

Računalna simulacija raspodjele tlaka na površini zgrade izložene vjetru

Kovačević, Dino

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:068635>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-11**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dino Kovačević

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**Računalna simulacija raspodjele tlaka na
površini zgrade izložene vjetru**

Mentor:

Prof. dr. sc. Hrvoje Kozmar, dipl. ing.

Student:

Dino Kovačević

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Hrvoju Kozmaru na ukazanim savjetima te Mihaelu Cindoriju, mag. ing. mech., na pomoći prilikom izrade ovog rada.

Također zahvaljujem svojoj obitelji, prijateljima i djevojci na potpori tijekom dosadašnjeg dijela studija.

Dino Kovačević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dino Kovačević**

Mat. br.: 0035199330

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Računalna simulacija raspodjele tlaka na površini zgrade izložene vjetru**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Computational model of wind-induced pressure distribution at building surface**

Opis zadatka:

Vjetar je važan parametar kod projektiranja građevinskih objekata. Uz korištenje računalne dinamike fluida moguća je analiza djelovanja vjetra na građevinske objekte, a s ciljem poboljšanja njihovih aerodinamičkih karakteristika.

U završnom radu je potrebno, uz pomoć programskog paketa za računalnu dinamiku fluida, simulirati nastrojavanje vjetra i raspodjelu površinskog tlaka na zgradi karakteriziranoj oštrim bridovima. Pritom je potrebno uvjete nastrojavanja vjetra prilagoditi karakteristikama strujanja zraka u atmosferskom graničnom sloju, uključujući uvjete atmosferske turbulencije, a za različite tipove vjetra. U radu je potrebno koristiti model stacionarnog trodimenzijskog turbulentnog strujanja nestlačivog fluida. Rezultate računalnih simulacija potrebno je usporediti s vrijednostima danim u dostupnoj literaturi.

Rad treba sadržavati:

1. Uvod s opisom strujanja vjetra u atmosferskom graničnom sloju i oblika ispitivane zgrade.
3. Matematičke osnove modeliranja turbulencije.
3. Opis računalnog modela za nastrojavanje vjetra na zgradu.
4. Prikaz i analiza rezultata računalnih simulacija.
5. Zaključak.

Rezultate proračuna prikazati odgovarajućim tablicama, dijagramima i slikama.

U radu je potrebno navesti literaturu i eventualno dobivenu pomoć tijekom izrade.

Zadatak zadan:
30. studenog 2017.

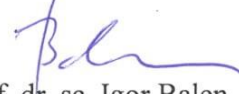
Rok predaje rada:
1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Hrvoje Kozmar

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Aerodinamika zgrade	1
1.2. Računalna dinamika fluida.....	1
2. ATMOSFERSKI GRANIČNI SLOJ	4
2.1. Atmosfersko strujanje	4
2.2. Atmosferska turbulencija	4
2.3. Atmosferski granični sloj	5
2.3.1. <i>Struktura atmosferskog graničnog sloja</i>	7
2.3.1.1. <i>Aerodinamička duljina hrapavosti z_0</i>	8
2.3.1.2. <i>Debljina istisnuća atmosferskog graničnog sloja d</i>	9
2.3.2. <i>Karakteristike osrednjene brzine</i>	10
2.3.3. <i>Empirijski izrazi za modeliranje atmosferskog graničnog sloja</i>	12
3. MATEMATIČKI MODEL TURBULENTNOG STRUJANJA	13
3.1. Vremenski osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe (RANS).....	13
3.2. Modeli turbulencije	14
3.3. $k - \varepsilon$ model turbulencije.....	15
3.4. Modeliranje turbulencije u blizini zida	16
3.5. Modeliranje strujanja uz zidnu stijenu	17
4. RAČUNALNI MODEL.....	21
4.1. Ulazni profili	21
4.2. Testiranje homogenosti atmosferskog graničnog sloja u dvodimenzionalnoj (2D) računalnoj domeni.....	22
4.2. Opis trodimenzionalne (3D) računalne domene	30
5. REZULTATI	33
5.1. Prikaz raspodjele dobivenih polja koeficijenta tlaka	34
5.2. Prikaz linijske raspodjele koeficijenata tlaka	37
5.3. Usporedba dobivenih rezultata s eksperimentalnim mjerenjima	40
5.4. Iznos koeficijenta otpora C_D zgrade	44
6. ZAKLJUČAK.....	46
LITERATURA.....	47
PRILOZI.....	49

POPIS SLIKA

Slika 1.	Promjena brzine vjetra u ovisnosti o vremenu t , s [2].....	5
Slika 2.	Profil atmosferskog graničnog sloja za strujanje iznad različitih tipova terena [3]	6
Slika 3.	Profil osrednjene brzine strujanja zraka u atmosferskom graničnom sloju [4].....	6
Slika 4.	Struktura atmosferskog graničnog sloja [4]	7
Slika 5.	Shematski prikaz aerodinamičke duljine hrapavosti [7]	9
Slika 6.	Formiranje atmosferskog graničnog sloja uslijed strujanja nad površinom s gusto raspoređenim elementima površinske hrapavosti [7].....	10
Slika 7.	Brzina vjetra izmjerena na različitim visinama u području atmosferskog graničnog sloja prema Dyrbyeu i Hansenu [7].....	10
Slika 8.	Vertikalni profil apsolutne i vremenski osrednjene brzine u smjeru strujanja (x -os) prema Dyrbyeu i Hansenu [7], Manwellu, McGowanu i Rodgersu [2]	11
Slika 9.	Dijagram promjene bezdimenzijske brzine u ovisnosti o bezdimenzijskoj udaljenosti [11].....	17
Slika 10.	Zakon zida prikazan u kontekstu Nikuradseove visine hrapavosti [21].....	19
Slika 11.	Shematski prikaz računalne domene koja je korištena za testiranje homogenosti ulaznih profila osrednjene brzine $u(z)$, kinetičke energije turbulencije $k(z)$, te disipacije kinetičke energije turbulencije $\varepsilon(z)$	23
Slika 12.	Shematski prikaz rubnih ploha korištenih za generiranje prazne 2D računalne domene	24
Slika 13.	Usporedba profila osrednjene brzine $u(z)$ u 2D domeni s ulaznim profilom prema Montazeriju i Blockenu [13]	25
Slika 14.	Usporedba profila kinetičke energije turbulencije $k(z)$ u 2D domeni s ulaznim profilom prema Montazeriju i Blockenu [13]	26
Slika 15.	Usporedba profila disipacije kinetičke energije turbulencije $\varepsilon(z)$ u 2D domeni s ulaznim profilom prema Montazeriju i Blockenu [13]	26
Slika 16.	Usporedba profila osrednjene brzine $u(z)$ u 2D domeni sa suburbanim ulaznim profilom prema Kozmaru [18]	27
Slika 17.	Usporedba profila kinetičke energije turbulencije $k(z)$ u 2D domeni sa suburbanim ulaznim profilom prema Kozmaru [18].....	27
Slika 18.	Usporedba profila disipacije kinetičke energije turbulencije $\varepsilon(z)$ u 2D domeni sa suburbanim ulaznim profilom prema Kozmaru [18].....	28
Slika 19.	Usporedba profila osrednjene brzine $u(z)$ u 2D domeni s ruralnim ulaznim profilom prema Kozmaru [18]	28
Slika 20.	Usporedba profila kinetičke energije turbulencije $k(z)$ u 2D domeni s ruralnim ulaznim profilom prema Kozmaru [18].....	29
Slika 21.	Usporedba profila disipacije kinetičke energije turbulencije $\varepsilon(z)$ u 2D domeni s ruralnim ulaznim profilom prema Kozmaru [18].....	29
Slika 22.	Shema trodimenzionalne (3D) domene	31
Slika 23.	Prikaz prostorne diskretizacije u okolini zgrade	32
Slika 24.	Prikaz vertikalnih linija na kojima je modelirana raspodjela koeficijenta tlaka C_p	33
Slika 25.	Izometrijski prikaz raspodjele polja koeficijenta tlaka na: a) privjetrinskoj strani zgrade, b) zavjetrinskoj strani zgrade.....	34
Slika 26.	Prikaz raspodjele polja koeficijenta tlaka na: a) privjetrinskoj strani zgrade, b) zavjetrinskoj strani zgrade	35
Slika 27.	Prikaz polja apsolutne vrijednosti osrednjene brzine: a) u $x - y$ ravnini (na visini $z = 0,5 \cdot H$), b) u $x - z$ ravnini (na simetrali)	36

- Slika 28. Raspodjela polja tlaka u okolini zgrade prikazana u $x - z$ ravnini (na simetrali) 37
- Slika 29. Linijska raspodjela koeficijenta tlaka C_p na prednjoj (privjetrinskoj) strani zgrade: a) na privjetrinskoj centralnoj liniji (PCL), b) na privjetrinskim bočnim linijama (PBL). MBD – rješenja dobivena pomoću profila brzine definiranog u Montazeri i Blocken [13], suburban – suburbani profil, rural – ruralni profil..... 38
- Slika 30. Linijska raspodjela koeficijenta tlaka C_p na stražnjoj (zavjetrinskoj) strani zgrade: a) na zavjetrinskoj centralnoj liniji (ZCL), b) na zavjetrinskim bočnim linijama (ZBL). MBD – rješenja dobivena pomoću profila brzine definiranog u Montazeri i Blocken [13], suburban – suburbani profil, rural – ruralni profil..... 39
- Slika 31. Usporedba linijske raspodjele koeficijenta tlaka C_p na prednjoj (privjetrinskoj) strani zgrade: a) na privjetrinskoj centralnoj liniji (PCL), b) na privjetrinskim bočnim linijama (PBL). MBD – rješenja dobivena pomoću profila brzine prema Montazeriju i Blockenu [13], exp – mjerenja iz zračnog tunela prema Chand i ostali [14], MB – rezultati dani u Montazeri i Blocken [13]..... 41
- Slika 32. Usporedba linijske raspodjele koeficijenta tlaka C_p na stražnjoj (zavjetrinskoj) strani zgrade: a) na zavjetrinskoj centralnoj liniji (ZCL), b) na zavjetrinskim bočnim linijama (ZBL). MBD – rješenja dobivena pomoću profila brzine prema Montazeriju i Blocken [13], exp – mjerenja iz zračnog tunela prema Chand i ostali [14], MB – rezultati dani u Montazeri i Blocken [13]..... 42
- Slika 33. Iznos koeficijenta otpora zgrade C_D dobiven za tri tipa nastrojavanja. MBD – rješenja dobivena pomoću profila brzine definiranog u Montazeri i Blocken [13], suburban – suburbani profil, rural – ruralni profil..... 44

POPIS TABLICA

Tablica 1. Klasifikacija hrapavosti terena s odgovarajućim vrijednostima z_0 [22].....	8
Tablica 2. Konstante $k - \varepsilon$ modela turbulencije [11]	16
Tablica 3. Koeficijenti potrebni za računanje ulaznog profila prema Montazeriju i Blockenu [13]	22
Tablica 4. Dimenzije dvodimenzionalne (2D) domene korištene za testiranje homogenosti ulaznih profila osrednjene brzine $u(z)$, kinetičke energije turbulencije $k(z)$, te disipacije kinetičke energije turbulencije $\varepsilon(z)$	23
Tablica 5. Tablični prikaz rubnih uvjeta korištenih u 2D računalnim simulacijama	24
Tablica 6. Dimenzije modela zgrade	31
Tablica 7. Dimenzije 3D domene.....	31

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	poprečni presjek zgrade
B	-	konstanta zakona zida
C_μ	-	konstanta modela turbulencije
C_1	-	konstanta modela turbulencije
C_2	-	konstanta modela turbulencije
C_s	-	konstanta hrapavosti
d	m	debljina istisnuća atmosferskog graničnog sloja
E	-	parametar hrapavosti podloge
G	Pa/s	generacija kinetičke energije turbulencije
H	m	visina zgrade
H_D	m	visina domene
k	m^2/s^2	kinetička energija turbulencije
k_s^+	-	bezdimenzijska visina hrapavosti
k_s	m	Nikuradseova visina hrapavosti
L	m	duljina zgrade
L_D	m	duljina domene
Re	-	Reynoldsov broj
Re_t	-	turbulentni Reynoldsov broj
T	s	vremenski period
u, v, w	m/s	apsolutne brzine u x -, y - i z -smjeru
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	m/s	osrednjene brzine u x -, y - i z -smjeru
u', v', w'	m/s	pulzirajuće komponente brzine u x -, y - i z - smjeru
u_δ	m/s	brzina vjetra na visini δ
u_τ	m/s	brzina trenja
\bar{u}_{ref}	m/s	referentna osrednjena brzina
W	m	širina zgrade
W_D	m	širina domene
y^+	-	bezdimenzijska udaljenost od stijenke
Y_p	m	y -koordinata središta prvog kontrolnog volumena
z	m	visina iznad Zemljine površine
z_0	m	aerodinamička duljina hrapavosti
Z_p	m	koordinata središta prvog kontrolnog volumena
Z_{ref}	m	referentna visina
α	-	eksponent zakona potencije
δ	m	debljina graničnog sloja
δ_{ij}	-	Kroneckerov delta simbol
ε	m^2/s^3	disipacija kinetičke energije tubulencije

κ	-	Von Kármán-ova konstanta
μ	Pas	dinamička viskoznost
μ_t	Pas	turbulentna viskoznost
ν	m^2/s^2	kinematička viskoznost
ρ	kg/m^3	gustoća fluida
σ_k	-	konstanta modela turbulencije
σ_ε	-	konstanta modela turbulencije
τ	N/m^2	tenzor naprezanja
τ_w	N/m^2	smično naprezanje na zidu

SAŽETAK

U ovom radu cilj je prikazati raspodjelu polja tlaka na pravokutnoj zgradi s oštrim rubovima korištenjem računalne dinamike fluida. Za generiranje mreže i računalnu simulaciju korišten je računalni paket OpenFOAM®. Korišteni model stacionarnog trodimenzijskog turbulentnog strujanja nestlačivog fluida rješava postavljeni matematički model uz primjenu osrednjenih Navier-Stokesovih jednažbi i $k - \varepsilon$ modela turbulencije, dok je strujanje uz zidnu stijenu modelirano korištenjem zidne funkcije koja u obzir uzima hrapavost stijene. Prostorna diskretizacija je provedena korištenjem blok-strukturirane mreže konačnih volumena. Nastrujavanje vjetra modelirano je atmosferskim graničnim slojem za tri tipa vjetra. Rezultati su prikazani dijagramski, koeficijentima tlaka uzduž vertikalnih linija postavljenih na dvije strane zgrade (u privjetrini i zavjetrini). Postignuti rezultati računalne simulacije uspoređeni su s rezultatima dostupnima u literaturi.

Ključne riječi: Računalna dinamika fluida, atmosferski granični sloj, djelovanje vjetra na konstrukcije, raspodjela koeficijenta tlaka, koeficijent otpora.

SUMMARY

The aim of this thesis is to model the pressure distribution on a rectangular building with sharp edges by using Computational Fluid Dynamics (CFD). The computer package OpenFOAM® was used for simulation and generating the computational grid. The model of stationary three-dimensional turbulent flow of incompressible fluid was used, which solved the mathematical model by using the averaged Navier-Stokes equations and the $k - \varepsilon$ turbulence model, whereas the near-wall flow was modeled by rough wall function. Spatial discretization was modeled with a structured grid made of rectangular hexagonal finite volumes. Wind flow was modeled as the atmospheric boundary layer for the three types of wind. The pressure coefficient distributions along the vertical lines placed on the two sides of the building (windward and leeward) are reported and compared with the available wind-tunnel measurements.

Key words: Computational fluid dynamics (CFD), atmospheric boundary layer, wind loading, pressure coefficient distribution, drag coefficient.

1. UVOD

1.1. Aerodinamika zgrade

Poznavanje raspodjele tlaka po površini zgrade od velike je važnosti. Prije svega, pri konstruiranju zgrade poznavanje opterećenja od strane vjetra uvelike pomaže projektantu. Primjerice, na krovu zgrade uslijed pojave odvajanja strujanja dolazi do stvaranja zone potlaka, a informacija o tome omogućava projektantu da daljnjim proračunom odabere vrstu krova, odredi konstrukcijski oblik prihvata krova i zgrade, poziciju postavljanja dimnjaka i sl. Također, vjetar može utjecati i na odabir položaja prozora, balkona, vrata, i sl. [1].

Pri projektiranju ventilacijskog sustava, područja pretlaka i potlaka od velike su važnosti, kod mehaničke, a posebno kod prirodne ventilacije. Mehanička ventilacija koristi ventilatore odnosno električnu energiju za izmjenu zraka u prostoru, dok prirodna koristi isključivo sile prirodne konvekcije i silu uzgona. Kod mehaničke ventilacije, otvore za ulaz zraka u zgradu prigodno je postavljati u područjima pretlaka, gdje je koeficijent tlaka C_p visok. Time se smanjuje energija koju je potrebno dovesti ventilatoru. Otvori za ispuh zraka smještaju se u područje potlaka gdje je koeficijent tlaka najmanji (npr. na krovu), kako bi se povećala efikasnost ispušnog ventilatora. Kod prirodne ventilacije problematika je slična, samo je tu potrebna još dodatna opreznost pri projektiranju, pošto je sustav osjetljiviji i manje učinkovit. Prostorije koje je potrebno održavati čistima kao što su učionice i velike dvorane grade se u područjima pretlaka (u privjetrini), dok se prostorije koje rade s opasnim tvarima (primjerice laboratorij sa štetnim tvarima) projektiraju u području što većeg potlaka (u zavjetrini).

1.2. Računalna dinamika fluida

Računalna dinamika fluida odnosno CFD koristi se za numeričko rješavanje matematičkih modela koji opisuju strujanje fluida. Ovaj pristup je često prikladan, s obzirom da je većina fizikalnih problema vezanih uz strujanje fluida opisana nelinearnim parcijalnim diferencijalnim jednadžbama za koje ne postoje analitička rješenja. Dodatna poteškoća pri rješavanju je turbulencija koja je sama po sebi stohastičke prirode, te se ne može opisati analitički. Sukladno tome koriste se modeli turbulencije, kao što je $k - \varepsilon$ model turbulencije korišten u ovome radu.

Računalno rješavanje problema iz dinamike fluida ima određene prednosti u odnosu na eksperimentalni pristup. Ovim pristupom u praksi se brže dolazi do rezultata, za razliku od zračnog tunela gdje se često puno vremena troši na pripremu eksperimenta i izradu modela ili prototipa. Možda i najveća prednost računalnog pristupa je u količini informacija koja se prikupi (to ovisi o gustoći računalne mreže). U eksperimentalnom pristupu se dobiva ograničeni broj rezultata koji ovisi o broju mjernih instrumenata, dok računalni pristup daje kompletnu sliku strujanja. Sam proces je za većinu slučajeva efikasniji za razliku od zračnih tunela koji mogu biti jako skupi za detaljnija mjerenja. Sukladno tomu, troši se i manje energije pošto je praktički jedini utrošak rad računala. Još neke prednosti uključuju ostvarivanje idealiziranih uvjeta (jednolikost profila brzine na ulaznom presjeku, konstantnost temperature na rubu domene, adijabatska granica i sl.), kao i simuliranje sustava koji uključuju otrovne i eksplozivne fluide. Računalni pristup dakako ima i svoje nedostatke, od kojih je osnovni ograničenost na probleme za koje postoje pouzdani matematički modeli. Tu treba istaknuti modeliranje turbulencije. Također, za ograničeni broj rezultata CFD analiza može biti skuplja od eksperimentalnog pristupa (npr. kod mjerenja karakteristike pumpe), gdje je eksperimentalnim putem potrebno odrediti priraste tlaka za određene protoke. Računalni pristup zahtijeva puno vremena za diskretizaciju prostora i generiranje mreže konačnih volumena, s obzirom da je potrebno provesti analizu za više protoka (radnih točaka).

Može se zaključiti da su ova dva pristupa komplementarna, te se međusobno nadopunjuju i potpomažu u razvoju. Vjerojatno najpouzdanija metoda u provođenju ispitivanja je korištenje računalne simulacije koja će dati predodžbu o strujanju na osnovu koje se može definirati što mjeriti, kakvim instrumentima i na kojim pozicijama [12].

Nakon odabira matematičkog modela, potrebno je odabrati odgovarajuću računalnu metodu za rješavanje modela. Postoje tri klasične računalne metode za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi:

- metoda konačnih razlika (engl. *finite difference method*),
- metoda konačnih elemenata (engl. *finite element method*),
- metoda konačnih volumena (engl. *finite volume method*)

U računalnoj dinamici fluida najčešće se koristi metoda konačnih volumena (MKV). MKV diskretizira domenu u konačan broj kontrolnih volumena koji se međusobno ne preklapaju. U MKV protoci kroz kontrolne površine susjednih konačnih volumena moraju zadovoljiti zakone očuvanja mase i količine gibanja, što ovu metodu čini pogodnom i za kompleksne geometrije.

Većina komercijalnih CFD programa podupire korištenje različitih oblika kontrolnih volumena kao što su: prizme, tetraedri, heksaedri itd.

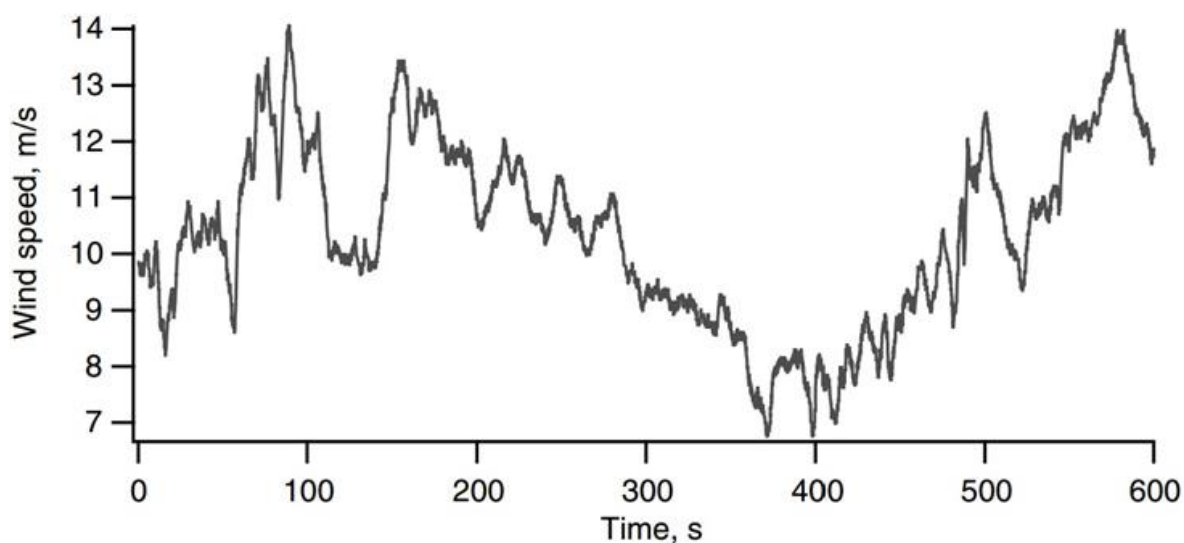
2. ATMOSFERSKI GRANIČNI SLOJ

2.1. Atmosfersko strujanje

Strujanje zraka u atmosferi se zove vjetar, a uzrok su mu razlike tlaka u atmosferi i Coriolisova sila. Sam vjetar utječe na razlike tlaka u atmosferi, a isto tako razlike tlaka pokreću vjetar. Jasno je da su te dvije pojave ovisne jedna o drugoj te se ne mogu promatrati odvojeno. Strujanje u atmosferi je skup različitih uzoraka turbulentnog strujanja koji su međusobno neovisni u vremenu i prostoru. Takva strujanja mogu varirati od kratkotrajne turbulencije (nastaju vrtlozi veličine nekoliko metara) i trajanja par minuta, pa do velikih oluja i planetarnih strujanja u višim slojevima atmosfere koja se mogu prostirati čitavim opsegom zemlje, a mogu trajati i do nekoliko dana [17].

2.2. Atmosferska turbulencija

Uzrok turbulencije u vjetru je disipacija kinetičke energije u toplinsku energiju pri čemu nastaju i raspadaju se mali vrtlozi. Turbulentno strujanje je stohastičke prirode što znači da je vrlo nepredvidivo i zbog toga će vjetar u području turbulentnog strujanja tijekom dužeg perioda od par sati imati relativno konstantnu srednju brzinu. No tijekom manjih perioda (par minuta) ta brzina bi mogla znatno varirati, Slika 1. Kretanje čestica u turbulentnom strujanju je kaotično, čestice se gibaju nasumično pa je teško opisati fizikalne veličine poput temperature, tlaka, gustoće, vlažnosti i sl. Zbog takve prirode turbulentnog strujanja, čak i mala promjena početnih uvjeta može rezultirati u značajnijim razlikama. Turbulentno strujanje je izrazito nestacionarno, što znači da parametri vezani za strujanje nisu konstantni u vremenu u određenoj točki prostora pa oni variraju u širokom spektru frekvencija [7].

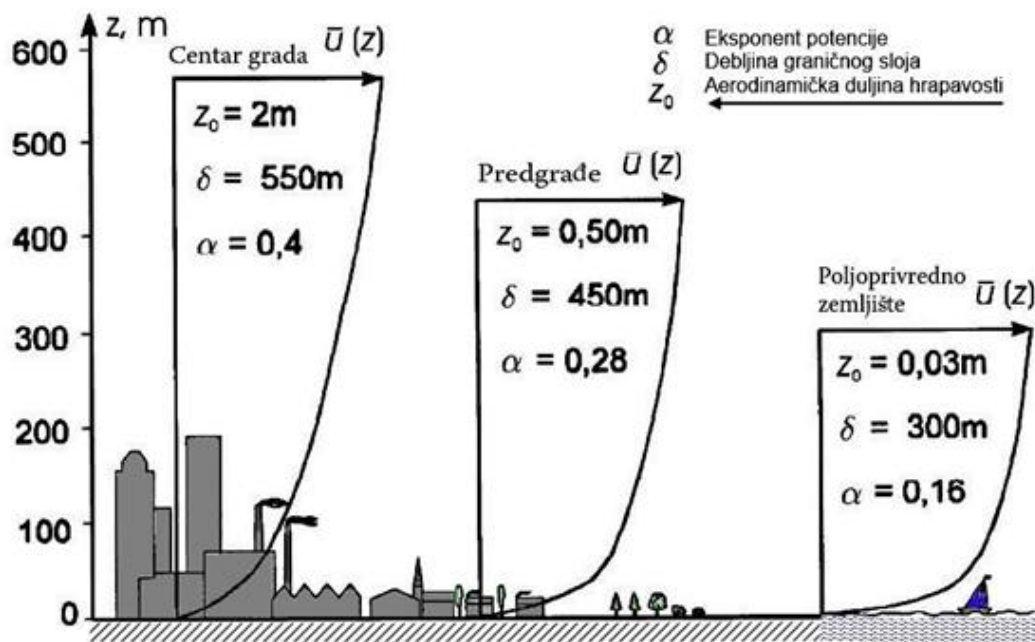


Slika 1. Promjena brzine vjetra u ovisnosti o vremenu t , s [2]

2.3. Atmosferski granični sloj

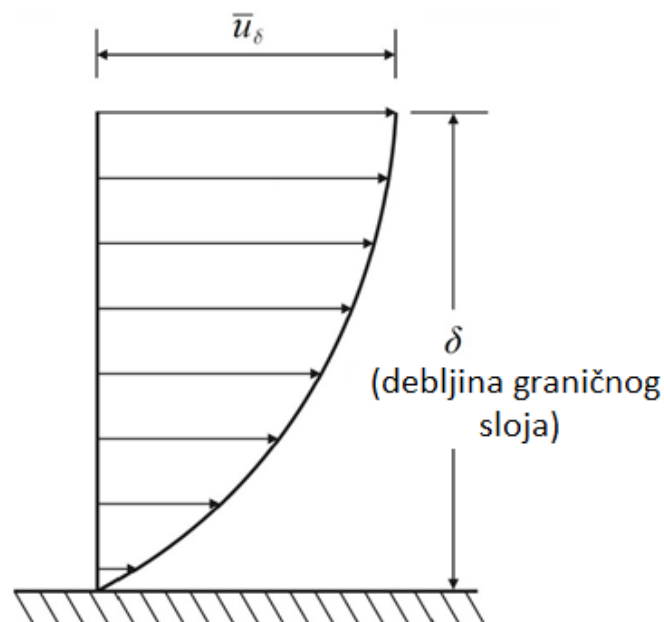
Atmosferski granični sloj je najniži sloj atmosfere, točnije najniži sloj troposfere, koji je u kontaktu s površinom Zemlje. To znači da efekti na površini, kao što su trenje te izmjena topline i vlažnosti, utječu na strukturu strujanja i izgled graničnog sloja. Fizikalne veličine koje opisuju strujanje vjetra u tom sloju (brzina, temperatura i vlažnost) imaju najveće gradijente u području od Zemljine površine do približno 100 m visine iznad Zemlje. Iznad atmosferskog graničnog sloja nalazi se sloj u kojem utjecaj trenja zanemariv [6].

Brzina strujanja na površini Zemlje jednaka je nuli. S odmicanjem od površine (porastom visine) njezin utjecaj na strujanje vjetra opada. Prema Counihanu [3], visina atmosferskog graničnog sloja iznad ruralnog, ali i urbanog područja iznosi između 450 m i 600 m, i u tom području je utjecaj Zemljine površine na strujanje zanemariv. Na profil strujanja u atmosferskom graničnom sloju utječe i površinska hrapavost tla, Slika 2.



Slika 2. Profil atmosferskog graničnog sloja za strujanje iznad različitih tipova terena [3]

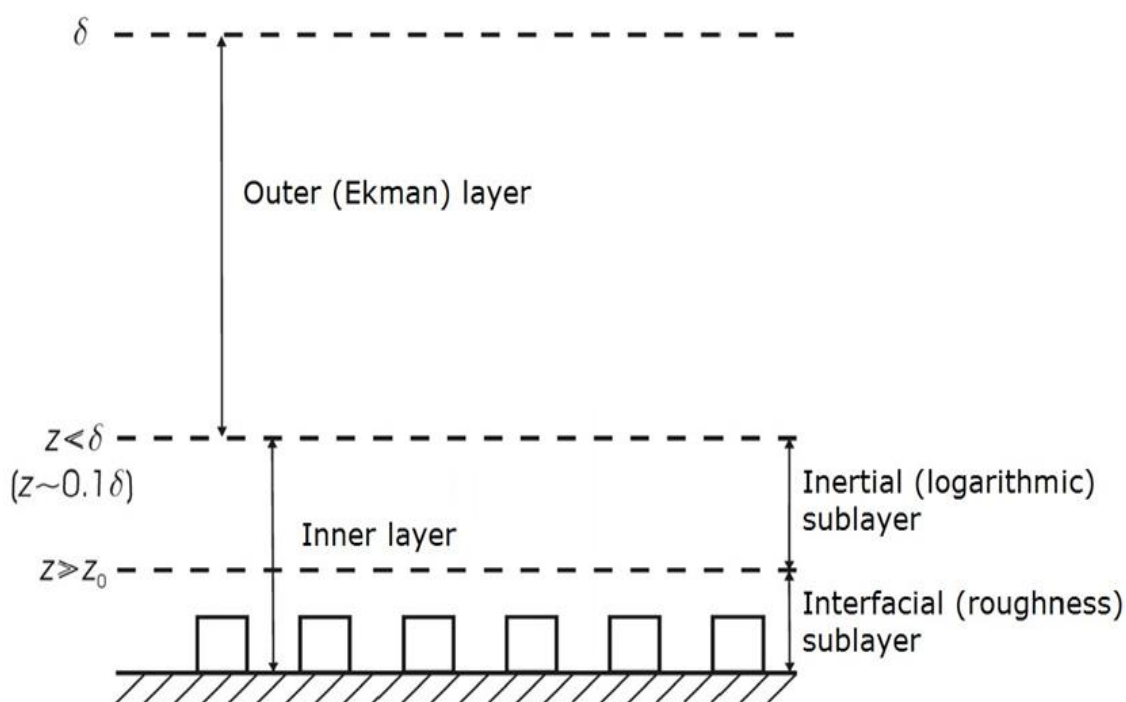
Visina na kojoj je brzina maksimalna zove se debljina graničnog sloja δ , a brzina na toj visini se označava sa u_δ , Slika 3.



Slika 3. Profil osrednjene brzine strujanja zraka u atmosferskom graničnom sloju [4]

2.3.1. Struktura atmosferskog graničnog sloja

Atmosferski granični sloj se općenito može podijeliti u dva osnovna sloja: unutarnji (engl. *inner layer*) i vanjski ili Ekmanov (engl. *outer layer* ili *Ekman layer*). Unutarnji sloj se još može podijeliti na inercijalni podsloj (engl. *inertial sublayer*) i prijelazni podsloj (engl. *interfacial or roughness sublayer*). Prijelaz između unutarnjeg i vanjskog sloja nije jasno definiran određenom granicom jer postoji područje preklapanja navedenih slojeva [4]. Slika 4. prikazuje strukturu atmosferskog graničnog sloja, gdje δ predstavlja debljinu sloja, z visinu iznad Zemljine površine, a z_0 aerodinamičku duljinu hrapavosti.



Slika 4. Struktura atmosferskog graničnog sloja [4]

Na strujanje u vanjskom ili Ekmanovom sloju prvenstveno utječe Coriolisova sila, kao posljedica Zemljine rotacije. Za razliku od vanjskog sloja, strujanje u unutarnjem sloju je pod dominantnim utjecajem Zemljine površine, te se utjecaj Coriolisove sile može zanemariti. Unutarnji sloj se proteže do visine $z = 100$ m što obuhvaća i zgradu koja je analizirana u ovom radu. U prijelaznom podsloju, Zemljina površina znatno utječe na turbulentno strujanje u kojemu su brzina promjene mase, količine gibanja i energije prvenstveno uvjetovane molekularnom difuzijom. Prijelazni podsloj se obično proteže do visine koja nadilazi visinu

objekata koji se uobičajeno analiziraju u aerodinamici okoliša i konstrukcija (zgrade, neboderi, mostovi, itd.). U inercijalnom podsloju za razliku od prijelaznog podsloja, brzina promjene mase, količine gibanja i energije su uvjetovane turbulentnim naprezanjem, dok se promjena uslijed molekularne difuzije može zanemariti.

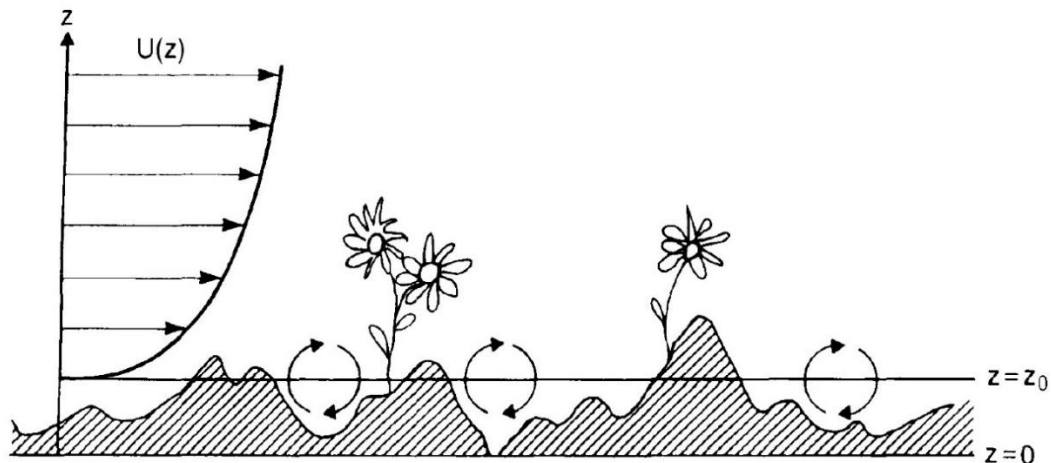
2.3.1.1. Aerodinamička duljina hrapavosti z_0

Brzina vjetra u turbulentnom strujanju ne ovisi samo o visini iznad Zemljine površine nego i o aerodinamičkoj duljini hrapavosti z_0 koja predstavlja visinu iznad tla gdje je srednja brzina jednaka nuli [7], [16]. Vrijednosti aerodinamičkih duljina hrapavosti se razlikuju za različite tipove terena, kao što je prikazano u Tablici 1. Otvorena područja bez znatnih prepreka, kao što su otvorena morska površina i površina s rijetkom vegetacijom, imaju niske vrijednosti aerodinamičke duljine hrapavosti, dok centri većih gradova s visokim zgradama i neboderima imaju vrlo visoke vrijednosti z_0 . Osnovni faktori koji opisuju aerodinamičku duljinu hrapavosti su visina, oblik i gustoća smještenosti elemenata na površini.

Tablica 1. Klasifikacija hrapavosti terena s odgovarajućim vrijednostima z_0 [22]

	z_0 [m]	Opis površine
1.	0,0002	Otvorena morska površina, teren pokriven snijegom, ravne pustinje, asfalt, beton
2.	0,005	Površina zemlje bez značajnih prepreka i vegetacije
3.	0,03	Ravnice s niskom vegetacijom, npr. travnjaci. Razmak između prepreka iznosi barem 50 visina prepreke ($50H$)
4.	0,1	Poljoprivredna područja s niskim usjevima i ponekim preprekama (farma, izolirana drveća, živice i sl.) Razmak između prepreka $20H$
5.	0,25	Krajolik s brežuljcima ili visokim usjevima, prepreke kao npr. zidovi, ograde ili vinogradi. Razmak između prepreka $15H$
6.	0,5	Poljoprivredna područja s gusto raspoređenim preprekama; niske šume, voćnjaci, predgrađa. Razmak između prepreka $10H$
7.	1	Krajolik potpuno pokriven niskim objektima, međusobno slične visine, npr. šume, naselja s građevinama približno jednake veličine. Razmak između prepreka $1H$
8.	≥ 2	Centri većih gradova, kombinacija visokih i niskih građevina jednako raspoređenih po cijelom prostoru. Šume s izmjenama područja visokih i niskih stabala ili s mnogo proplanaka

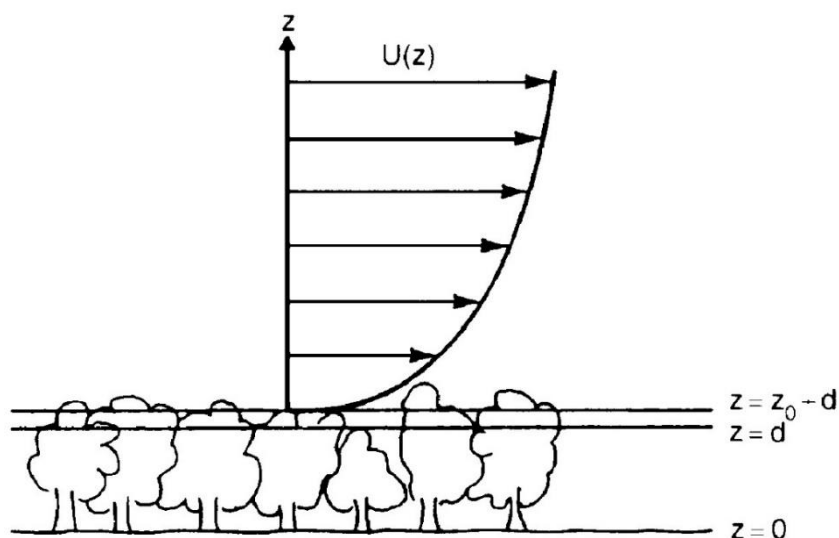
Pojednostavljeno aerodinamička duljina hrapavosti se može opisati i kao veličina vrtloga koji se formiraju uslijed interakcije između površine Zemlje i sloja zraka, Slika 5.



Slika 5. Shematski prikaz aerodinamičke duljine hrapavosti [7]

2.3.1.2. Debljina istisnuća atmosferskog graničnog sloja d

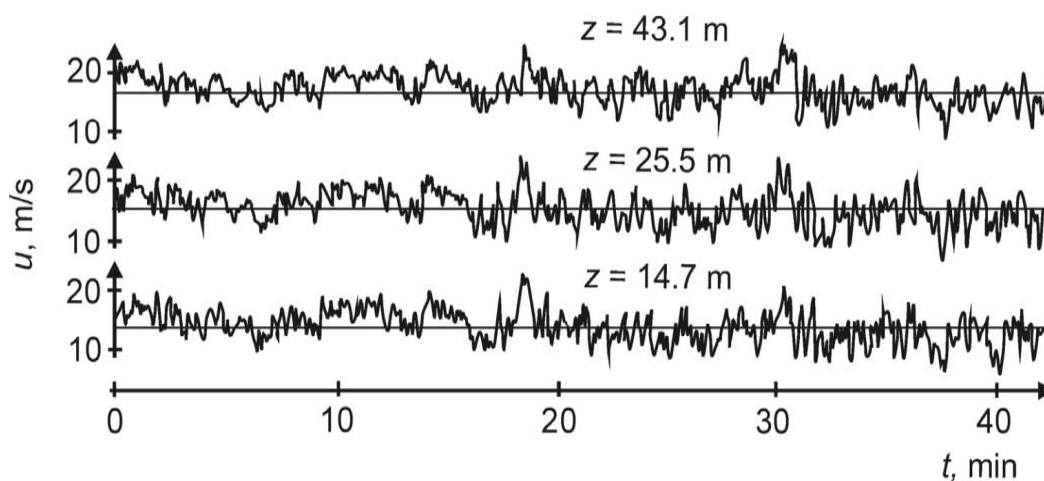
U slučaju strujanja kroz površinu s gusto raspoređenim elementima površinske hrapavosti (šume, gradske četvrti i sl.), atmosferski granični sloj biva pomaknut (istisnut) vertikalno prema gore za visinu d koja predstavlja debljinu istisnuća atmosferskog graničnog sloja. Obično se uzima da je ta visina jednaka visini elemenata površinske hrapavosti, kao npr. visina drveća u slučaju strujanja kroz šumu ili pak visina zgrada u slučaju strujanja kroz gradsku četvrt, Slika 6.



Slika 6. Formiranje atmosferskog graničnog sloja uslijed strujanja nad površinom s gusto raspoređenim elementima površinske hrapavosti [7]

2.3.2. Karakteristike osrednjene brzine

Strujanje u atmosferskom graničnom sloju je izrazito turbulentno, s obzirom da brzina vjetra znatno oscilira oko osrednjene vrijednosti, Slika 7. Pri modeliranju atmosferskog graničnog sloja, potrebno je uzeti u obzir pulzacije brzine koje se javljaju u atmosferi kao nadopuna na osrednjene brzine vjetra.



Slika 7. Brzina vjetra izmjerena na različitim visinama u području atmosferskog graničnog sloja prema Dyrbyeu i Hansenu [7]

Za razlikovanje vremenski osrednjenih vrijednosti od pulzirajućih komponenti apsolutne (trenutne) brzine, apsolutna brzina se prikazuje kao zbroj vremenski osrednjenih brzina (\bar{u} , \bar{v} , \bar{w}) i pulzirajućih komponenti (u' , v' , w'):

$$u = \bar{u} + u', \quad (2.1)$$

$$v = \bar{v} + v', \quad (2.2)$$

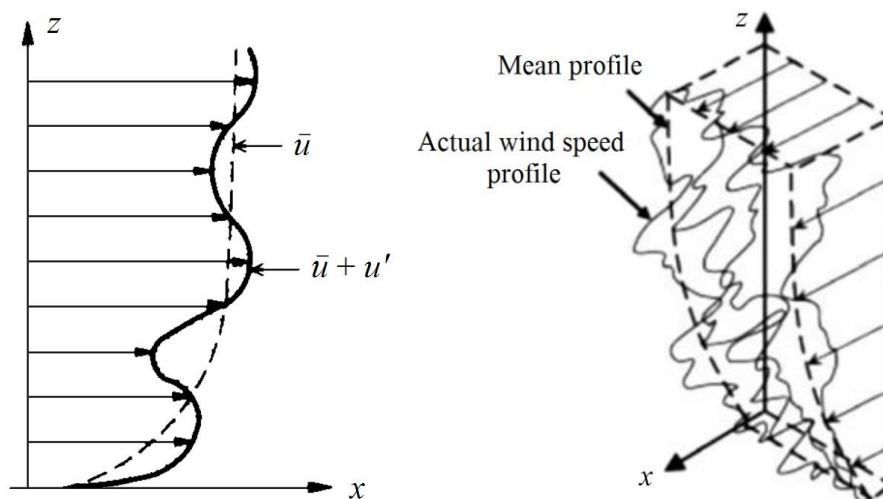
$$w = \bar{w} + w'. \quad (2.3)$$

Vremenski osrednjena brzina se računa sukladno izrazu,

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} u(t - T) dt, \quad (2.4)$$

gdje T predstavlja neki vremenski period [7].

Iako je strujanje u atmosferskom graničnom sloju trodimenzionalno, iznos komponente vremenski osrednjene brzine u longitudinalnom smjeru je znatno veći od iznosa komponenta u drugim smjerovima ($\bar{u} \gg \bar{v}$ i $\bar{u} \gg \bar{w}$). Stoga se komponente brzine u lateralnom (y -os) i vertikalnom (z -os) smjeru uglavnom zanemaruju [16].



Slika 8. Vertikalni profil apsolutne i vremenski osrednjene brzine u smjeru strujanja (x -os) prema Dyrbyeu i Hansenu [7], Manwellu, McGowanu i Rodgersu [2]

2.3.3. Empirijski izrazi za modeliranje atmosferskog graničnog sloja

Za opisivanje stacionarnog homogenog atmosferskog graničnog sloja se često koriste empirijski izrazi koji su izvedeni na temelju mjerenja u prirodi. To su dva osnovna zakona:

- a) zakon potencije (*power law*)
- b) logaritamski zakon (*logarithmic law*).

Zakon potencije definira vertikalnu raspodjelu osrednjene brzine u smjeru strujanja (longitudinalni smjer, x -os). Ovaj zakon vrijedi za cijelo područje strujanja u graničnom sloju, tj. čitavu debljinu atmosferskog graničnog sloja.

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{ref}}} = \left(\frac{z - d}{z_{\text{ref}} - d} \right)^{\alpha} = \left(\frac{\tilde{z}}{\tilde{z}_{\text{ref}}} \right)^{\alpha}, \quad (2.5)$$

gdje $\bar{u}(z)$ predstavlja brzinu na visini z iznad površine, z_{ref} je referentna visina, \bar{u}_{ref} referentna brzina, d je debljina istisnuća, a α je eksponent zakona potencije izračunat prema Couninhanu [3],

$$\alpha = 0,0961 \log z_0 + 0,016(\log z_0)^2. \quad (2.6)$$

Logaritamski zakon modelira strujanje u području između površine i 10% vrijednosti debljine atmosferskog graničnog sloja. Predložili su ga Thuillier i Lappe [8], a zakon je opisan sljedećom jednačinom,

$$\bar{u} = u_{\tau} \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right), \quad (2.7)$$

gdje u_{τ} predstavlja brzinu trenja, d je debljina istisnuća, a κ je Von Kármán-ova konstanta koja iznosi $\kappa = 0,41$. Brzina trenja se računa kako je dano u [9] i [10].

3. MATEMATIČKI MODEL TURBULENTNOG STRUJANJA

Kako bi se opisalo opstrujavanje nestlačivog fluida oko konstrukcije izložene vjetru, potrebno je riješiti sustav parcijalnih diferencijalnih jednačbi, a koji se sastoji od jednačbe kontinuiteta i jednačbe količine gibanja,

- Jednačba očuvanja mase (jednačba kontinuiteta)

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

- Jednačba količine gibanja

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j}, \quad (3.2)$$

gdje je μ dinamička viskoznost, a f_i specifična masena sila. S lijeve strane jednačbe količine gibanja nalaze se redom nestacionarni i konvekcijski član, dok su na desnoj strani članovi masene sile, gradijenta tlaka i difuzije. Ovaj sustav parcijalnih diferencijalnih jednačbi se sastoji od jedne skalarne i jedne vektorske jednačbe, a jedine dvije nepoznanice su vektor brzine u_i i skalar tlaka p . Problem pri rješavanju predstavlja nelinearnost u konvektivnom članu u jednačbi očuvanja količine gibanja. Pri diskretizaciji, ovaj član se linearizira, a nelinearnost se rješava iterativno.

3.1. Vremenski osrednjene Navier-Stokesove jednačbe (RANS)

Kako je turbulentno strujanje izrazito nestacionarno, pri računalnom rješavanju Navier-Stokesovih jednačbi diskretizacija područja proračuna treba biti dovoljno gusta da obuhvati i najmanje amplitude pulzacija, dok vremenski korak integracije treba biti dovoljno malen da obuhvati i najviše frekvencije turbulentnih pulzacija. Međutim, postoje razlozi zašto se to tako ne radi u stvarnosti, a osnovni je kapacitet simulacije i brzina računanja računala. Rezultat takve simulacije je skup vrijednosti traženih polja fizikalnih veličina (polje brzine i tlaka u nestlačivom strujanju) u velikom broju prostornih točaka za velik broj vremenskih trenutaka. Stoga se u ovom radu Navier-Stokesove jednačbe rješavaju uz korištenje osrednjenih veličina. Promatra se nestlačivo strujanje ($\rho = konst.$), u kojem je zanemaren utjecaj masenih sila ($f_i \equiv 0$). Kao što je već opisano, koriste se jednačba kontinuiteta i jednačba količine gibanja

u kojima su nepoznate komponente polja brzine v_i i polje tlaka p . Ove veličine su prikazane kao zbroj osrednjenih vrijednosti i njihovog pulzirajućeg dijela:

$$v_i = \bar{v}_i + v_i', \quad (3.3)$$

$$p_i = \bar{p}_i + p_i'. \quad (3.4)$$

Navier-Stokesove jednačbe za nestlačivo strujanje s vremenski osrednjenim veličinama su: jednačba kontinuiteta

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (3.5)$$

i jednačba količine gibanja za nestlačivo strujanje

$$\rho \frac{\partial (\bar{v}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{v}_i \bar{v}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{v'_i v'_j} \right]. \quad (3.6)$$

Ovaj skup vremenski osrednjenih jednačbi naziva se Reynoldsovim jednačbama. U jednačbi (3.6) se vidi da se ne može analizirati samo osrednjeno strujanje jer se pojavljuje član s pulzirajućim komponentama $\rho \overline{v'_i v'_j}$. Taj član predstavlja turbulentna Reynoldsova naprežanja. Tenzor Reynoldsovih naprežanja je simetričan i ima šest nepoznanica:

$$-\rho \overline{v'_i v'_j} = \begin{bmatrix} -\rho \overline{v'_1 v'_1} & -\rho \overline{v'_1 v'_2} & -\rho \overline{v'_1 v'_3} \\ \vdots & -\rho \overline{v'_2 v'_2} & -\rho \overline{v'_2 v'_3} \\ \text{simetrično} & \dots & -\rho \overline{v'_3 v'_3} \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Ovaj tenzor otežava rješavanje problema u turbulentnom strujanju jer zbog njega sustav Reynoldsovih jednačbi sadrži više nepoznanica nego jednačbi. Navedeni problem najčešće se modelira Boussinesqovom aproksimacijom čija je ideja da se turbulentna naprežanja (koja su posljedica kaotičnog turbulentnog miješanja čestica fluida) modeliraju sličnim viskoznim naprežanjima (koja su posljedica kaotičnog gibanja atoma i molekula unutar čestica fluida).

3.2. Modeli turbulencije

Osnovna ideja modela turbulencije jest rješavanje turbulentne viskoznosti μ_t pomoću Reynoldsovog osrednjavanja. Modeli turbulencije dijele se s obzirom na red korelacije brzina za koju se rješava transportna jednačba na modele prvog, drugog i trećeg reda. Modeli prvog

reda su najjednostavniji, a njima se modelira tenzor Reynoldsovih naprežanja i to uglavnom prema hipotezi Boussinesqa u obliku:

$$-\rho \overline{v'_i v'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \bar{k} \delta_{ij}, \quad (3.8)$$

gdje je μ_t turbulentna viskoznost koja nije fizikalno svojstvo fluida već funkcija uvjeta strujanja, a \bar{k} predstavlja kinetičku energiju turbulencije koja se računa prema:

$$\bar{k} = \frac{1}{2} \overline{v'_i v'_i}. \quad (3.9)$$

Hipotezom Boussinesqa šest komponenti tenzora Reynoldsovih naprežanja modelira se jednim nepoznatim poljem turbulentne viskoznosti.

Uvrštavanjem Boussinesqove hipoteze u Reynoldsove jednačbe, od jednačbe (3.6) dobije se:

$$\rho \frac{\partial (\bar{v}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{v}_i \bar{v}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial (\bar{p} + \frac{2}{3} \rho \bar{k})}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (3.10)$$

gdje član $\bar{p} + \frac{2}{3} \rho \bar{k}$ predstavlja efektivni tlak, a zbroj dinamičke i turbulentne viskoznosti $\mu + \mu_t$ predstavlja efektivnu viskoznost.

3.3. $k - \varepsilon$ model turbulencije

Do danas je razvijeno više modela turbulencije, no najčešće korišteni su $k - \varepsilon$ i $k - \omega$ modeli. U ovom poglavlju bit će opisan $k - \varepsilon$ model koji je vjerojatno najrašireniji model Reynoldsovog naprežanja s dvije jednačbe, a korišten je i u ovom radu. Kinetička energija turbulencije k računa se prema jednačbi (3.9), dok je disipacija kinetičke energije turbulencije ε definirana izrazom:

$$\bar{\varepsilon} = \nu \frac{\partial v'_i}{\partial x_j} \frac{\partial v'_i}{\partial x_j}. \quad (3.11)$$

Standardni $k - \varepsilon$ model opisan je s dvije jednačbe koje je potrebno riješiti da bi se dobile vrijednosti k , odnosno ε :

$$\frac{\partial (\rho \bar{\varepsilon})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{v}_j \bar{\varepsilon})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x_j} \right] + C_1 G \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{k}} + C_2 \rho \frac{\bar{\varepsilon}^2}{\bar{k}}, \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{k})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{v}_j\bar{k})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma^k} \right) \frac{\partial\bar{k}}{\partial x_j} \right] + G - \rho\bar{\varepsilon}, \quad (3.13)$$

gdje član G predstavlja generaciju kinetičke energije (izvorski član), a definiran je izrazom:

$$G = \frac{1}{2} \mu_t \left(\frac{\partial\bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial\bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{v}_j}{\partial x_i} \right). \quad (3.14)$$

Već spomenuta turbulentna viskoznost računa se prema izrazu:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{\bar{k}^2}{\bar{\varepsilon}}. \quad (3.15)$$

Standardne vrijednosti konstanti modela dane su u sljedećoj tablici:

Tablica 2. Konstante $k - \varepsilon$ modela turbulencije [11]

κ	C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
0,42	0,09	1,00	1,30	1,44	1,92

3.4. Modeliranje turbulencije u blizini zida

Prethodno navedeni modeli vrijede za visoke vrijednosti turbulentnog Reynoldsovog broja koji je definiran kao:

$$Re_t = \frac{\mu_t}{\mu}, \quad (3.16)$$

za režim strujanja u kojem je turbulentna viskoznost bitno veća od molekularne viskoznosti. Poteškoće nastaju uslijed opisivanja modela u blizini čvrste stijenke gdje se javljaju veliki gradijenti fizikalnih veličina. Naime, brzina fluida na samoj stijenci jednaka je nuli dok se udaljavanjem od stijenke povećava. Isto vrijedi za turbulentne pulzacije koje u području blizu stijenke imaju niske vrijednosti, što uzrokuje niske vrijednosti turbulentne viskoznosti u tom sloju, a time i Re_t . Zbog relativno niskog Re_t , u blizini stijenke se ne može primijeniti $k - \varepsilon$ model turbulencije pa se ovaj problem uobičajeno rješava na jedan od sljedeća dva načina:

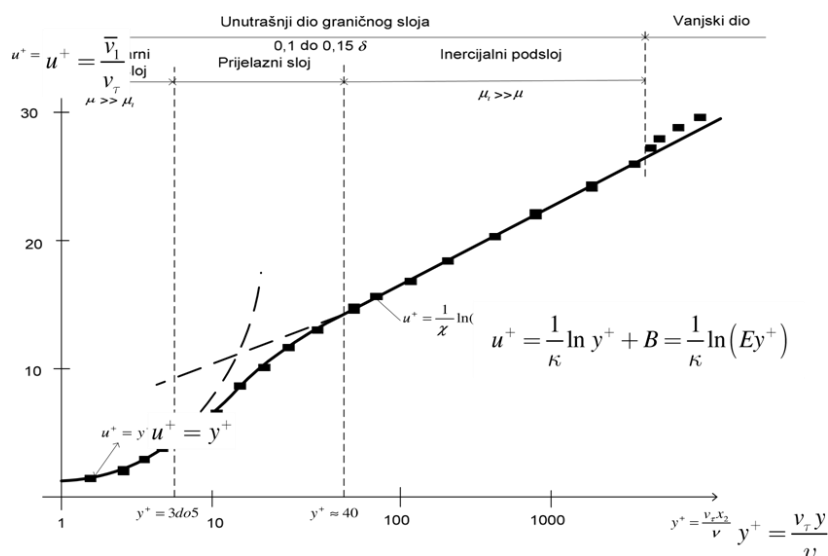
- Low Reynolds* modeli turbulencije u potpunosti rješavaju strujanje u blizini stijenke odnosno u područjima niskog Re_t . To znači da koriste izrazito gustu računalnu mrežu u blizini same stijenke čime poskupljuju i znatno otežavaju proračun, što predstavlja osnovni razlog zašto nemaju širu primjenu.

- b) Zidne funkcije definiraju nove rubne uvjete na rubu područja u kojem ne vrijedi $k - \varepsilon$ model turbulencije. Takvim se rješavanjem izbjegava korištenje velikih rezolucija mreže u blizini zida što proračun čini jednostavnijim.

U ovome radu korištena je zidna funkcija koja će kasnije biti opisana. Općenito, turbulentno strujanje u blizini čvrste stijenke može se podijeliti na tri osnovna područja:

- Viskozni podsloj, $y^+ < 3 - 5$
Efekti viskoznosti u viskoznom sloju su nekoliko redova veličina veći od efekata turbulencije koji se stoga mogu zanemariti.
- Prijelazni podsloj, $5 < y^+ < 30$
Ovaj podsloj karakterističan je po približno jednakom efektu viskoznosti i turbulencije (istog su reda veličine).
- Inercijalni podsloj, $y^+ > 30$
Efekti turbulencije su znatno veći od efekata viskoznosti koji se stoga mogu zanemariti.

Navedeni podslojevi prikazani su u sljedećem dijagramu, Slika 9.



Slika 9. Dijagram promjene bezdimenzijske brzine u ovisnosti o bezdimenzijskoj udaljenosti [11]

3.5. Modeliranje strujanja uz zidnu stijenku

Zidne funkcije rješavaju problem strujanja uz stijenku korištenjem empirijskih izraza. Iz tih izraza računaju se tražene veličine izvan viskoznog sloja što omogućava rješavanje jednadžbe količine gibanja i jednadžbe modela turbulencije bez potrebe za rješavanjem tih jednadžbi unutar viskoznog podsloja. Osnovni uvjet za to je smještanje centra kontrolnog volumena

najbližeg zidnoj funkciji u inercijalnom podsloju. Osnovni oblik standardne zidne funkcije glasi:

$$u^+ = \frac{\bar{u}_t}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) + B, \quad (3.17)$$

gdje je \bar{u}_t osrednjena brzina paralelna sa zidom, κ je von Kármán-ova konstanta, E je parametar hrapavosti podloge, B je empirijska konstanta koja ovisi o debljini viskoznog podsloja, dok je u_τ brzina trenja definirana kao:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}. \quad (3.18)$$

y^+ je bezdimenzijska udaljenost od zida, a računa se prema:

$$y^+ = \frac{\rho \cdot u_\tau \cdot y}{\mu}, \quad (3.19)$$

gdje y predstavlja udaljenost od zida.

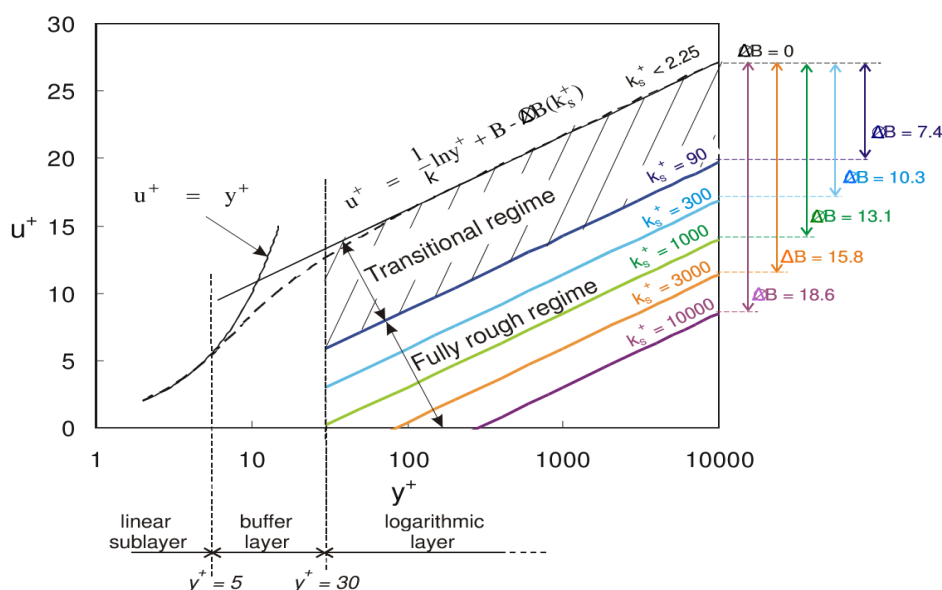
Zidna funkcija vrijedi samo u slučaju da se centar prvog kontrolnog volumena nalazi unutar inercijalnog sloja. Granična vrijednost bezdimenzijske udaljenosti u OpenFOAM®-u je $y^+ = 11,6$, što znači da se za vrijednosti $y^+ > 11,6$ koristi zidna funkcija, dok se za vrijednosti $y^+ < 11,6$ koristi linearni profil brzine $u^+ = y^+$, Slika 10.

Zidna funkcija za kinetičku energiju turbulencije k , koja je korištena u ovom radu, koristi rubni uvjet nultog gradijenta na zidu, dok se disipacija kinetičke energije turbulencije ε računa sljedećim izrazom:

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} \cdot k^{\frac{3}{2}}}{\kappa \cdot z_p}, \quad (3.20)$$

gdje je z_p koordinata središta prvog kontrolnog volumena.

U ovom radu je korištena *nutkRoughWallFunction* zidna funkcija koja uzima u obzir hrapavost površine. Pri postavljanju ove zidne funkcije potrebno je definirati parametre hrapavosti, a to su Nikuradseova visina hrapavosti k_s , te konstanta hrapavosti C_s . Stvarna vrijednost visine hrapavosti zida ovisi o više faktora kao što su npr. visina, oblik, gustoća ili raspored hrapavosti pa se može napisati $k = f(k_s)$. U ovom slučaju, C_s služi za opisivanje vrste hrapavosti. Ova zidna funkcija računa tangencijalno naprezanje na hrapavom zidu pomoću zakona zida, Slika 10.



Slika 10. Zakon zida prikazan u kontekstu Nikuradseove visine hrapavosti [21]

Kao što je prikazano na Slici 10., zakon zida u ovom slučaju se može zapisati kao:

$$\frac{u_p}{u_\tau} = u_p^+ = \frac{1}{k} \ln(y_p^+) + B - \Delta B(k_s^+), \quad (3.21)$$

gdje B predstavlja konstantu zakona zida, dok je bezdimenzijska visina hrapavosti k_s^+ definirana kao:

$$k_s^+ = \frac{\rho u_\tau k_s}{\mu}. \quad (3.22)$$

Za modeliranje zidne funkcije, kao ulazne podatke, u OpenFOAM® je potrebno upisati Nikuradseovu visinu hrapavosti k_s i konstantu hrapavosti C_s . Prema Montazeriju i Blockenu [13], vrijedi sljedeći izraz,

$$k_s = \frac{9.793 z_0}{C_s}, \quad (3.23)$$

gdje je $C_s = 7$, prema preporuci [13], a $z_0 = 0,008$ m prema eksperimentu iz zračnog tunela [14]. Ovaj izraz je izveden za CFD software Fluent, no Martinez [21] je pokazao da se može koristiti i za OpenFOAM®.

Pri rješavanju zidne funkcije u OpenFOAM® sučelju se provjerava nalazi li se centar prvog kontrolnog volumena u inercijskom sloju (*logarithmic layer*), Slika 10. Pritom se osigurava

$y_p^+ > y_{lim}^+$, gdje je y_{lim}^+ granica koja nastaje spajanjem krivulje ($u^+ = y^+$) s logaritamskom krivuljom za glatki zid. Ta granica se rješava iterativno pošto njezina vrijednost ovisi o odabiru konstanti κ i E koje postavlja korisnik [21]. Isto tako, radi osiguranja točnosti zidne funkcije, potrebno je osigurati da se centar prvog kontrolnog volumena nalazi iznad Nikuradseove visine hrapavosti, $z_p > k_s$.

4. RAČUNALNI MODEL

U ovom poglavlju će biti definirane računalne postavke korištene za rješavanje problema u ovome radu. Za generiranje mreže korišten je *utility blockMesh* koji je standardni dio računalnog paketa OpenFOAM®, a koristi se za stvaranje relativno jednostavnih računalnih domena.

U zadatku je potrebno simulirati nastrojavanje vjetra za različite tipove strujanja, te je potrebno rezultate usporediti s vrijednostima iz dostupne literature. Korištena su tri tipa nastrojavanja vjetra, odnosno tri profila atmosferskog graničnog sloja:

1. profil prema Montazeriju i Blockenu [13],
2. profil karakterističan za strujanje iznad ruralnog područja, prema Kozmaru [18],
3. profil karakterističan za strujanje iznad suburbanog područja, prema Kozmaru [18].

Montazeri i Blocken [13] su napravili CFD analizu opstrujavanja zgrade izložene vjetru, a dobivene računalne rezultate su usporedili s rezultatima iz zračnog tunela [14]. U ovome radu cilj je bio ostvariti uvjete opstrujavanja postignute od strane Montazerija i Blockena [13], te simulirati dva dodatna tipa opstrujavanja zgrade prema Kozmaru [18].

4.1. Ulazni profili

Na ulazu u računalnu domenu zadani su profili osrednjene brzine $\bar{u}(z)$, kinetičke energije turbulencije $k(z)$, te disipacije kinetičke energije turbulencije $\varepsilon(z)$ izračunati koristeći izraze dane u [23]. Shodno tome, ulazni profil osrednjene brzine $\bar{u}(z)$ izračunat je iz sljedećeg izraza,

$$\bar{u}(z) = u_{\tau} \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z-z_0}{z_0} \right), \quad (4.1)$$

dok su ulazni profili kinetičke energije turbulencije i disipacije kinetičke energije turbulencije izračunati iz,

$$k = \frac{u_{\tau}^2}{\sqrt{C_{\mu}}}, \quad (4.2)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_{\tau}^3}{\kappa(z + z_0)}. \quad (4.3)$$

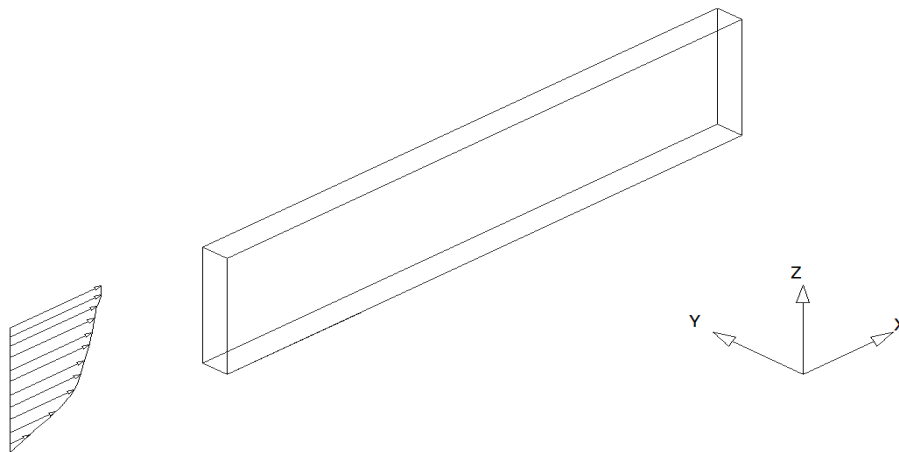
Pritom u_τ predstavlja brzinu trenja, a C_μ je konstanta $k - \varepsilon$ modela turbulencije, dok su u Tablici 3. dane vrijednosti parametara potrebnih za generiranje ulaznih profila korištenih u računalnim simulacijama.

Tablica 3. Koeficijenti potrebni za računanje ulaznog profila prema Montazeriju i Blockenu [13]

	z_0 [m]	u_τ [m/s]
Montazeri i Blocken (MB) [13]	0,008	0,73
Suburbani profil [18]	0,004	1,1
Ruralni profil [18]	0,0016	1,11

4.2. Testiranje homogenosti atmosferskog graničnog sloja u dvodimenzionalnoj (2D) računalnoj domeni

Radi provjere homogenosti atmosferskog graničnog sloja provedena je simulacija u praznoj dvodimenzionalnoj (2D) domeni kako bi se ispitalo odgovaraju li ulazni profili profilima na bilo kojem položaju uzduž longitudinalne osi (x -osi), pri čemu je dovoljno bilo testirati samo presjek na poziciji gdje se nalazi zgrada. Rubni uvjeti na rubovima *left* i *right* koji gledaju u sliku, odnosno iz slike, zadani su kao *empty*, što je standardan postupak pri rješavanju dvodimenzionalnih problema u OpenFOAM®-u. Slika 11. shematski prikazuje izgled dvodimenzionalne domene.

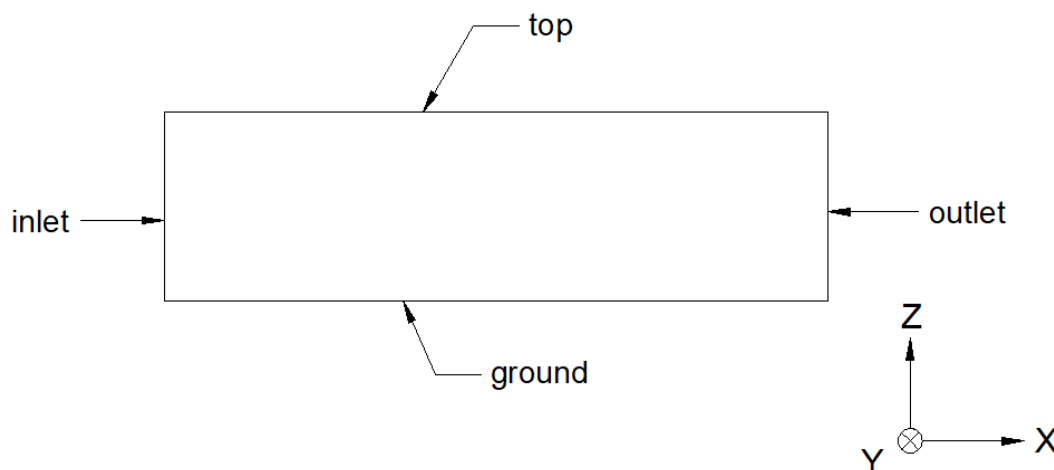


Slika 11. Shematski prikaz računalne domene koja je korištena za testiranje homogenosti ulaznih profila osrednjene brzine $\bar{u}(z)$, kinetičke energije turbulencije $k(z)$, te disipacije kinetičke energije turbulencije $\varepsilon(z)$

Tablica 4. Dimenzije dvodimenzionalne (2D) domene korištene za testiranje homogenosti ulaznih profila osrednjene brzine $\bar{u}(z)$, kinetičke energije turbulencije $k(z)$, te disipacije kinetičke energije turbulencije $\varepsilon(z)$

Smjer	Duljina, [m]	Broj kontrolnih volumena
longitudinalni smjer (x -os)	10,6	300
vertikalni smjer (z -os)	3	240

Dvodimenzionalna računalna domena sastoji se od 72 000 kontrolnih volumena. U smjeru y -osi korišten je samo jedan kontrolni volumen, s obzirom da diskretizacija u tom smjeru nema utjecaja na dvodimenzionalno strujanje. Slika 12. prikazuje rubne plohe u praznoj domeni. Ulazni i izlazni rubovi nazvani su *inlet* i *outlet*, tlo i gornja granica *ground* i *top*. Prilikom generiranja mreže konačnih volumena bilo je potrebno pripaziti na uvjet da visina hrapavosti k_s za svaki od tipova strujanja bude manja od udaljenosti težišta kontrolnog volumena z_p uz zidnu stijenku.



Slika 12. Shematski prikaz rubnih ploha korištenih za generiranje prazne 2D računalne domene

Tablica 5. prikazuje rubne i početne uvjete na granicama domene za sve fizikalne veličine koje se koriste u $k - \varepsilon$ modelu.

Tablica 5. Tablični prikaz rubnih uvjeta korištenih u 2D računalnim simulacijama

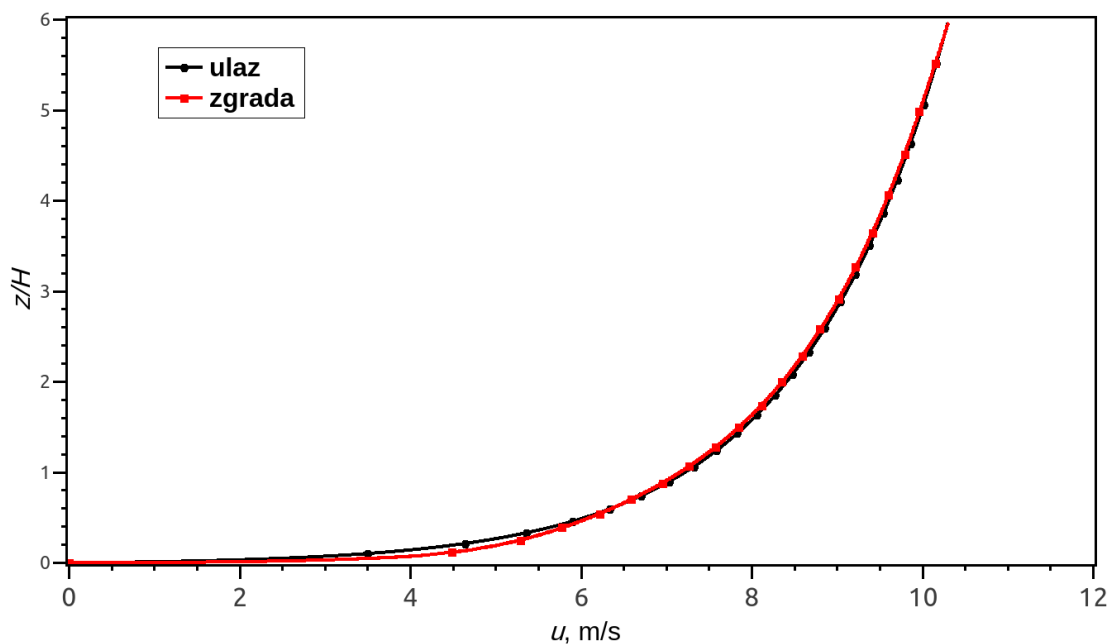
	u	p	k	ε	μ_t
<i>inlet</i>	$\bar{u}(z)$	$\frac{\partial p}{\partial x} = 0$	$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}}$	$\varepsilon(z)$	$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$
<i>outlet</i>	$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$	$p = 0$	$\frac{\partial k}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$	$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$
<i>ground</i>	$\bar{u} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial z} = 0$	<i>kqRWallFunction</i>	<i>epsilonWallFunction</i>	<i>nutkRoughWallFunction</i>
<i>top</i>	$\bar{u} = \bar{u}(H_D)$	$\frac{\partial p}{\partial z} = 0$	$k = k(H_D)$	$\varepsilon = \varepsilon(H_D)$	$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$

Osrednjena brzina na ulazu u domenu zadana je prema izrazu (4.1), dok je na izlazu postavljen uvjet nultog gradijenta. Na tlu je vrijednost osrednjene brzine jednaka nuli, dok je na vrhu domene (H_D) zadana vrijednost koja odgovara brzini ulaznog profila upravo na toj visini. Tlak je na svim ploham postavljen s rubnim uvjetom nultog gradijenta, osim na izlaznoj plohi gdje je jednak nuli. Prethodno opisani ulazni profili kinetičke energije turbulencije $k(z)$ i disipacije kinetičke energije turbulencije $\varepsilon(z)$ zadani su na ulazu u računalnu domenu, dok se turbulentna viskoznost računa prema sljedećem izrazu,

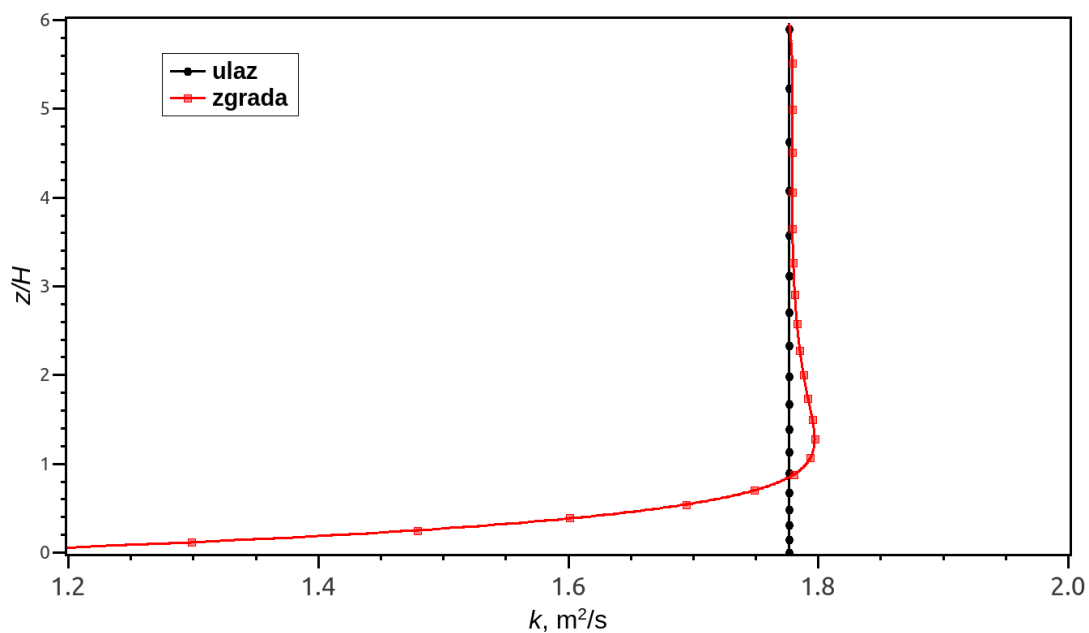
$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k(z)^2}{\varepsilon(z)}, \quad (4.3)$$

Sljedeće slike prikazuju profile osrednjene brzine $\bar{u}(z)$, kinetičke energije turbulencije $k(z)$, te disipacije kinetičke energije turbulencije $\varepsilon(z)$ za sva tri ispitivana tipa strujanja. Na svakom dijagramu prikazana je tražena veličina na ulazu u domenu, te na presjeku domene gdje će u trodimenzionalnoj računalnoj domeni biti model zgrade. Crnom linijom s kružićima prikazane su vrijednosti traženih veličina na ulazu u domenu, dok su crvenom linijom s kvadratićima prikazane vrijednosti na mjestu gdje se nalazi zgrada.

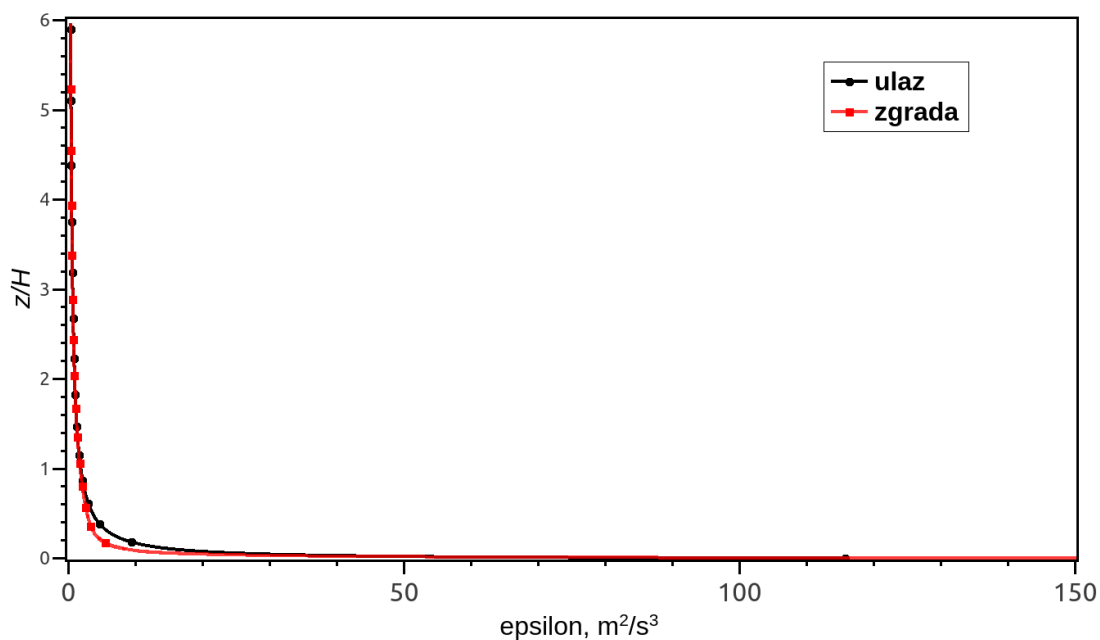
Slika 13., Slika 14. i Slika 15. prikazuju usporedbu analiziranih veličina gdje je kao ulazni profil korišten profil prema Montazeriju i Blockenu [13].



Slika 13. Usporedba profila osrednjene brzine $\bar{u}(z)$ u 2D domeni s ulaznim profilom prema Montazeriju i Blockenu [13]

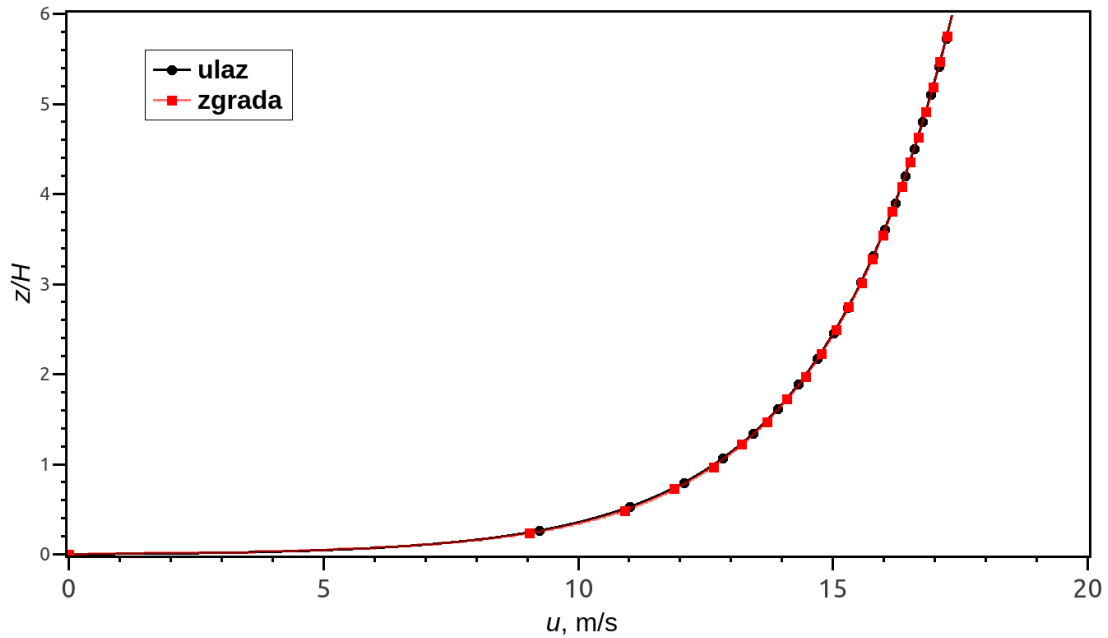


Slika 14. Usporedba profila kinetičke energije turbulencije $k(z)$ u 2D domeni s ulaznim profilom prema Montazeriju i Blockenu [13]

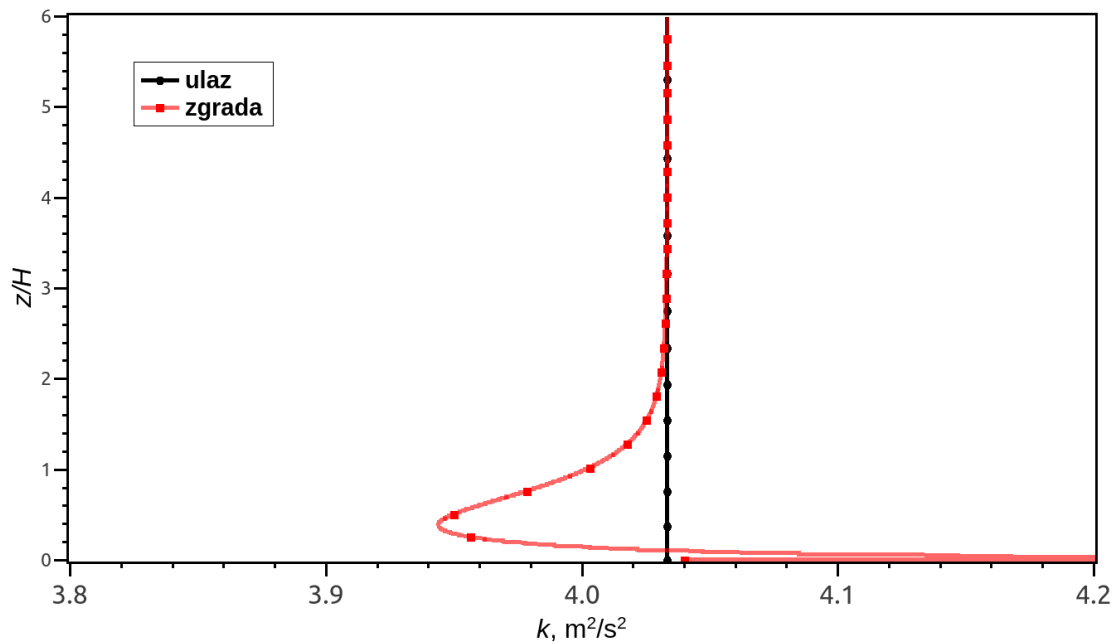


Slika 15. Usporedba profila disipacije kinetičke energije turbulencije $\epsilon(z)$ u 2D domeni s ulaznim profilom prema Montazeriju i Blockenu [13]

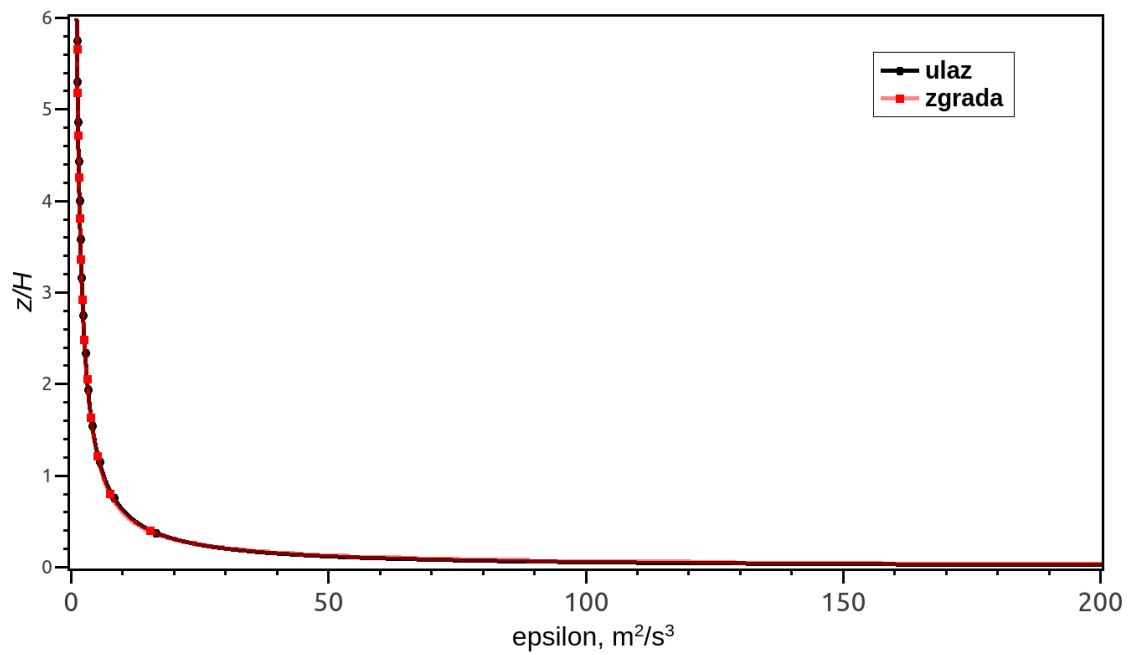
Slika 16., Slika 17. i Slika 18. prikazuju usporedbu profila brzine s ulaznim profilom u suburbanom području prema Kozmaru [18].



Slika 16. Usporedba profila osrednjene brzine $\bar{u}(z)$ u 2D domeni sa suburbanim ulaznim profilom prema Kozmaru [18]

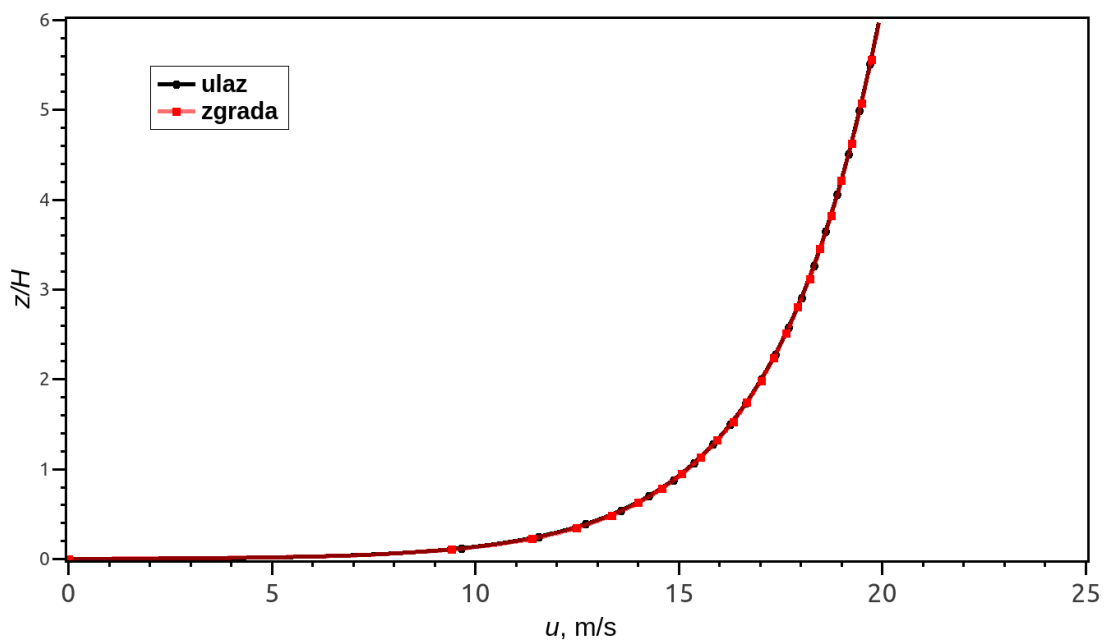


Slika 17. Usporedba profila kinetičke energije turbulencije $k(z)$ u 2D domeni sa suburbanim ulaznim profilom prema Kozmaru [18]

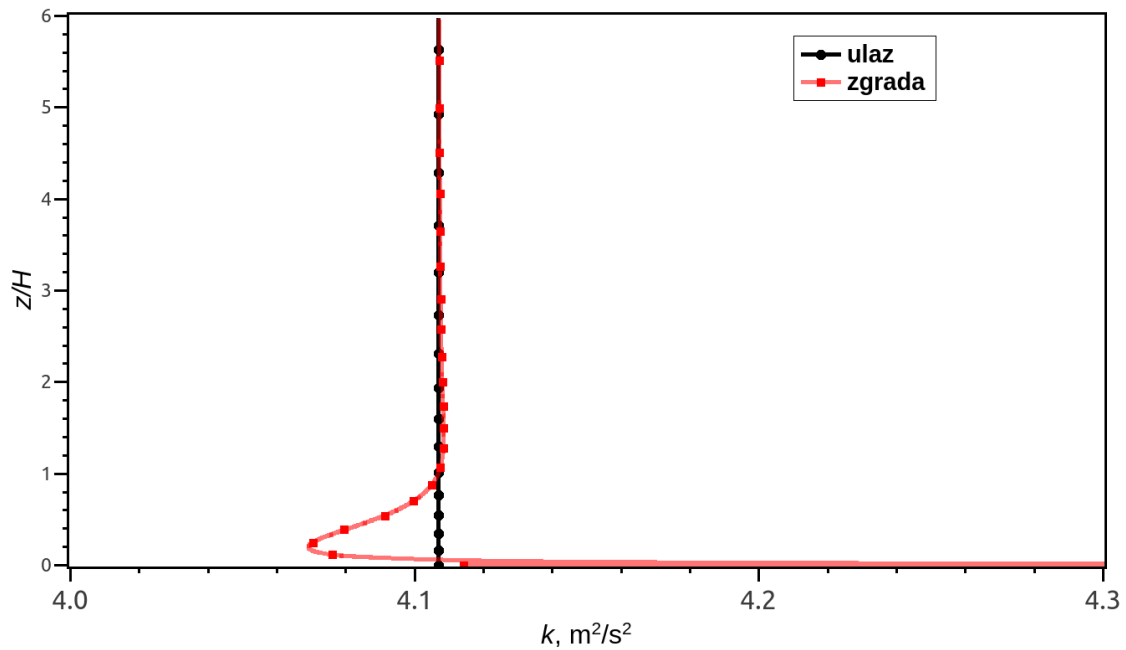


Slika 18. Usporedba profila disipacije kinetičke energije turbulencije $\epsilon(z)$ u 2D domeni sa suburbanim ulaznim profilom prema Kozmaru [18]

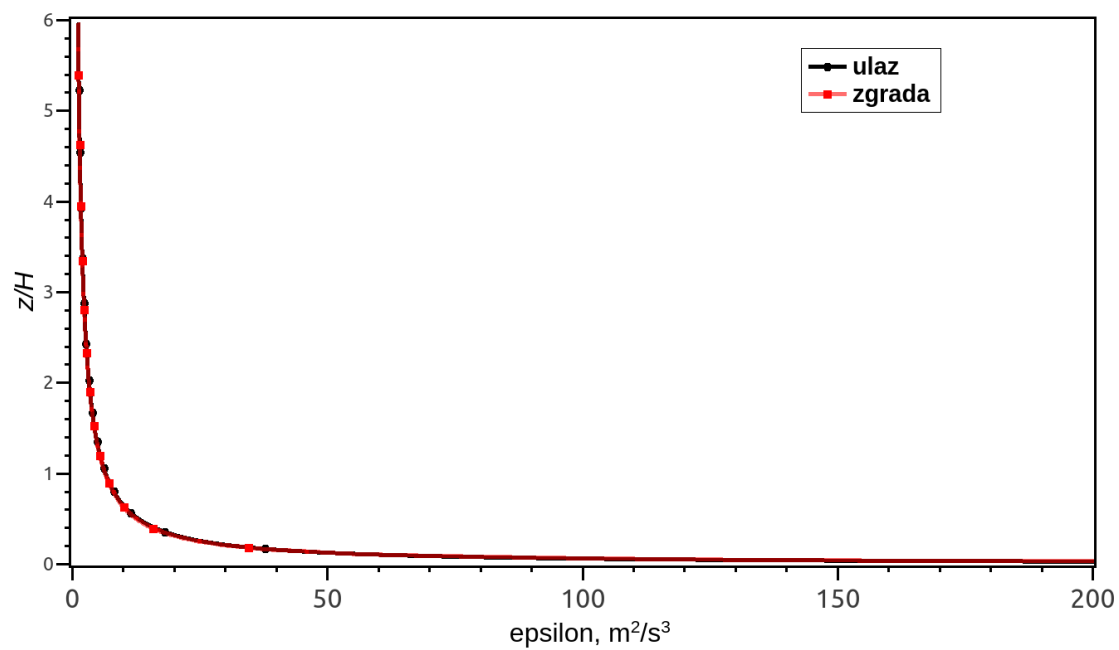
Slika 19., Slika 20. i Slika 21. prikazuju usporedbu profila brzine s ulaznim profilom u ruralnom području prema Kozmaru [18].



Slika 19. Usporedba profila osrednjene brzine $\bar{u}(z)$ u 2D domeni s ruralnim ulaznim profilom prema Kozmaru [18]



Slika 20. Usporedba profila kinetičke energije turbulencije $k(z)$ u 2D domeni s ruralnim ulaznim profilom prema Kozmaru [18]

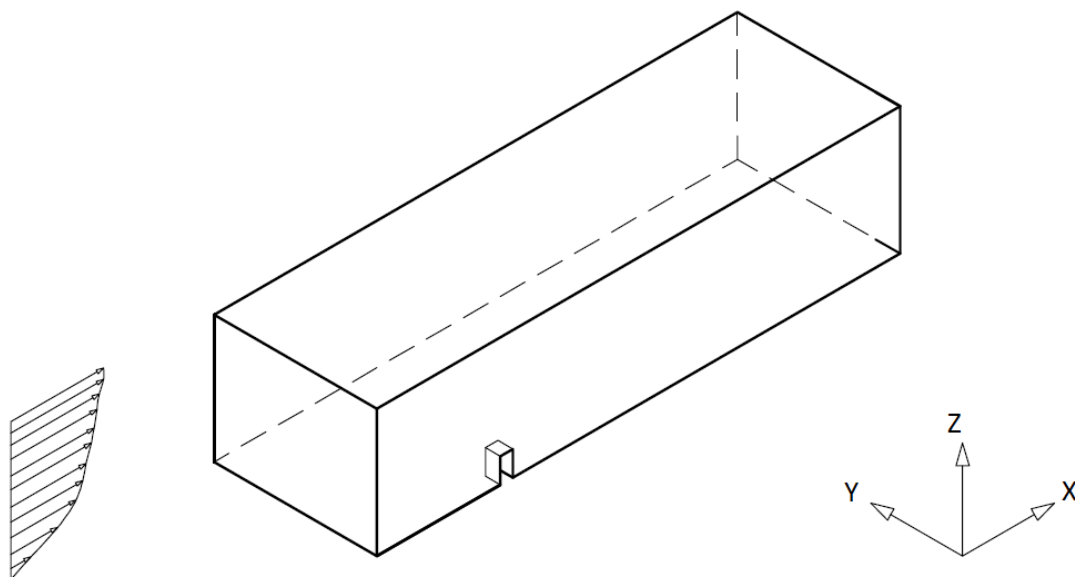


Slika 21. Usporedba profila disipacije kinetičke energije turbulencije $\epsilon(z)$ u 2D domeni s ruralnim ulaznim profilom prema Kozmaru [18]

U slučaju dijagrama s usporedbom kinetičke energije turbulencije (Slika 14., Slika 17., Slika 20.) postoje odstupanja u donjem dijelu domene (do visine zgrade), što je u skladu s odstupanjima nastalim zbog nekonzistentnosti između zidne funkcije i ulaznih profila. Ta odstupanja su otprije poznata i dobro opisana u [24]. Ono što se može uočiti jest da je za sva tri tipa profila vjetra profil osrednjene brzine homogen, što je jako bitan uvjet kako bi se osiguralo da ulazni profil ostane istog oblika do pozicije na kojoj će se nalaziti model zgrade [25].

4.2. Opis trodimenzionalne (3D) računalne domene

Za potrebe simulacije zgrade generirana je jedna polovina računalne domene s rubnim uvjetom simetrije s ciljem smanjenja potrebnog računalnog vremena za generiranje konačnih rezultata, Slika 23. Rubni uvjeti su postavljeni identično kao i u Tablica 5. za strujanje u 2D domeni, osim stranica *left* i *right* koje su postavljene kao simetrične rubne plohe. U trodimenzionalnoj domeni nalazi se zgrada koja je postavljena kao zidna ploha (*wall*) što znači da sadrži identične zidne funkcije za kinetičku energiju turbulencije i disipaciju kinetičke energije turbulencije kao i ploha *ground*, dok se turbulentna viskoznost rješava tzv. *nutkWallFunction* zidnom funkcijom za glatki zid. Tlak p na toj plohi je postavljen s rubnim uvjetom nultog gradijenta ($\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial z} = 0$) dok brzina \bar{u} ima konstantnu vrijednost jednaku nuli ($\bar{u} = 0$). Slika 22. prikazuje shemu simetrične domene koja je podijeljena točno na sredini zgrade.



Slika 22. Shema trodimenzionalne (3D) domene

Tablica 6. prikazuje ukupne dimenzije modela zgrade korištene u simulacijama opstrujavanja.

Tablica 6. Dimenzije modela zgrade

Stranica zgrade	Dužina (m)
Duljina (x -os), L	0,25
Širina (y -os), W	0,6
Visina (z -os), H	0,5

Dimenzije trodimenzionalne domene dane su u Tablici 7. Duljina i visina računalne domene iste su kao i u slučaju 2D domene, dok je u slučaju 3D domene dodatno provedena prostorna diskretizacija u smjeru y -osi.

Tablica 7. Dimenzije 3D domene

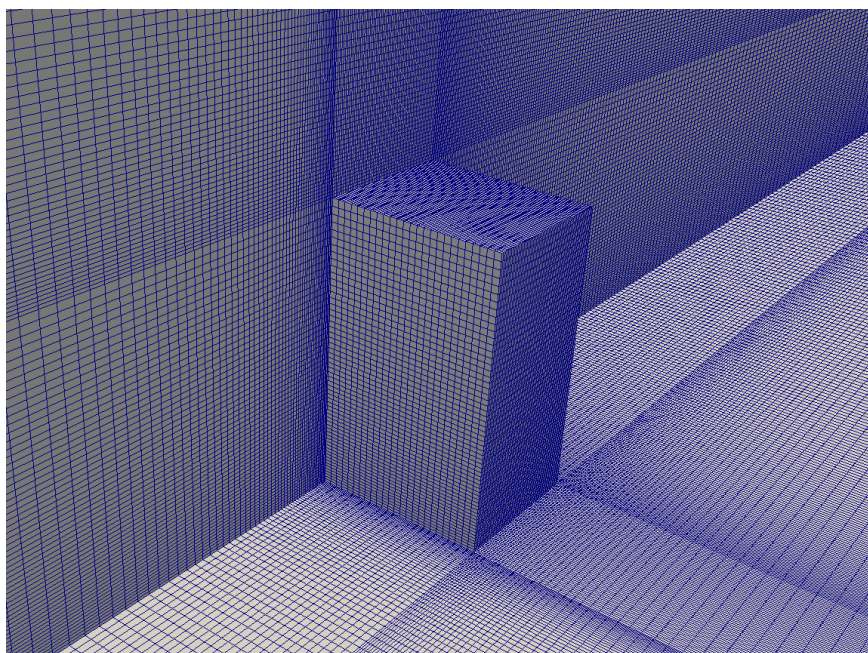
Stranica domene	Dužina (m)
Duljina (x -os), L_D	10,6
Širina (y -os), W_D	6,6
Visina (z -os), H_D	3

Prema Franke i ostali [15], bilo je potrebno pripaziti na izbor udaljenosti promatranog objekta (zgrade) od rubova domene. Rubovi domene moraju biti dovoljno udaljeni od zgrade kako ne bi utjecali na strujanje u blizini zgrade. Faktor zagušenja (engl. *blockage ratio*) definiran je,

$$B = \frac{A_{\text{objekta}}}{A_{\text{domene}}},$$

gdje se u brojniku nalazi poprečni presjek zgrade, a u nazivniku poprečni presjek domene u odnosu na smjer strujanja. U ovom radu, faktor zagušenja iznosi 1,51% što zadovoljava preporuku da navedeni faktor bude manji od 3% [15].

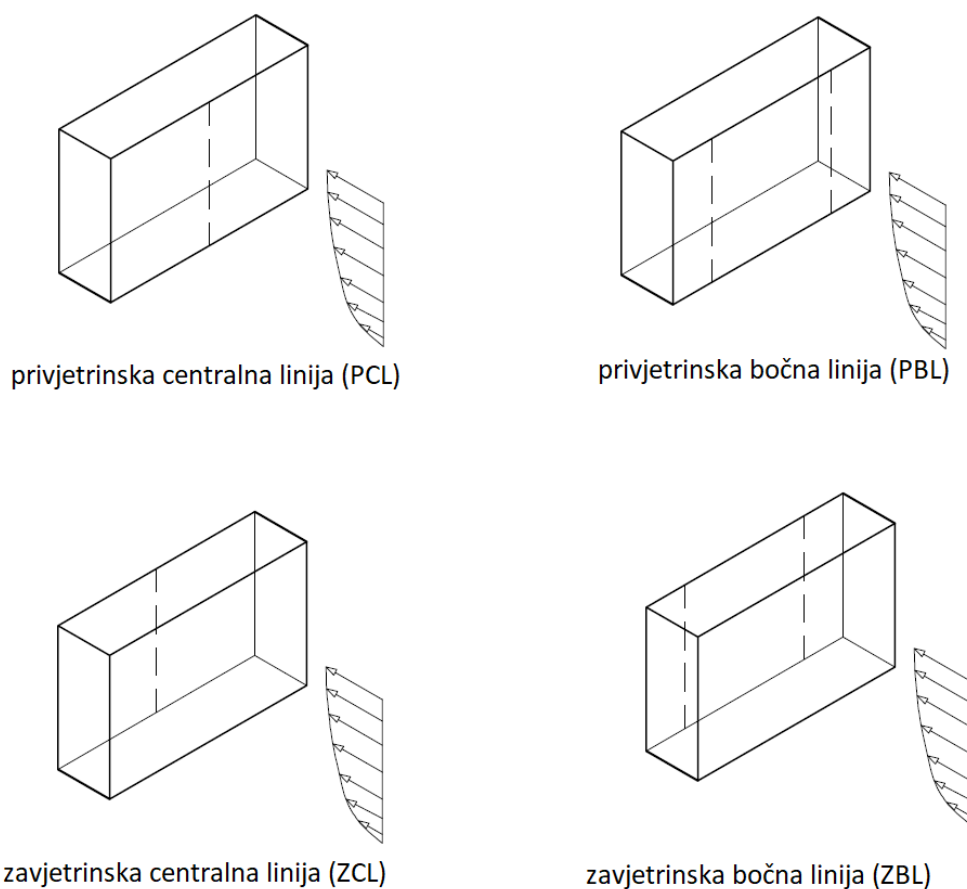
Slika 23. prikazuje prostornu diskretizaciju zgrade unutar računalne domene.



Slika 23. Prikaz prostorne diskretizacije u okolini zgrade

5. REZULTATI

U ovom poglavlju prikazani su rezultati računalne analize opstrujavanja zgrade za tri različita tipa profila nastrojavanja. Koeficijenti tlaka su modelirani na vertikalnim linijama na zgradi, a te linije se nalaze na četiri pozicije ovisno o tome jesu li u privjetrini (strana zgrade izložena vjetru) ili zavjetrini (strana zgrade koja gleda niz vjetar), te ovisno o tome nalaze li se na sredini ili na rubu zgrade, Slika 24. Bočne linije se nalaze na udaljenosti od 0,2 m od simetrale prema rubu zgrade.



Slika 24. Prikaz vertikalnih linija na kojima je modelirana raspodjela koeficijenta tlaka C_p

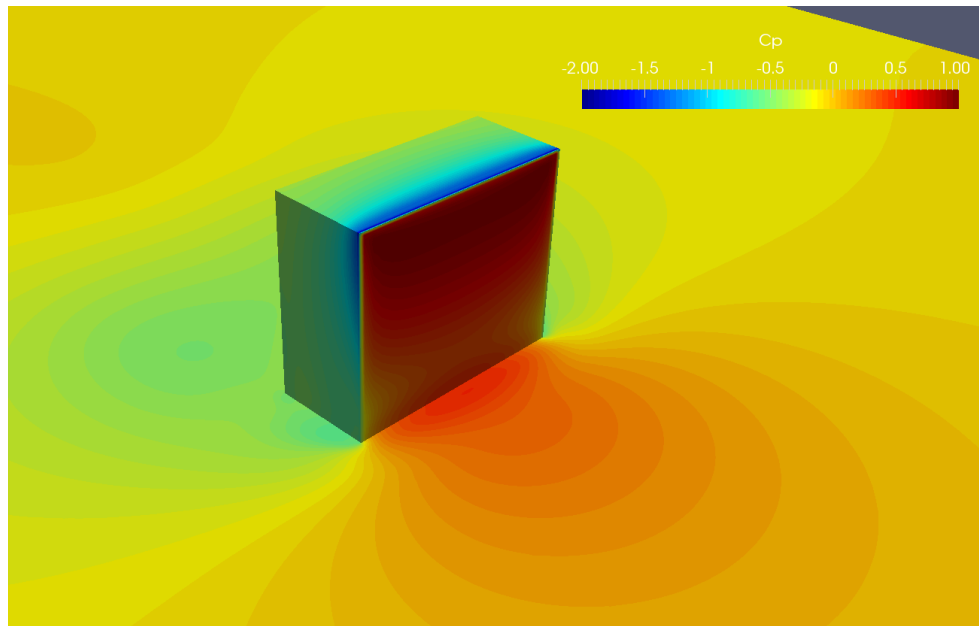
Koeficijent tlaka definira se,

$$C_p = \frac{p - p_{\text{ref}}}{\frac{1}{2} \rho \bar{u}_{\text{ref}}^2}, \quad (5.1)$$

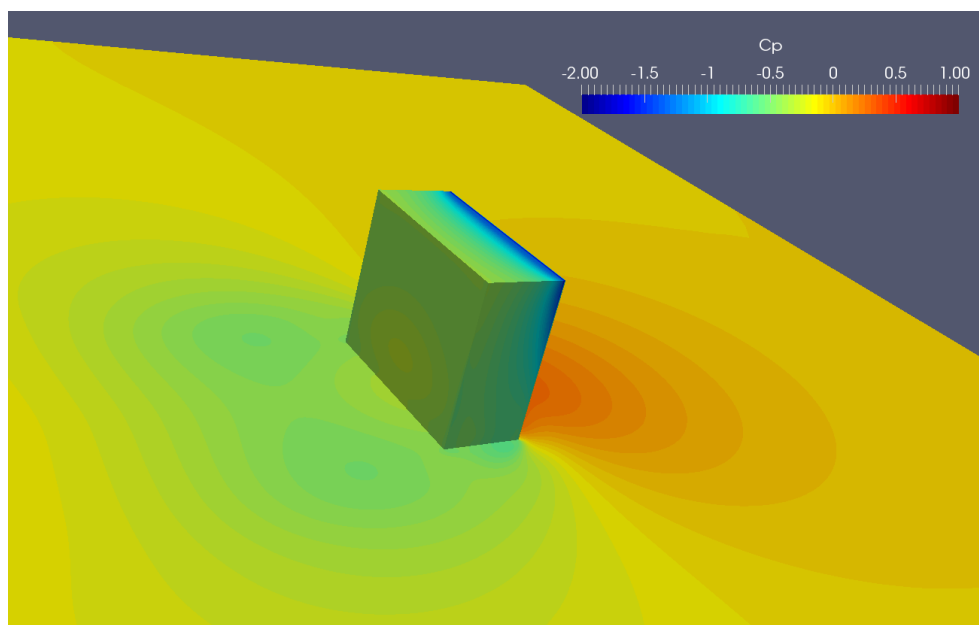
gdje je kao referentni tlak p_{ref} , u svrhu uspoređivanja s literaturom, korištena izmjerena vrijednost tlaka na udaljenosti od 0,9 m ispred zgrade na visini zgrade [13], a isto vrijedi i za referentnu brzinu \bar{u}_{ref} . Gustoća zraka ρ koji opstrujava model zgrade iznosi $1,225 \text{ kg/m}^3$.

5.1. Prikaz raspodjele dobivenih polja koeficijenta tlaka

Slika 25. prikazuje raspodjelu polja koeficijenta tlaka na zgradi i u njoj okolini s prednje (privjetrinske) i sa stražnje (zavjetrinske) strane. Vidljiva su područja zone visokog potlaka na gornjoj i na dvije bočne plohe. Također, vidljiv je utjecaj strujanja na raspodjelu tlaka na tlu gdje se zone pretlaka formiraju ispred, a zone potlaka iza zgrade.



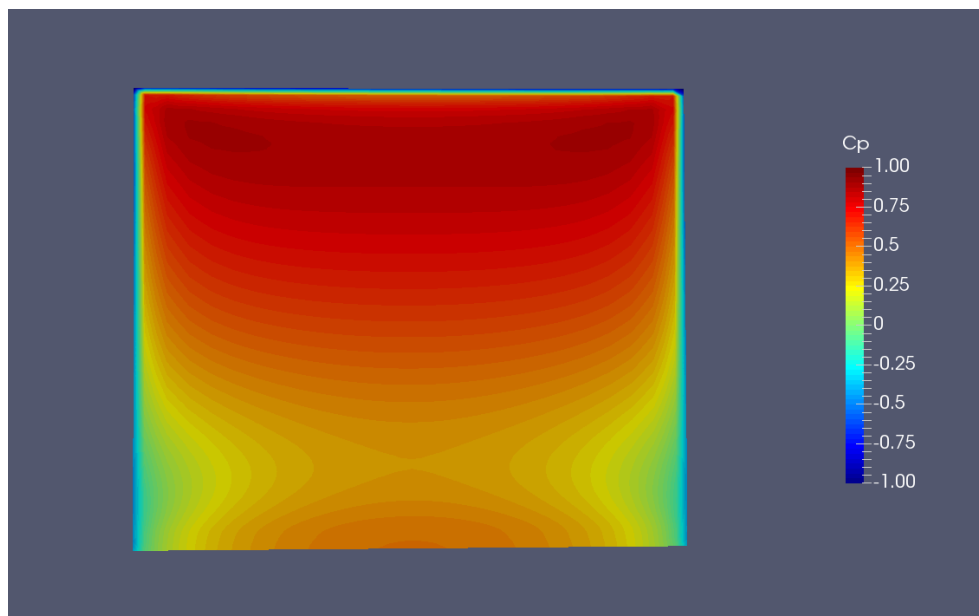
a)



b)

Slika 25. Izometrijski prikaz raspodjele polja koeficijenta tlaka na: a) privjetrinskoj strani zgrade, b) zavjetrinskoj strani zgrade

Slika 26. prikazuje raspodjelu koeficijenta tlaka a) s prednje i b) sa stražnje strane zgrade. Raspodjela polja apsolutne brzine prikazana je na Slika 27. pod a), a tlaka u okolini zgrade pod b).

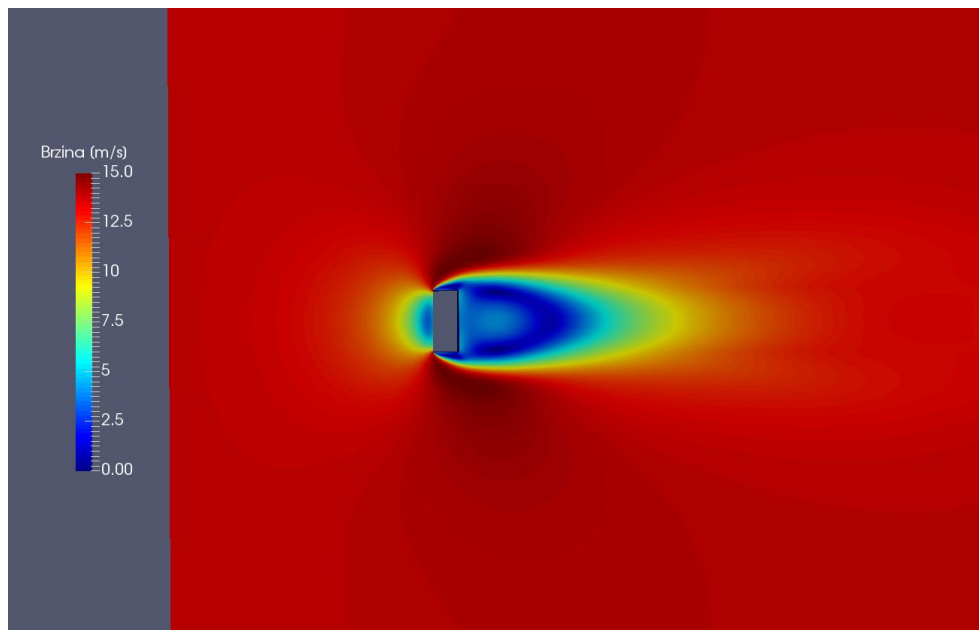


a)

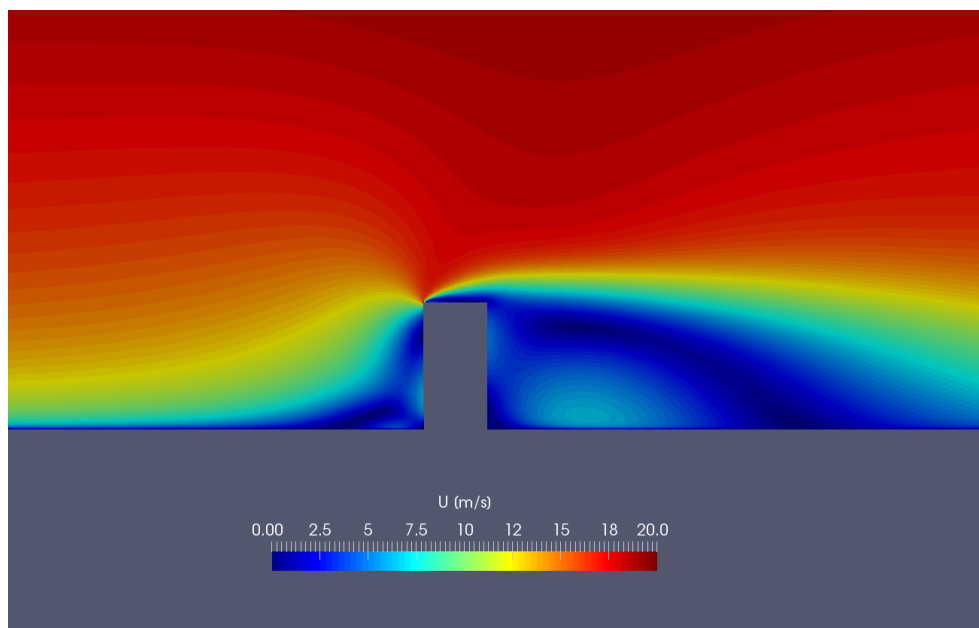


b)

Slika 26. Prikaz raspodjele polja koeficijenta tlaka na: a) privjetrinskoj strani zgrade, b) zavjetrinskoj strani zgrade



a)

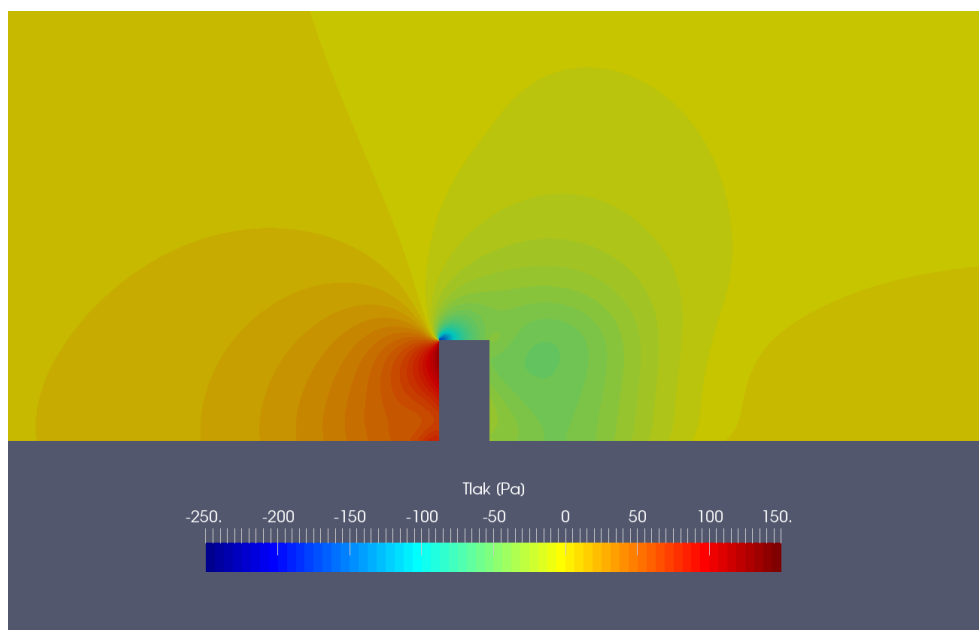


b)

Slika 27. Prikaz polja apsolutne vrijednosti osrednjene brzine: a) u $x - y$ ravnini (na visini $z = 0,5 \cdot H$), b) u $x - z$ ravnini (na simetrali)

Slika 27. a) prikazuje polje brzine u presjeku paralelnom s tlom na visini $z = 0,5 \cdot H$. Područje odvajanja strujanja nastaje na oštrm rubu u kojem se spajaju prednja i gornja površina zgrade, te gornja i stražnja površina zgrade. Osim toga, Slika 27. a) i b) ukazuju na pojavu recirkulacijskog strujanja u području iza zgrade.

Slika 28. prikazuje utjecaj zgrade na polje tlaka u strujanju zraka. Zbog utjecaja zgrade, ispred nje nastaje zona pretlaka, dok iza nje nastaje zona potlaka. Također, kao što je objašnjeno u slučaju brzine, i ovdje se vidi utjecaj odvajanja strujanja koje nastaje na samom početku gornje plohe zbog oštrog ruba. Ta pojava se manifestira velikim potlakom. Osim toga, iza zgrade se nalazi područje negativnog tlaka nastalog kao posljedica pojave recirkulacijske zone iza zgrade.

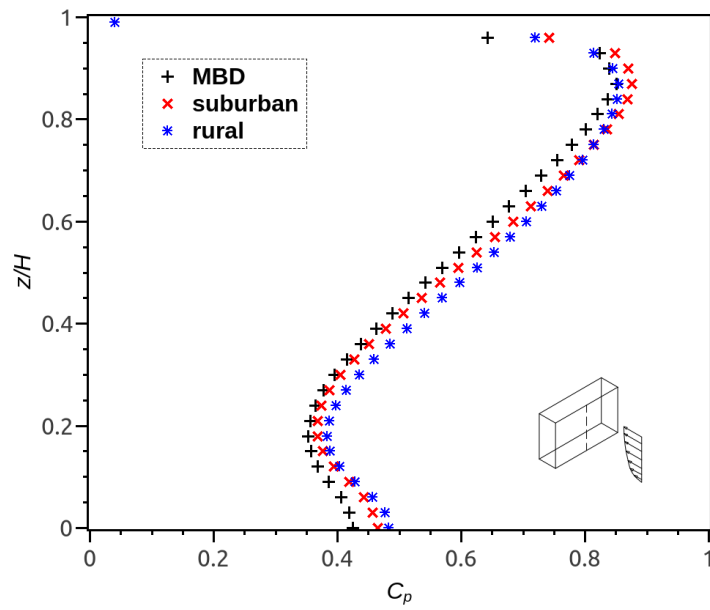


Slika 28. Raspodjela polja tlaka u okolini zgrade prikazana u $x - z$ ravnini (na simetrali)

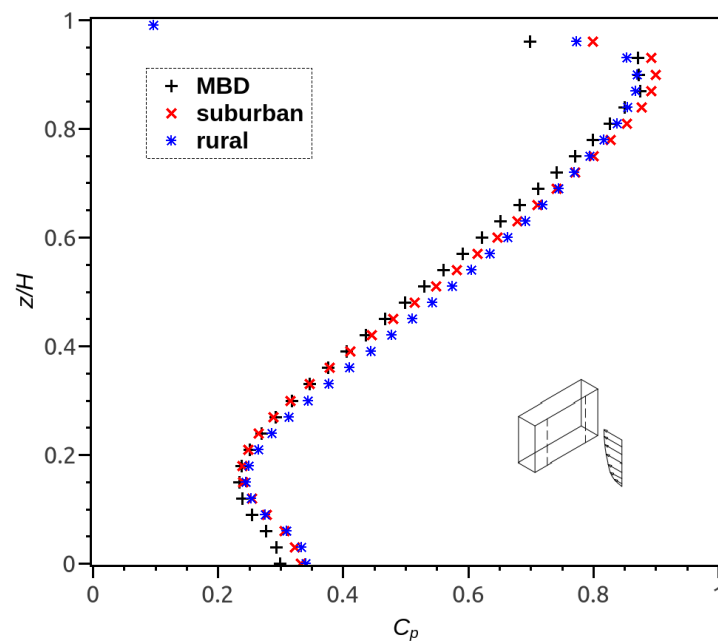
Sve prethodne slike prikazane su u softveru *ParaView*, za strujanje vjetra s ruralnim profilom. Za sva tri tipa nastrojavanja raspodjele su kvalitativno jednake, pa stoga nisu prikazani rezultati za druga dva tipa nastrojavanja.

5.2. Prikaz linijske raspodjele koeficijenata tlaka

Slika 29. i Slika 30. prikazuju linijske raspodjele koeficijenta tlaka C_p po privjetrinskoj i zavjetrinskoj strani zgrade. Raspodjela tlaka mjerena je na privjetrinskoj centralnoj liniji (PCL), privjetrinskoj bočnoj liniji (PBL), zavjetrinskoj centralnoj liniji (ZCL), te zavjetrinskoj bočnoj liniji (ZBL), Slika 24.

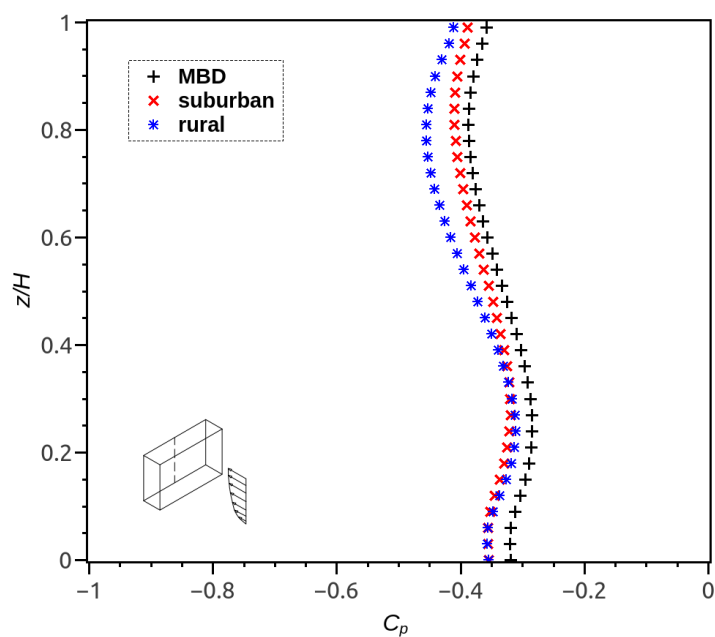


a)

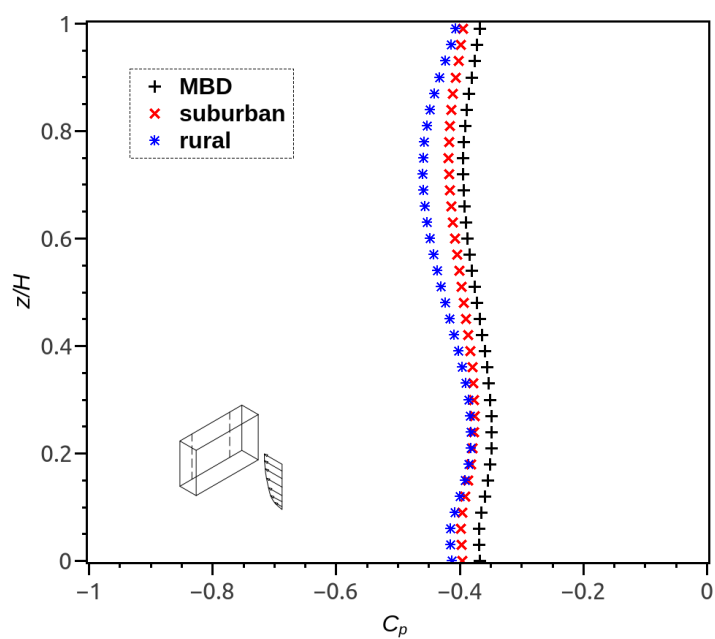


b)

Slika 29. Linijska raspodjela koeficijenta tlaka C_p na prednjoj (privjetrinskoj) strani zgrade: a) na privjetrinskoj centralnoj liniji (PCL), b) na privjetrinskim bočnim linijama (PBL). MBD – rješenja dobivena pomoću profila brzine definiranog u Montazeri i Blocken [13], suburban – suburban profil, rural – ruralni profil



a)



b)

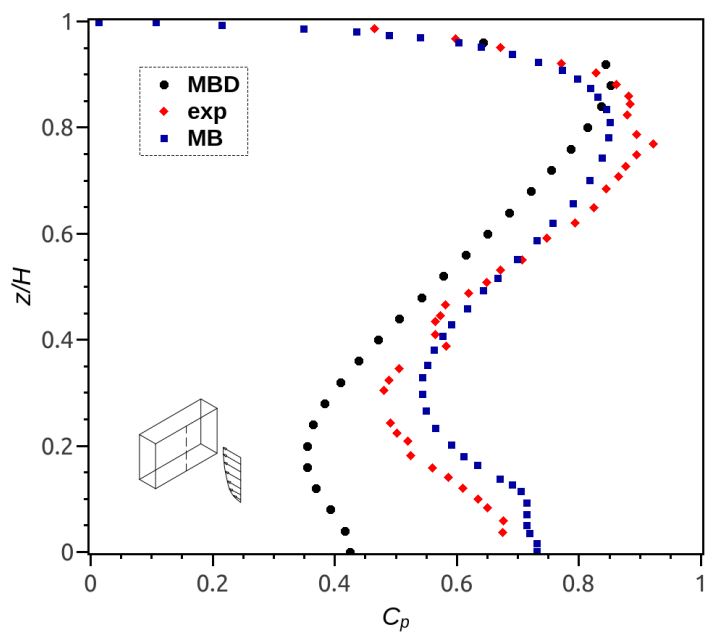
Slika 30. Linijska raspodjela koeficijenta tlaka C_p na stražnjoj (zavjetrinskoj) strani zgrade: a) na zavjetrinskoj centralnoj liniji (ZCL), b) na zavjetrinskim bočnim linijama (ZBL). MBD – rješenja dobivena pomoću profila brzine definiranog u Montazeri i Blocken [13], suburban – suburban profil, rural – ruralni profil

Kao što je vidljivo na Slici 29., dobiveni rezultati pokazuju da se na strani zgrade izloženoj vjetru (PCL) javlja pretlak po cijeloj visini zgrade, a koji raste od $z/H = 0,2$ sve do $z/H = 0,9$. Na otprilike 90% visine zgrade, na privjetrinskoj strani, postoji maksimalni tlak, koji ujedno predstavlja i zaustavnu točku. Za slučaj rezultata mjerenih na rubu privjetrinske strane zgrade (PBL) dobiva se kvalitativno slična raspodjela kao i po centralnoj liniji, s time da je maksimalna vrijednost pretlaka ipak ponešto izraženija nego u slučaju maksimalnog tlaka na centralnoj liniji. Usporedbom raspodjele koeficijenta tlaka na PCL i PBL uočava se pojava smanjenja iznosa koeficijenta tlaka u području gdje je z/H manji od 0,2. Takva raspodjela koeficijenta tlaka je u skladu s dostupnim eksperimentalnim mjerenjima [14], s obzirom da tlak približavanjem bočnoj strani zgrade opada (uslijed pojave odvajanja strujanja na bočnim stranama).

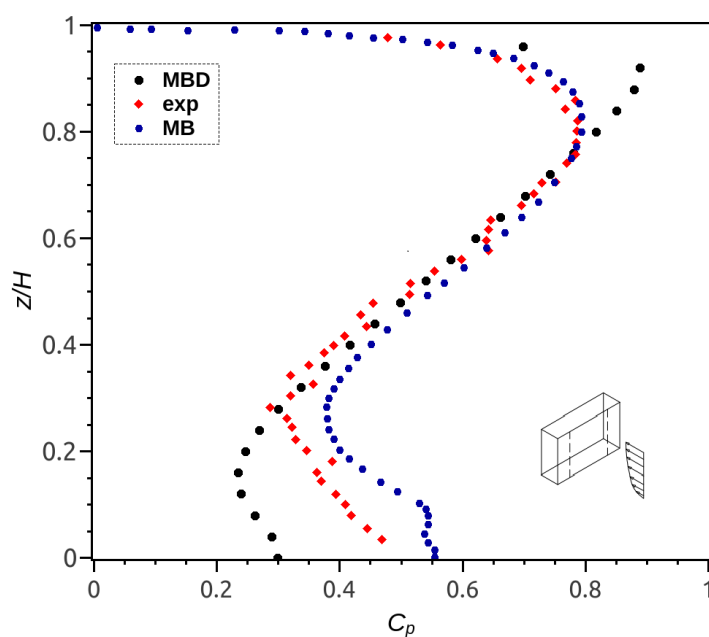
Što se zavjetrinske strane tiče, postignuti računalni rezultati, kao i mjerenja dostupna u literaturi, jasno pokazuju kako se na zavjetrinskoj strani zgrade javlja negativna i gotovo konstantna raspodjela koeficijenta tlaka, nastala kao posljedica snažne recirkulacijske zone u području iza zgrade. Taj efekt je uočen za sva tri tipa nastrojavanja vjetra na zgradu, Slika 30.

5.3. Usporedba dobivenih rezultata s eksperimentalnim mjerenjima

Slika 31. i Slika 32. prikazuju rezultate računalne simulacije opstrujavanja zgrade za slučaj ulaznih profila brzine i disipacije kinetičke energije turbulencije danih u Montazeri i Blocken [13]. Važno je napomenuti kako su Montazeri i Blocken [13] u svome radu ulazni profil kinetičke energije turbulencije računali iz profila intenziteta turbulencije danog u Chand i ostali [14]. Za potrebe zadavanja ulaznog profila kinetičke energije turbulencije u ovome je radu korišten izraz (4.2), a koji se često koristi u analizi utjecaja vjetra na konstrukcije. Stoga je iznos kinetičke energije turbulencije zadane na ulazu u računalnu domenu u simulacijama u ovom radu tridesetak puta veći od iznosa definiranog u Montazeri i Blocken [13].

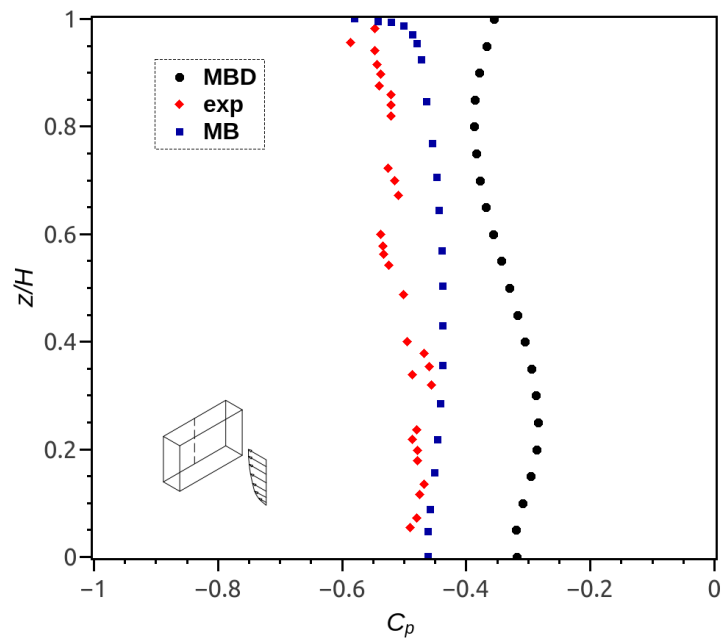


a)

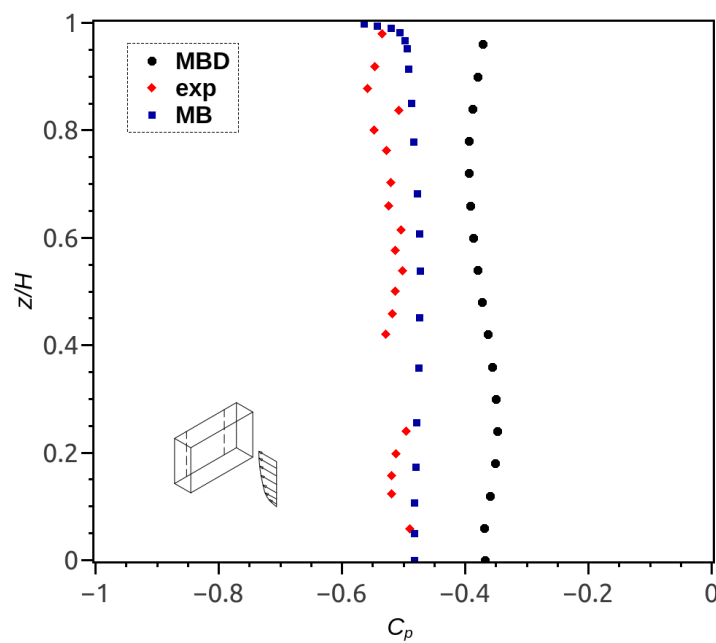


b)

Slika 31. Usporedba linijske raspodjele koeficijenta tlaka C_p na prednjoj (privjetrinskoj) strani zgrade: a) na privjetrinskoj centralnoj liniji (PCL), b) na privjetrinskim bočnim linijama (PBL). MBD – rješenja dobivena pomoću profila brzine prema Montazeriju i Blockenu [13], exp – mjerenja iz zračnog tunela prema Chand i ostali [14], MB – rezultati dani u Montazeri i Blocken [13].



a)



b)

Slika 32. Usporedba linijske raspodjele koeficijenta tlaka C_p na stražnjoj (zavjetrinskoj) strani zgrade: a) na zavjetrinskoj centralnoj liniji (ZCL), b) na zavjetrinskim bočnim linijama (ZBL). MBD – rješenja dobivena pomoću profila brzine prema Montazeriju i Blocken [13], exp – mjerenja iz zračnog tunela prema Chand i ostali [14], MB – rezultati dani u Montazeri i Blocken [13].

Slika 31. prikazuje usporedbu dobivenih linijskih raspodjela koeficijenta tlaka C_p na privjetrinskoj strani zgrade (na centralnoj - PCL i bočnim linijama - PBL). Dobiveni rezultati (MBD) se dobro podudaraju s računalnim rezultatima danim u [13] (MB) i mjerenjima u zračnom tunelu [14] (exp). Kod sve tri ispitivane konfiguracije, koeficijent tlaka je najveći na otprilike 90% visine zgrade nakon čega linearno opada, te pri dnu postoji blagi porast vrijednosti. Može se primijetiti kako je maksimalna vrijednost koeficijenta tlaka dobivenog u ovom radu (MBD) jednaka $C_p \approx 0,91$ na privjetrinskim bočnim linijama (PBL). Upravo na toj poziciji se nalazi točka zastoja. Na privjetrinskoj centralnoj liniji (PCL) dobivena vrijednost koeficijenta tlaka za sve tri ispitivane konfiguracije je otprilike jednaka i iznosi $C_p \approx 0,85$. Najveće razlike se mogu uočiti upravo u području pri tlu ($z/H < 0,3$), gdje je razlika između MBD raspodjele u usporedbi s MB i eksperimentalnom raspodjelom i do 30%. Što se zavjetrinske strane tiče, za sve tri ispitivane konfiguracije rezultati pokazuju otprilike konstantnu raspodjelu koeficijenta tlaka i na ZCL i na ZBL linijama. Osim toga dobiveni koeficijenti tlaka su negativni ($C_p \approx -0,5$ za MB i exp, te $C_p \approx -0,35$ za MBD), što jasno ukazuje na pojavu recirkulacijske zone u području iza zgrade. Razlike u tlaku između MB i eksperimentalnog profila su gotovo zanemarive, dok rezultati raspodjele tlaka dobiveni u ovom radu (MBD) ukazuju na znatnije odstupanje od eksperimentalnih vrijednosti.

Spomenuta odstupanja moguće je objasniti većim iznosom kinetičke energije turbulencije zadanim na ulazu u računalnu domenu. Naime, Montazeri i Blocken [13] su koristili profil intenziteta turbulencije izmjeren u zračnom tunelu [14] za izračun profila kinetičke energije turbulencije. Za razliku od takvog pristupa, u ovom radu je korišten robusniji pristup, te ulazni profil izračunat iz izraza za kinetičku energiju turbulencije danog u jednadžbi (4.2). Takav pristup omogućio je brzo i jednostavno zadavanje rubnog uvjeta kinetičke energije turbulencije, ali su dobivene vrijednosti tridesetak puta veće od onih dobivenih u Montazeri i Blocken [13]. Veća kinetička energija turbulencije na ulazu u računalnu domenu odgovara većoj turbulenciji dolazne struje fluida, što rezultira povećanim iznosom koeficijenta tlaka u zaustavnoj točki [26]. Osim toga, veći intenzitet turbulencije smanjuje i skraćuje recirkulacijsku zonu ispred i iza zgrade [27]. Upravo su te pojave glavni razlog većeg zaustavnog tlaka kod MBD profila, te manjeg tlaka u području pri tlu zgrade na privjetrinskoj strani zgrade. Također, veće vrijednosti koeficijenta tlaka na zavjetrinskoj strani su uvjetovane kraćom recirkulacijskom zonom iza zgrade.

5.4. Iznos koeficijenta otpora C_D zgrade

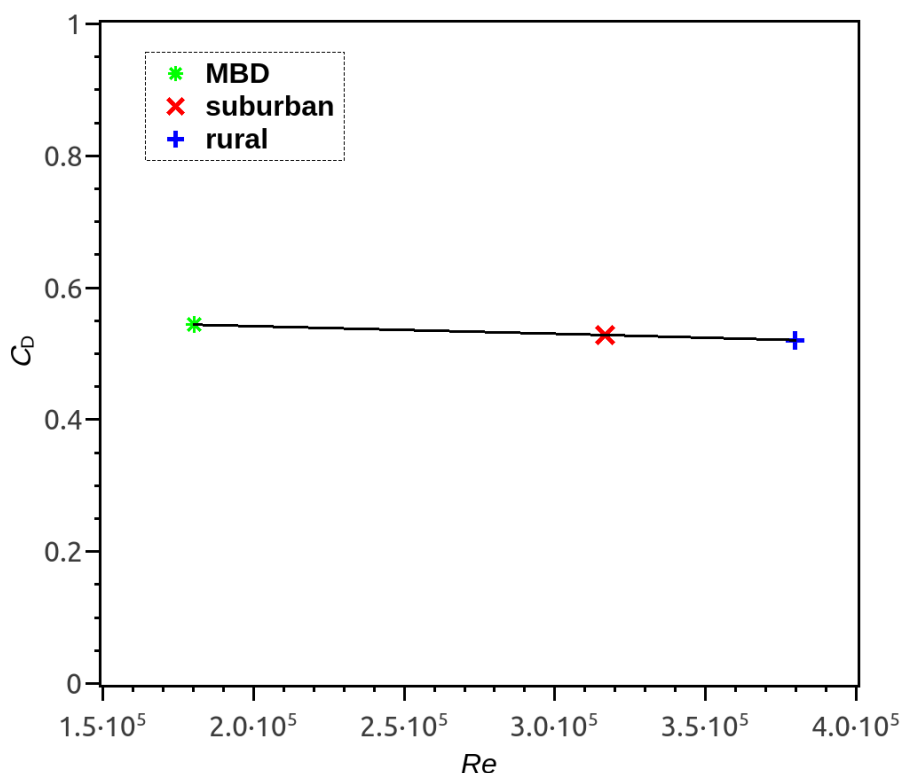
Slika 33. prikazuje koeficijente sile otpora zgrade u ovisnosti o Reynoldsovom broju. Reynoldsov broj izračunat je iz sljedećeg izraza,

$$Re = \frac{\rho \cdot u_{\text{ref}} \cdot L}{\mu}, \quad (5.2)$$

gdje L predstavlja duljinu zgrade koja iznosi 0,25 m, a u_{ref} je brzina izmjerena na ulazu u domenu na visini zgrade. Za sva tri tipa nastrojavanja koeficijent sile otpora zgrade C_D ostaje približno konstantan, te iznosi $C_D \approx 0.53$, Slika 33. Koeficijent sile otpora zgrade C_D računa se prema izrazu,

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho u_{\text{ref}}^2 A}, \quad (5.3)$$

gdje F_D predstavlja silu otpora (engl. *drag*) koja djeluje na tijelo, a A je poprečni presjek zgrade.



Slika 33. Iznos koeficijenta otpora zgrade C_D dobiven za tri tipa nastrojavanja. MBD – rješenja dobivena pomoću profila brzine definiranog u Montazeri i Blocken [13], suburban – suburbani profil, rural – ruralni profil

Prema [19], [20] i [26] iznos koeficijenta sile otpora pri strujanju Reynoldsovim brojevima većim od kritične vrijednosti ($Re_{kr} \approx 20\,000 - 30\,000$) ostaje približno konstantan. U slučaju zgrade s oštrim rubovima, na prijelazu prednje i gornje, te prednje i bočne površine, dolazi do odvajanja strujanja što dovodi do pada tlaka u području gdje je došlo do odvajanja. Kod velikih vrijednosti Reynoldsovih brojeva smanjuje se mogućnost ponovnog nalijeganja strujnica zbog čega koeficijent sile otpora ostaje približno konstantan. Kod vrijednosti Reynoldsovog broja manjih od kritične, viskozne sile mogu imati dominantnu ulogu u opterećenju konstrukcije, s obzirom da nakon odvajanja fluida postoji zona ponovnog nalijeganja fluida na gornju i bočnu površinu zgrade. Upravo zbog toga su koeficijenti sile otpora najveći upravo za manje vrijednosti Reynoldsovog broja.

6. ZAKLJUČAK

Radi ispitivanja aerodinamičkih karakteristika nastrujavanja više tipova vjetra na zgradu, provedene su računalne simulacije opstrujavanja modela zgrade uz korištenje osrednjenih Navier-Stokesovih jednadžbi i $k - \varepsilon$ modela turbulencije. Prikazana je raspodjela koeficijenta tlaka po površini zgrade za tri tipa nastrujavanja vjetra, a rezultati su uspoređeni s rezultatima dostupnima u literaturi.

Provedena je analiza homogenosti strujanja u praznoj računalnoj domeni. Pritom je za modeliranje strujanja uz tlo korištena zidna funkcija koja u obzir uzima i hrapavost terena. Dobiveni rezultati ukazuju na zanemariva odstupanja između ulaznih profila osrednjene brzine, kinetičke energije turbulencije i disipacije kinetičke energije turbulencije, s profilima mjerenim na poziciji na kojoj će naknadno biti smješten model zgrade.

Nakon što je utvrđena homogenost strujanja, karakteristični profili strujanja su zadani na ulaz u trodimenzionalnu domenu s modelom zgrade. Dobivena je raspodjela koeficijenta tlaka po privjetrinskoj (prednjoj) strani, te zavjetrinskoj (stražnjoj) strani zgrade. Dobivena raspodjela ukazuje na dobro kvalitativno podudaranje s dostupnim mjerenjima iz zračnog tunela. Kvantitativne razlike postoje zbog zadavanja većeg iznosa kinetičke energije turbulencije na ulaz računalne domene, čime je povećan intenzitet turbulencije profila koji nastrujava na zgradu.

Izračunat je i koeficijent sile otpora zgrade za sva tri tipa vjetra, čime je pokazano da zbog relativno visokih vrijednosti Reynoldsovih brojeva dolaznih profila koeficijent sile otpora ostaje približno konstantan, za sva tri tipa strujanja.

LITERATURA

- [1] https://www.dlsweb.rmit.edu.au/toolbox/buildright/content/bcgbc4010a/01_loads_loading/01_primary_loads/page_006.htm
- [2] Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., *Wind energy explained: Theory, design, application*, John Wiley & Sons, London, 2009.
- [3] Counihan, J., *Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972*, Atmospheric Environment, 9:871-905, 1975.
- [4] Kozmar, H., *Utjecaj mjerila na strukturu modeliranog atmosferskog graničnog sloja*, PhD. Thesis, Zagreb, 2005.
- [5] Pernpeintner A. *Aerodynamik der Bauwerke*, Lehrstuhl für Fluidmechanik, Fakultät für Maschinenwesen, TU-München, 1998.
- [6] Kaimal, J.C., Finnigan, J.J., *Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement*, Oxford University Press, New York, 1994.
- [7] Dyrbye, C., Hansen, S.O. *Wind Loads on Structures*. John Wiley and Sons, 1997.
- [8] Thuillier R. H., Lappe U. O.: *Wind and Temperature Profile Characteristics from Observations on a 1400ft Tower*, Journal of Atmospheric Science, 1971, 28, S. 181-189,
- [9] Gromke C., Ruck B., *Die Simulation atmosphärischer Grenzschichten in Windkanälen*. In: Proceedings of the 13th GALA Fachtagung: Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Cottbus, Germany, 2005.
- [10] Kozmar, H., *Physical modeling of complex airflows developing above rural terrains*, Environmental Fluid Mechanics, 12:209-225, 2012
- [11] Virag, Z., Šavar, M., Džijan, I. *Mehanika fluida II*. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [12] Džijan, I., Virag, Z. *Računalna Dinamika Fluida*. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2014.
- [13] Montazeri, H., Blocken, B. *CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: validation and sensitivity analysis*. Build Environ 2013;60:137-49.
- [14] Chand I., Bhargava PK., Krishak NLV. *Effect on balconies on ventilation inducing aeromotive force on low-rise buildings*. Build Environ 1998;33:385-96.
- [15] Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B.E. *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*. Cost Action 732: Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models, 2007.

- [16] Ribičić, M. *Atmospheric Boundary Layer Modelling in the Climatic Wind Tunnel*. Master's thesis, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [17] Cindori, M. *Nova metoda za računalno modeliranje atmosferskog graničnog sloja*. Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2016.
- [18] Kozmar, H. *Truncated vortex generators for part-depth wind-tunnel simulations of the atmospheric boundary layer flow*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99:130-136.
- [19] Simiu, E., Scanlan, R.H. *Wind effects on structures*, John Wiley & Sons, 3. Edition, New York, 1996.
- [20] Holmes, J.D. *Wind loading on structures*, JDH Consulting, Third edition, Australia, 2015.
- [21] Martinez, B. *Wind resource in complex terrain with OpenFOAM*. Master's thesis, Technical University of Denmark, 2011.
- [22] Živković, D. Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2014.
- [23] Richards, P.J., Hoxley, R.P. *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the $k-\epsilon$ turbulence model*, J. Wind Eng. Ind. Aerod., 46-47, 145-153, 1993.
- [24] Hargreaves, D.M., Wright, N.G. *On the use of the $k-\epsilon$ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer*, J. Wind Eng. Ind. Aerod., 95 (5), 355-369, 2007.
- [25] Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J. *CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems*, Atmos. Environ., 41 (2), 238-252, 2007.
- [26] Lim, H.C., Castro, I.P., Hoxey, R.P. *Bluff bodies in deep turbulent boundary layers: Reynolds-number issues*, J. Fluid. Mech., 571, 97-118, 2007.
- [27] Castro, I.P., Robins, A.G. *The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams*, J. Fluid. Mech., 79 (2), 307-335, 1977.

PRILOZI

- I. CD-R disc