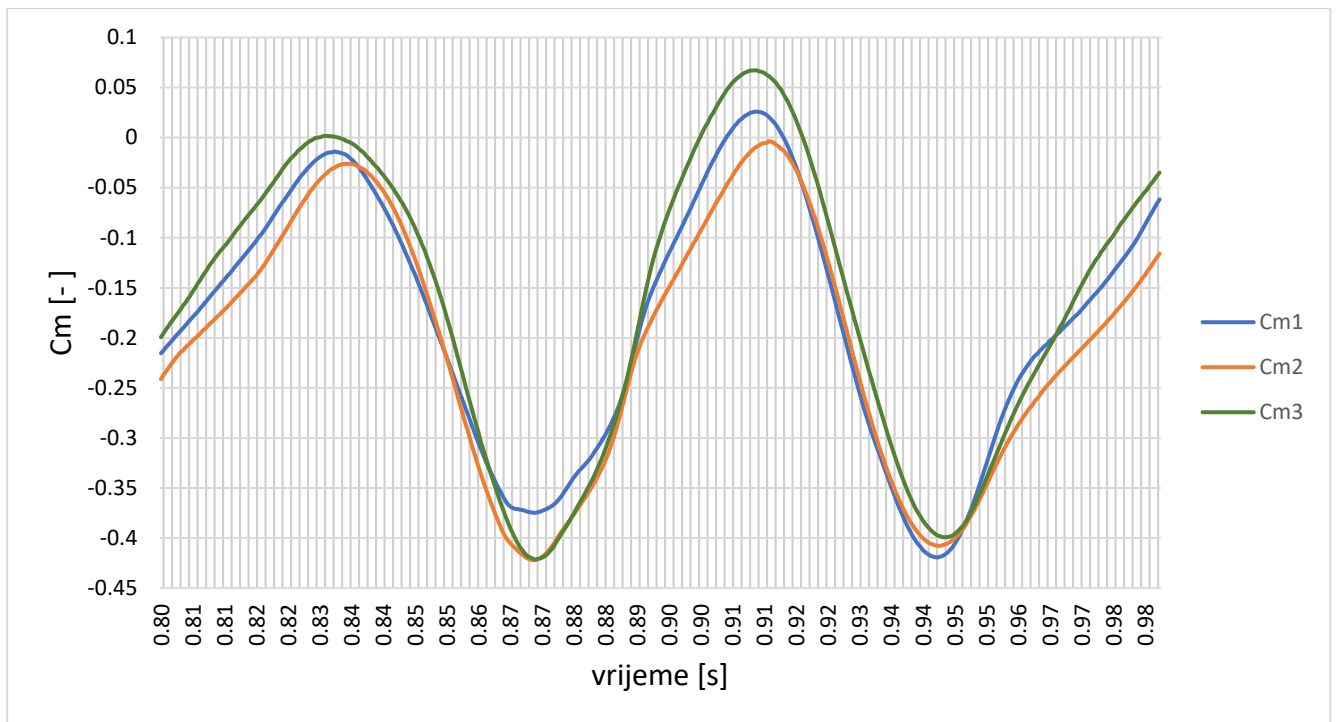
Slika 6.15. Graf koeficijenta momenta (C_m) za geometriju lopatica 3

Na slici 6.16. prikazana je usporedba totalnog tlaka svake geometrije lopatice za različite stupnjeve zakreta turbine.



Slika 6.16. Konture totalnog tlaka za različite stupnjeve zakreta

Na niže prikazanoj slici 6.17. prikazana je usporedba koeficijenta momenta za svaku geometriju lopatica u istom vremenskom periodu od 0.8 s do 1 s.



Slika 6.17. Usporedba koeficijenta momenta (C_m) za sve tri geometrije lopatica

7. ZAKLJUČAK

Problemi dinamike fluida su vrlo složeni te nam računalna dinamika fluida omogućuje da pomoću numeričkih metoda i raznih matematičkih modela lakše opišemo i analiziramo kompleksna strujanja fluida. Nekad dobivena rješenja nisu najvjerodostojnija, ali izborom dovoljno dobrog matematičkog modela se ta greška svodi na minimum. Odlična je alternativa eksperimentalnom pristupu jer nam daje više informacija, od kojih neke ne bi mogli dobiti iz provedenog eksperimenta. Iako je CFD dovoljno pouzdana metoda za analizu problema dinamike fluida, u slučajevima kada ne postoji dovoljno dobar matematički model za opisivanje određenog problema potrebno je primijeniti i eksperimentalni pristup u svrhu kalibracije numeričkih modela. Iz toga se može zaključiti da su teorijski i eksperimentalni pristup komplementarni i kad god je to moguće, trebalo bi koristiti oba pristupa. CFD je odlična alternativa u situacijama kada su izrada prototipa ili eksperimentalni pristup preskupi ili nemogući.

U ovom radu napravljena je analiza strujanja zraka oko različitih geometrija lopatica Savoniusove turbine. Radi jednostavnosti je provedena na 2D presjeku turbine. Analizirale su se tri geometrije lopatica različitih debljina i za svaku debljinu se promatrao koeficijent momenta. Za sve tri izvedbe lopatica rotirajuća i mirujuća domena su jednake, a utjecaj središnje osovine je zanemaren. U simulaciji je korištena rotirajuća domena koja je omogućila realno strujanje fluida oko turbine. U rezultatima su prikazani dobiveni tlakovi i vektori brzine za svaku debljinu lopatica, uspoređene su konture totalnog tlaka svih geometrija lopatica za različite stupnjeve zakreta, kao i dobiveni koeficijenti momenta.

Savoniusova vjetroturbina je dobra alternativa u odnosu na HAT vjetroturbine zbog svoje jednostavne i niske cijene konstrukcije i održavanja. Glavna prednost im je što stvaraju manje buke od ostalih vjetroturbina pa su pogodne za postavljanje u urbanim područjima i za rad im je potrebna relativno niska brzina vjetra.

LITERATURA

- [1] Hassan A. Hassan Saeed, Ahmed M. Nagib Elmekawy, Sadek Z. Kassab: „Numerical study of improving Savonius turbine power coefficient by various blade shapes“, Egypt, 2019.
- [2] Costanzo G., Brindley G., Cole P.: Wind Energy in Europe: 2022 Statistics and the outlook for 2023 – 2027, s Interneta, <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2022-statistics-and-the-outlook-for-2023-2027/#:~:text=In%202022%20new%20wind%20installations,compared%20with%20the%20previous%20year>, 24. lipnja 2023.
- [3] https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrane_u_Hrvatskoj, s Interneta, 5.7.2023.
- [4] <https://www.next.cc/journey/design/wind-power>, s Interneta, 5.7.2023.
- [5] Sayingh A.: Comprehensive Renewable Energy, Volume 2: Wind Energy, Elsevier, 2012.
- [6] Twidell J., Weir T.: Renewable Energy Resources, Routledge, 2015.
- [7] Džijan I. Virag Z.: Računalna dinamika fluida, Hrvatska, 2014.
- [8] Kranjčević L.: Mehanika fluida, interna skripta Tehničkog fakulteta, 2020.
- [9] Tomasović A.: Numerička analiza strujanja fluida u Savonius-ovoj turbini, diplomski rad, Rijeka 2017.
- [10] https://hr.wikipedia.org/wiki/Aerodinamika_vjetroagregata, s Interneta, 21.6.2023.
- [11] ANSYS, Inc.©, Release 12.0, ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation, s interneta, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node37.htm>, 22.6.2023.
- [12] ANSYS, Inc.©, Release 12.0, ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation, s interneta, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node60.htm>, 22.6.2023.
- [13] <https://www.power-technology.com/news/microsoft-potentia-greengate-canada/>, s Interneta, 5.7.2023.
- [14] https://www.researchgate.net/figure/Flow-characteristics-around-Savonius-turbine_fig2_354810478, s Interneta, 5.7.2023.
- [15] https://www.researchgate.net/figure/Standard-types-of-vertical-axis-wind-turbines-13_fig6_323589645, s Interneta, 5.7.2023.

[16] <https://www.universal-sci.com/headlines/2017/1/4/how-do-wind-turbines-work>, s Interneta, 5.7.2023.

[17] <https://www.redalyc.org/journal/849/84961239007/html/>, s Interneta, 5.7.2023.

SAŽETAK

U ovom radu napravljena je analiza utjecaja geometrijskih parametara na strujanje fluida oko Savonius turbine pomoću Ansys Fluent rješavača. Simulacija je izvršena za tri geometrije rotora sa različitim debljinama lopatica. Analizira se utjecaj debljina lopatica na dobiveni koeficijent momenta. Analiza se radi jednostavnosti provodi na 2D presjeku turbine i za numeričku simulaciju korištena je rotirajuća domena kako bi se dobilo realno strujanje fluida oko turbine. Prikazana su rješenja numeričkih simulacija koja mogu pomoći u odabiru optimalnog dizajna turbine.

Ključne riječi: Savonius turbina, CFD, turbulentno strujanje, nestacionarno strujanje

SUMMARY

In this paper, an analysis of the influence of geometric parameters on fluid flow around a Savonius turbine was conducted using the Ansys Fluent solver. The simulation was performed for three rotor geometries with different blade thicknesses. The influence of blade thickness on the obtained moment coefficient is analyzed. For simplicity reasons, the analysis is performed on a 2D section of the turbine and for the numerical simulation a rotating domain was used to obtain a realistic fluid flow around the turbine. Numerical simulation results show us that CFD can be used to determine the optimal design.

Keywords: Savonius turbine, CFD, turbulent flow, unsteady flow

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Glavni dijelovi vjetroturbine [4]	4
Slika 2.2. Podjela vjetroturbina	5
Slika 2.3. Horizontalni tip vjetroturbine [13]	6
Slika 2.4. Horizontalne vjetroturbine s različitim brojem lopatica [6]	7
Slika 2.5. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje [15]	8
Slika 2.6. Darrieus vjetroturbina sa spiralnim lopaticama [16]	9
Slika 2.7. Savonius turbina [1]	10
Slika 2.8. Princip rada Savonius turbine [14]	11
Slika 2.9. Izvedba Savonius turbine na više etaža [17]	12
Slika 3.1. Shematski prikaz postupaka izvođenja numeričke simulacije [7]	14
Slika 4.1. Shema rotora Savonius turbine [1]	17
Slika 4.2. Dimenzije lopatica (geometrija lopatica 1, 2 i 3)	18
Slika 4.3. Geometrija mirujuće domene	19
Slika 4.4. Numerička mreža mirujuće domene	20
Slika 4.5. Numerička mreža rotirajuće domene	21
Slika 4.6. Numerička mreža oko ruba lopatica	21
Slika 5.1. Rubni uvjeti za mirujući dio domene	22
Slika 5.2. Rubni uvjeti za rotacijski dio domene	23
Slika 6.1. Konture statičkog tlaka geometrije lopatica 1	26
Slika 6.2. Konture dinamičkog tlaka geometrije lopatica 1	27
Slika 6.3. Konture totalnog tlaka geometrije lopatica 1	27
Slika 6.4. Vektori brzine geometrije lopatica 1	28
Slika 6.5. Koeficijent momenta (C_m) za geometriju lopatica 1	28
Slika 6.6. Konture statičkog tlaka geometrije lopatica 2	29
Slika 6.7. Konture dinamičkog tlaka geometrije lopatica 2	29
Slika 6.8. Konture totalnog tlaka geometrije lopatica 2	30
Slika 6.9. Vektori brzina geometrije lopatica 2	30
Slika 6.10. Graf koeficijenta momenta (C_m) za geometriju lopatica 2	31
Slika 6.11. Konture statičkog tlaka geometrije lopatica 3	32
Slika 6.12. Konture dinamičkog tlaka geometrije lopatica 3	32
Slika 6.13. Konture totalnog tlaka geometrije lopatica 3	33
Slika 6.14. Vektori brzina geometrije lopatica 3	33
Slika 6.15. Graf koeficijenta momenta (C_m) za geometriju lopatica 3	34

Slika 6.16. Konture totalnog tlaka za različite stupnjeve zakreta	35
Slika 6.17. Usporedba koeficijenta momenta (C_m) za sve tri geometrije lopatica	36

POPIS TABLICA

Tablica 4.1 Dimenzije Savonius rotora u mm [1]	17
Tablica 5.1. Ulazne vrijednosti za simulaciju.....	24