Utjecaj visoke zgrade na strujanje zraka u urbanom okruženju

Nobilo, Martina

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:430765

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Martina Nobilo

Zagreb, veljača 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Student:
Martina Nobilo

Mentor:
prof.dr.sc. Ivo Džijan

Zagreb, veljača 2021.

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, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: **602 - 04 / 21 - 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 21 -**	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Martina Nobilo** Mat. br.: 0035208601

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj visoke zgrade na strujanje zraka u urbanom okruženju**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The effect of a tall tower on wind characteristics in an urban environment**

Opis zadatka:

Izgradnja visoke zgrade u dijelu grada u kojem se već nalaze niže zgrade potencijalno može promijeniti sliku strujanja zraka u blizini postojećih zgrada.
U završnom radu je stoga potrebno računalno simulirati strujanje u stambenoj četvrti s više pravilno raspoređenih niskih zgrada jednakog oblika i jednom visokom zgradom. Pritom treba analizirati kakav utjecaj promjena visine visoke zgrade ima na strujanje zraka u razmatranom urbanom okruženju.
U računalnim simulacijama je potrebno koristiti model stacionarnog turbulentnog strujanja homogenog atmosferskog graničnog sloja uz primjenu standardnog k-ε modela turbulencije. Kako bi se strujanje homogenog atmosferskog graničnog sloja pravilno modeliralo, na ulaznoj granici računalne domene treba definirati ulazne profile u skladu s postojećim modelima, poput logaritamskog zakona.
Dobivene rezultate je potrebno usporediti s eksperimentalno i računalno dobivenim rezultatima prikazanim u članku Heist DK, Brixey LA, Richmond-Bryant J, Bowker GE, Perry SG, Wiener RW (2009) The effect of a tall tower on flow and dispersion through a model urban neighborhood: Part 1. Flow characteristics, *Journal of Environmental Monitoring* 11, 2163-2170.

Rad treba sadržavati:

1. Uvod s kratkim pregledom literature vezane uz strujanje u atmosferskom graničnom sloju.
2. Pregled jednadžbi koje opisuju strujanje stacionarnog turbulentnog homogenog atmosferskog graničnog sloja i odgovarajućih rubnih uvjeta.
3. Rezultate računalne simulacije dobivene primjenom računalnog programa za simulaciju strujanja fluida OpenFOAM®, kao i usporedbu dobivenih rezultata s rezultatima iz navedenog članka.
4. Analizu rezultata i zaključke.

Rezultate proračuna je potrebno prikazati odgovarajućim tablicama, dijagramima i slikama.
Treba navesti literaturu i eventualno dobivenu pomoć tijekom izrade rada.

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

Ivo Džijan

Prof. dr. sc. Ivo Džijan

Predsjednik Povjerenstva:

V. Soldo

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.
Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Ivi Džijanu na prilici za izradu ovog rada u meni posve novom području.
Posebne zahvale idu mag.ing.mech. Mihaelu Cindoriju na posvećenom vremenu, strpljenju i znanju kojeg sam od njega primila. Bez njega ovaj rad ne bi bio moguć.
Zahvaljujem se svojim roditeljima na neizmjernoj potpori i vjeri u mene da ću ostvariti sve što zamislim.
Zahvaljujem se i mojim vjernim prijateljicama i kolegicama bez kojih bi studiranje od prve godine bilo znatno dosadnije i teže.

Sažetak

Računalne simulacije se sve češće koriste u raznim granama industrije. U ovom radu je opisano strujanje zraka u atmosferskom graničnom sloju iznad gradske četvrti. Poznato je da se planskim pozicioniranjem pojedinih zgrada može ostvariti bolja ventilacija ulica što omogućava odnošenje štetnih čestica koje se nakupljaju u zonama boravka ljudi. Prethodna istraživanja su pokazala da jedna visoka zgrada u inače uniformnom bloku zgrada može imati značajan utjecaj na polje strujanja zraka. Korištenjem računalnog paketa OpenFOAM u ovom radu su izrađene računalne simulacije strujanja zraka u atmosferskom graničnom sloju iznad takvog uniformnog bloka s jednom visokom zgradom. Modelirano je strujanje stacionarnog turbulentnog homogenog atmosferskog graničnog sloja. Dobiveni rezultati za jednu visinu visoke zgrade su potvrđeni usporedbom s postojećim rezultatima, a zatim je proučen utjecaj promjene visine visoke zgrade na promjenu slike strujanja zraka u gradskoj četvrti. Pokazalo se da se povećanjem visine visoke zgrade dobivaju sve povoljniji fenomeni u polju strujanja poput izdizanja strujanja na zavjetrinskoj strani visoke zgrade, nastanka vrtloga i bočnog strujanja u avenijama. Navedene pojave potencijalno dovode do izdizanja štetnih čestica iznad krovova zgrada te njihovog odnošenja iz zone boravka ljudi.

Ključne riječi: RDF, turbulentno strujanje, atmosferski granični sloj

The effect of a tall tower on wind characteristics in an urban environment

Abstract

Computer simulations are increasingly used in various industries. This paper describes the airflow in the atmospheric boundary layer above the city district. It is known that the planned positioning of individual buildings can achieve better street ventilation, which allows the removal of harmful particles that accumulate in the zones of human habitation. Previous research has shown that a single tall building in an otherwise uniform block of buildings can have a significant impact on the airflow field. In this paper, using the computer package OpenFOAM, computer simulations of airflow in the atmospheric boundary layer above such a uniform block with one tall building were made. The flow of a stationary turbulent homogeneous atmospheric boundary layer is modeled. The obtained results for one height of a tall building were confirmed by comparison with the existing results, and then the influence of the change in the height of the tall building on the change of the airflow image in the city district was studied. It has been shown that increasing the height of a tall building results in more favorable phenomena in the field of flow, such as rising currents on the leeward side of the tallest building, the formation of vortices and lateral flow in avenues. These phenomena potentially lead to the rise of harmful particles above the roofs of buildings and their removal from the zone of human habitation.

Keywords: CFD, turbulent flow, atmospheric boundary layer

Sadržaj

Popis slika **ii**

Popis tablica **iii**

Popis oznaka **iv**

1. Uvod **1**

2. Matematički model **3**

2.1. Atmosferski granični sloj 3

2.2. Pregled jednadžbi 3

2.2.1. 2D domena 3

2.2.2. Matematički model turbulentnog strujanja 4

2.2.3. Vremenski osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe 4

2.2.4. $k - \varepsilon$ model turbulencije 5

2.3. Modeliranje strujanja uz stijenku zida 7

2.3.1. Zidne funkcije modificirane za hrapavost 9

3. Numeričke postavke **10**

3.1. Generiranje mreže konačnih volumena 10

3.2. Rubni uvjeti 13

3.3. Sheme diskretizacije 16

3.4. Povezivanje tlaka i brzine 17

4. Rezultati **18**

4.1. Međusobna usporedba slučajeva 35

4.2. Utjecaj visine zgrade na polje strujanja 37

4.3. Utjecaj visine zgrade na polje tlaka 37

5. Zaključak **38**

Literatura **39**

Popis slika

3.1. Skica domene (bokocrt) 10
3.2. Skica domene (tlocrt) 11
3.3. Prikaz površinske mreže na tlu i po površini zgrada 12
3.4. Prikaz detalja površinske mreže 12
3.5. Profili rubnih uvjeta na izlazu iz 2D domene. *CFD* označava rezultate dobivene numeričkom simulacijom. *RH(1993)* označava rezultate dobivene izračunavanjem vrijednosti pomoću formula iz [5]. 14

4.1. Prikaz geometrije i mreže konačnih volumena u slučaju visine tornja $1H$ 18
4.2. Vektori brzine za slučaj $1H$ 20
4.3. Koeficijenti tlaka C_p za slučaj $1H$ 21
4.4. Prikaz geometrije i mreže konačnih volumena u slučaju visine tornja $2H$ 22
4.5. Vektori brzine za slučaj $2H$ 23
4.6. Koeficijenti tlaka C_p za slučaj $2H$ 24
4.7. Prikaz geometrije i mreže konačnih volumena u slučaju visine tornja $3H$ 25
4.8. Vektori brzine za slučaj $3H$ 26
4.9. Koeficijenti tlaka C_p za slučaj $3H$ 27
4.10. Vektori brzine za slučaj $4H$ 29
4.11. Koeficijenti tlaka C_p za slučaj $4H$ 30
4.12. Prikaz geometrije i mreže konačnih volumena u slučaju visine tornja $8H$ 31
4.13. Vektori brzine za slučaj $8H$ 32
4.14. Vektori brzine za slučaj $8H$ u presjeku x=126m ($10.5H$), na polovici avenije (okomito na smjer strujanja), jedan blok iza tornja. 33
4.15. Koeficijenti tlaka C_p za slučaj $8H$ 34

Popis tablica

2.1. Vrijednosti konstanti $k - \varepsilon$ modela turbulencije 6

3.1. Tablica rubnih uvjeta 15

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
k	m^2/s^2	kinetička energija turbulencije
k_C	m^2/s^2	kinetička energija turbulencije u središtu konačnog volumena
p	Pa	polje tlaka
u	m/s	brzina u smjeru strujanja
w	m/s	vertikalna brzina
x	m	koordinata duljine
y	m	koordinata širine
y_C	m	visina središta konačnog volumena
z	m	koordinata visine
z_0	m	aerodinamička duljina hrapavosti
C_p	-	koeficijent tlaka
H	m	visina zgrade
P_C	J/m^3s	produkcija kinetičke energije turbulencije u središtu konačnog volumena
P_k	J/m^3s	produkcija kinetičke energije turbulencije
Re	-	Reynoldsov broj
u_*	m/s	brzina trenja
u_C	m/s	brzina strujanja u središtu konačnog volumena u blizini stijenke
y^+	-	bezdimenzijska udaljenost od zida
ε	m^2/s^3	disipacija kinetičke energije turbulencije
ε_C	m^2/s^3	disipacija kinetičke energije turbulencije u središtu konačnog volumena
κ	-	Von Karmanova konstanta
ν	m^2/s	kinematička viskoznost

ν_t	m^2/s	turbulentna kinematička viskoznost
ν_{eff}	m^2/s	efektivna turbulentna kinematička viskoznost
ρ	kg/m^3	gustoća
τ_w	Pa	smično naprezanje
τ_0	Pa	iznos smičnog naprezanja na gornjoj granici računalne domene

1. Uvod

Današnji trend porasta količine štetnih čestica u zraku kao posljedica izgaranja fosilnih goriva, industrijskih procesa i sličnog, uzrokuje potrebu za pronalaženjem načina uklanjanja istih iz zone u kojoj se ljudi kreću i borave. Pametnim planiranjem izgradnje gradskih četvrti može se značajno smanjiti navedeni problem. Kvaliteta zraka jedan je od bitnih čimbenika koji utječu na ljudsko zdravlje. Sadržaj štetnih čestica u zraku povezan je s brojnim zdravstvenim tegobama u smislu bolesti dišnih puteva, karcinoma i alergija. Stanovnici zbog toga pri kupnji nekretnina sve više razmišljaju o tome kakva je kvaliteta zraka. Samim time i projektanti zaduženi za projekte izgradnje naselja obraćaju sve više pažnje na pozicioniranje objekata kako bi se omogućila bolja ventilacija ulica. Ovdje su računalne simulacije našle još jednu od svojih mnogobrojnih primjena. Upotrebom alata za simulaciju strujanja omogućeno je virtualno izraditi čitavu geometriju planiranog naselja te osmisliti najbolji položaj objekata s obzirom na strujanja zraka u području gradnje. Rezultati dobiveni simulacijom omogućavaju uvid u polja tlaka i brzina strujanja zraka iz čega se može vidjeti gdje će se potencijalno najviše zadržavati štetne čestice i što se može poduzeti kako bi ih se efikasno uklonilo.

Ovaj rad temelji se na znanstvenom članku [7]. Osim njega u izradi rada korišteno je i više različitih izvora koji se navode niže. Slijedi kratak opis tih izvora. Kako je već rečeno, članak [7] temelj je za izradu ovog rada. Objavljen je 2009. godine i bavi se utjecajem visoke zgrade na strujanje zraka i disperziju čestica u inače uniformnom bloku zgrada. Opisuje način provedbe eksperimenta i rezultate dobivene ispitivanjem umanjenog modela u zračnom tunelu te opis pripreme modela i rezultate dobivene simulacijom naselja stvarnih dimenzija pomoću računalnih alata. Ovaj članak korišten je za izradu geometrije modela, mreže konačnih volumena potrebne za simulaciju, postavljanje rubnih uvjeta te za usporedbu te analizu dobivenih rezultata. Vrijednosti i veličine zadane u članku praćene su prilikom izrade rada, uz neka odstupanja kako bi se s dostupnim alatima dobili što točniji rezultati. Prilikom obrade rezultata neki su podaci pretpostavljeni, što je objašnjeno u daljnjem tekstu rada. Drugi dio gore navedenog znanstvenog članka [6] govori o disperziji štetnih čestica te metodama mjerenja koncentracije istih u zračnom tunelu i računalnoj simulaciji. Tema ovog dijela članka

nije i tema ovog završnog rada, ali se njezini rezultati koriste za bolje razumijevanje dobivenih rezultata prethodnog dijela članka te uvid u daljnje mogućnosti proširivanja rada. Poglavlje [2] korišteno je u svrhu modeliranja odgovarajućih dimenzija domene te razumijevanja jednadžbi na kojima se temelji model atmosferskog graničnog sloja. Opisuje različite pristupe modeliranju strujanja vjetra oko objekata (zgrada) te primijenjene osnovne modele turbulencije. Još jedan članak koji se bavi atmosferskim graničnim slojem jest [5]. U njemu su sadržane sve jednadžbe na kojima počiva $k - \varepsilon$ model turbulencije primijenjen na strujanje vjetra. Autori su objasnili pretpostavke na kojima se temelji homogeni $k - \varepsilon$ model turbulencije za atmosferski granični sloj, opisali mjerenja na Istraživačkom Institutu *Silsoe* koja potvrđuju navedene pretpostavke te naveli odgovarajuće rubne uvjete pomoću kojih se ostvaruje homogeni granični sloj podalje od objekta koji se ispituje i lokalno izračunavanje usporavajućeg smičnog naprezanja. Ako se opisani rubni uvjeti dobro primijene, dobiva se ravnotežni granični sloj bez gradijenata tlaka podalje od prepreka strujanju. Članak je u radu korišten upravo za postavljanje rubnih uvjeta za postizanje stacionarnog turbulentnog homogenog atmosferskog graničnog sloja, koji će biti detaljnije pojašnjeni u nastavku rada.

U ovom radu ispitan je utjecaj visoke zgrade na polje strujanja vjetra te polje tlaka u modernom naselju u Brooklynu, New York. To urbano naselje nalazi se pokraj glavne autoceste i biva iznimno pogođeno povećanom koncentracijom čestica u zraku. Članak [7] na kojem se rad temelji opisuje izradu modela i rezultate dobivene korištenjem zračnog tunela te paralelno postupak i rezultate dobivene korištenjem računalnih paketa računalne dinamike fluida (RDF). Cilj ovog rada jest izraditi model naselja navedenog u članku, istih dimenzija i prilagođenih postavki, te simulirati strujanje u četvrti pomoću modela stacionarnog turbulentnog strujanja homogenog atmosferskog graničnog sloja uz primjenu standardnog $k - \varepsilon$ modela turbulencije. Osim usporedbe rezultata s gore navedenim člankom, provest će se i usporedba rezultata dobivenih promjenom visine najviše zgrade (tornja). Iz tih rezultata bit će vidljiv utjecaj visine najviše zgrade na cjelokupno polje strujanja promatranog područja. U nastavku rada bit će opisane jednadžbe koje opisuju strujanje stacionarnog turbulentnog homogenog atmosferskog graničnog sloja i odgovarajući rubni uvjeti, opis izrade geometrije i pripadajuće mreže te prikaz i analiza rezultata.

2. Matematički model

2.1. Atmosferski granični sloj

Atmosferski granični sloj je najniži sloj Zemljine atmosfere. Karakterizira ga izrazita turbulencija. Taj sloj je u direktnom dodiru sa Zemljinom površinom zbog čega efekti na površini (grijanje i hlađenje, sile viskoznog trenja i slično) imaju snažan utjecaj na turbulentnu izmjenu energije i mase te izmjenu kinetičke energije. Atmosferski granični sloj reagira relativno brzo na navedene promjene na Zemljinoj površini, već unutar jednog dana. Unutar njega, brzina strujanja raste od nule do neke granične vrijednosti te se pretpostavlja da je strujanje paralelno s površinom Zemlje jer se vertikalna komponenta brzine strujanja može zanemariti. U ovom radu istražuje se stacionarni turbulentni homogeni atmosferski granični sloj što znači da se fizikalne veličine smatraju neovisnim o vremenu te uniformnim u smjeru strujanja. Zbog zanemarivanja promjene veličina u horizontalnom smjeru, jednadžbe matematičkog modela znatno se pojednostavljuju [4].

2.2. Pregled jednadžbi

2.2.1. 2D domena

U ovom radu, za dobivanje stabilnih profila homogenog atmosferskog graničnog sloja, korišten je model pojednostavljenog atmosferskog graničnog sloja prema [5] gdje je gradijent tlaka p jednak nuli. Korištena je takozvana 2D domena koja je opisana kasnije u radu (poglavlje 3.2). Jednadžbe koje numerički rješavač u tom slučaju rješava su sljedeće i opisane u [3]:

– jednadžba količine gibanja:

$$\frac{d}{dz}(\nu_t(z)\frac{du}{dz}) = 0 \tag{2.1}$$

– jednadžba kinetičke energije turbulencije k

$$\frac{d}{dz}(\frac{\nu_t(z)}{\sigma_k}\frac{dk(z)}{dz}) - \frac{P_k(z)}{\rho} + \varepsilon(z) = 0 \tag{2.2}$$

– jednadžba disipacije kinetičke energije turbulencije

$$-\frac{d}{dz}(\frac{\nu_t(z)}{\sigma_\varepsilon}\frac{d\varepsilon(z)}{dz}) - C_1\frac{P_k(z)\varepsilon(z)}{\rho k(z)} + C_2\frac{\varepsilon(z)^2}{k(z)} = 0. \tag{2.3}$$

Visina z predstavlja udaljenost od donje granice domene (tla), $u(z)$ je komponenta brzine u glavnom smjeru strujanja, $k(z)$ je kinetička energija turbulencije, $\varepsilon(z)$ je disipacija kinetičke energije turbulencije, ν_t je turbulentna kinematička viskoznost i računa se prema jednadžbi

$$\nu_t = \frac{C_\mu k(z)^2}{\varepsilon(z)}, \tag{2.4}$$

a P_k predstavlja produkciju kinetičke energije turbulencije. P_k se računa prema jednadžbi

$$P_k = -\rho\overline{u'w'}\frac{du}{dz}, \tag{2.5}$$

gdje $\overline{u'w'}$ predstavlja tenzor Reynoldsovih naprezanja.

2.2.2. Matematički model turbulentnog strujanja

Za opis strujanja nestlačivog fluida oko objekata koji su izloženi strujanju vjetra koristi se sustav parcijalnih diferencijalnih jednadžbi:

– jednadžba očuvanja mase

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2.6}$$

– jednadžba količine gibanja

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial(v_i v_j)}{\partial x_j} = fi - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu\frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \tag{2.7}$$

gdje je ν kinematička viskoznost, a f je specifična masena sila. U jednadžbi 2.7 na lijevoj strani nalaze se redom nestacionarni i konvekcijski član, a na desnoj strani članovi masene sile, gradijenta tlaka i difuzije. Jedine nepoznanice su vektorsko polje brzine v_i i polje tlaka p.

2.2.3. Vremenski osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe

Zbog izrazite nestacionarnosti turbulentnog strujanja, prilikom rješavanja Navier-Stokesovih jednadžbi potrebno je veoma gusto diskretizirati područje proračuna, da se obuhvate i najmanje amplitude pulzacija, te vremenski korak mora biti dovoljno malen da se obuhvate i najviše frekvencije pulzacija. Kako bi se smanjila količina podataka i ubrzao proces računanja sustava jednadžbi, koriste se osrednjene vrijednosti fizikalnih veličina. Takve Navier-Stokesove jednadžbe zovu se vremenski osrednjene Navier-Stokesove jednadžbe, točnije *Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS)* koje se koriste u

ovom radu. Strujanje se smatra nestlačivim (ρ=konst.), a utjecaj masenih sila je zanemariv (f=0). Kao u jednadžbi 2.7, nepoznanice su vektorsko polje brzine v_i i polje tlaka p koje su prikazane pomoću zbroja osrednjenih vrijednosti i njihovog pulzirajućeg dijela:

$$v_i = \overline{v_i} + v_i' \tag{2.8}$$

$$p = \overline{p} + p'. \tag{2.9}$$

U tom slučaju Navier-Stokesove jednadžbe za nestlačivo strujanje s vremenski osrednjenim veličinama glase:

– jednadžba kontinuiteta

$$\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_i} = 0 \tag{2.10}$$

– jednadžba količine gibanja

$$\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{v_i v_j})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu(\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_i}) - \rho\overline{v_i' v_j'}). \tag{2.11}$$

Skup navedenih vremenski osrednjenih jednadžbi naziva se Reynoldsovim jednadžbama. Član $-\rho\overline{u'w'}$ naziva se tenzor Reynoldsovih naprezanja koji je simetričan i sadrži šest nepoznanica. Zbog njega sustav Reynoldsovih jednadžbi ima više nepoznanica nego jednadžbi što otežava rješavanje problema u turbulentnom strujanju za što se najčešće koristi Boussinesqova aproksimacija koja turbulentna naprezanja modelira slično viskoznim naprezanjima.

2.2.4. $k - \varepsilon$ model turbulencije

Postoje različiti modeli turbulencije koji se dijele prema redu korelacije brzine za koju se rješava transportna jednadžba. Najjednostavniji su modeli prvog reda koji služe za modeliranje tenzora Reynoldsovih naprezanja uglavnom prema Boussinesqovoj hipotezi:

$$\overline{v_i' v_j'} = \nu_t(\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_i}) - \frac{2}{3}\overline{k}\delta_{ij} \tag{2.12}$$

gdje je ν_t funkcija uvjeta strujanja, a $\overline{k}$ kinetička energija turbulencije prema:

$$\overline{k} = \frac{1}{2}\overline{v_i' v_j'}. \tag{2.13}$$

U ovom radu korišten je $k - \varepsilon$ model turbulencije s dvije diferencijalne jednadžbe (jednadžba kinetičke energije turbulencije k i jednadžba njezine disipacije ε). Standardni $k - \varepsilon$ model opisuje se s dvije jednadžbe čijim se rješavanjem dobivaju vrijednosti k i ε:

$$\frac{\partial(\overline{\varepsilon})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{v_j \varepsilon})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}((\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial \overline{\varepsilon}}{\partial x_j}) + \frac{C_1}{\rho}P\frac{\overline{\varepsilon}}{\overline{k}} + C_2\frac{\overline{\varepsilon^2}}{\overline{k}}, \tag{2.14}$$

$$\frac{\partial \overline{k}}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{v_j}\overline{k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}((\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k})\frac{\partial \overline{k}}{\partial x_j}) + P - \overline{\varepsilon}, \tag{2.15}$$

gdje član P predstavlja produkciju kinetičke energije turbulencije i definiran je kao:

$$\frac{P}{\rho} = \frac{1}{2}\nu_t(\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_i})(\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_i}). \tag{2.16}$$

Turbulentna kinematička viskoznost ν_t računa se prema:

$$\nu_t = C_\mu \frac{\overline{k^2}}{\overline{\varepsilon}}. \tag{2.17}$$

Vrijednosti konstanti modela iznose:

Tablica 2.1: Vrijednosti konstanti $k - \varepsilon$ modela turbulencije

C_μ	σ_k	σ_ε	C_1	C_2
0,09	1,00	1,30	1,44	1,92

2.3. Modeliranje strujanja uz stijenku zida

Problem koji se javlja prilikom modeliranja turbulentnog strujanja u blizini zida jest tzv. obrnuta energetska kaskada. Do nje dolazi zbog formiranja manjih vrtloga blizu površine zida koji zatim formiraju veće vrtloge podalje od zida. Strujanje u blizini zida najčešće nije potrebno riješiti na čitavom području uz stijenku već se samo želi izračunati utjecaj stijenke na strujanje i obratno. U tu svrhu, strujanje u blizini stijenke se ne rješava u svim detaljima već modelira primjenom zidnih funkcija. Na taj način smanjuje se potreba za velikom rezolucijom mreže u blizini stijenke, a posljedično se smanjuje vrijeme potrebno za rješavanje sustava jednadžbi. Turbulentno strujanje uz zid se općenito dijeli na tri područja:

- Viskozni podsloj $y^+ < 5$

  U viskoznom podsloju dominiraju efekti molekularne viskoznosti, koji su nekoliko redova veličine dominantniji od turbulentnih efekata pa se turbulentna viskoznost može zanemariti.

- Prijelazni podsloj $5 < y^+ < 30$

  U prijelaznom podsloju molekularna i turbulentna viskoznost imaju jednak utjecaj.

- Inercijski podsloj $y^+ > 30$

  U inercijskom podsloju dominiraju efekti turbulencije pa se utjecaj molekularne viskoznosti može zanemariti.

Zidne funkcije su empirijske relacije koje opisuju strujanje uz stijenku. Njihovim korištenjem moguće je izraziti osrednjenu brzinu usporednu sa stijenkom i parametre turbulencije van viskoznog podsloja u ovisnosti o udaljenosti od stijenke. Uvjet za primjenu zidnih funkcija je da se centar volumena uz stijenku nalazi u inercijskom podsloju. Na taj način se zakon zida može koristiti za definiranje kinetičke energije turbulencije k i njezine disipacije ε.

Osnovni oblik zidne funkcije glasi:

$$u^+ = \frac{\overline{u_t}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} ln(Ey^+) + B, \tag{2.18}$$

gdje je u^+ bezdimenzijska brzina, u_t osrednjena brzina strujanja paralelna sa stijenkom, κ Von Karmanova konstanta, B empirijska konstanta koja ovisi o debljini viskoznog podsloja, a E parametar hrapavosti podloge. u_* je brzina trenja koja se definira kao

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \tag{2.19}$$

a y^+ je bezdimenzijska udaljenost od zida definirana pomoću

$$y^+ = \frac{u_* y}{\nu}, \tag{2.20}$$

gdje je y dimenzijska udaljenost od zida. Smično naprezanje na zidu definira se kao

$$\frac{\tau_w}{\rho} = -\overline{u'w'} = u_*^2 \tag{2.21}$$

i tada se produkcija kinetičke energije turbulencije definira kao

$$P = -\overline{u'w'}\frac{\partial \overline{u}}{\partial y} = \frac{u_*^3}{\kappa y}. \tag{2.22}$$

Iz navedenog se može pisati:

$$-\overline{u'w'} = \nu_t \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon}\frac{u_*}{\kappa y}, \tag{2.23}$$

iz čega izraz za disipaciju kinetičke energije turbulencije u blizini zida glasi:

$$\varepsilon_C = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}}}{\kappa y_C}. \tag{2.24}$$

Oznaka C govori o veličini izračunatoj u središtu kontrolnog volumena u blizini zida. Kada se izraz 2.24 koristi kao rubni uvjet na zidu za disipaciju kinetičke energije turbulencije, onda se za kinetičku energiju turbulencije može koristiti Neumannov rubni uvjet. Izvorski član u prvom volumenu uz stijenku se može izračunati tako da se pronađe njegova srednja vrijednost u polovini volumena uz pretpostavku da je τ_w konstantan po čitavom volumenu. Iz toga slijedi:

$$\overline{P} = \frac{1}{y_C}\int_0^{y_C} \tau_w \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} dy = \tau_w \frac{\overline{u_C}}{y_C}. \tag{2.25}$$

Tada se produkcijski član izračunava iz:

$$P_C = \nu_t \frac{C_\mu^{\frac{1}{4}} k^{\frac{3}{2}}}{\kappa y_C}\frac{\partial \overline{u}(y_C)}{\partial y}, \tag{2.26}$$

a izraz za y^+ glasi:

$$y_C^+ = \frac{C_\mu^{\frac{1}{4}} k^{\frac{1}{2}} y_C}{\nu}. \tag{2.27}$$

U području viskoznog podsloja zidna funkcija nije valjana stoga se koristi linearna funkcija:

$$y^+ = \frac{\overline{u}}{u_*}, \tag{2.28}$$

a smično naprezanje se definira kao:

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \nu_{eff}\frac{\overline{u_C}}{y_C}, \tag{2.29}$$

gdje ν_{eff} označava efektivnu viskoznost koja se računa kao zbroj dinamičke i turbulentne viskoznosti. U prijelaznom području ne vrijede ni zidne ni linearne funkcije. Zbog toga OpenFOAM koristi linearnu funkciju do vrijednosti y^+ od 11,6, a za vrijednosti veće od 11,6 koristi zidne funkcije.

2.3.1. Zidne funkcije modificirane za hrapavost

Prilikom modeliranja atmosferskog graničnog sloja u blizini zida koriste se zidne funkcije modificirane s obzirom na hrapavost. U ovom radu za modeliranje atmosferskog graničnog sloja korištena je funkcija hrapavog zida koja se temelji na parametru z_0, točnije na duljini površinske hrapavosti, kako su predložili autori članka [5]. Disipacija kinetičke energije ε_C u središtu susjednih volumena y_C računa se pomoću brzine trenja prema:

$$\varepsilon_C = \frac{u_*^3}{\kappa(y_C + z_0)}. \tag{2.30}$$

Brzina trenja definirana je pomoću turbulentne kinetičke energije u središtu volumena u blizini stijenke k_C prema:

$$u_* = \sqrt[4]{C_\mu}\sqrt{k_C} \tag{2.31}$$

gdje je C_μ konstanta turbulentne viskoznosti. Produkcija kinetičke energije turbulencije u središtu konačnog volumena u blizini zida P_C određena je korištenjem vrijednosti derivacije srednje brzine u smjeru strujanja u središtu kontrolnog volumena u blizini zida

$$P_\mathrm{C} = \tau_w \frac{d\overline{u}}{dy}|_C. \tag{2.32}$$

Smično naprezanje zida modelirano je kao

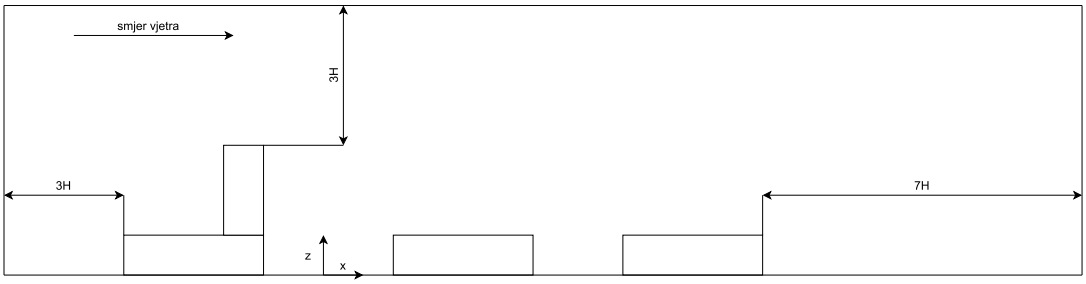
$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{\overline{u}_C u_* \kappa}{ln\frac{y_C + z_0}{z_0}}, \tag{2.33}$$

gdje je $\overline{u_C}$ srednja brzina u središtu kontrolnog volumena u blizini zida.

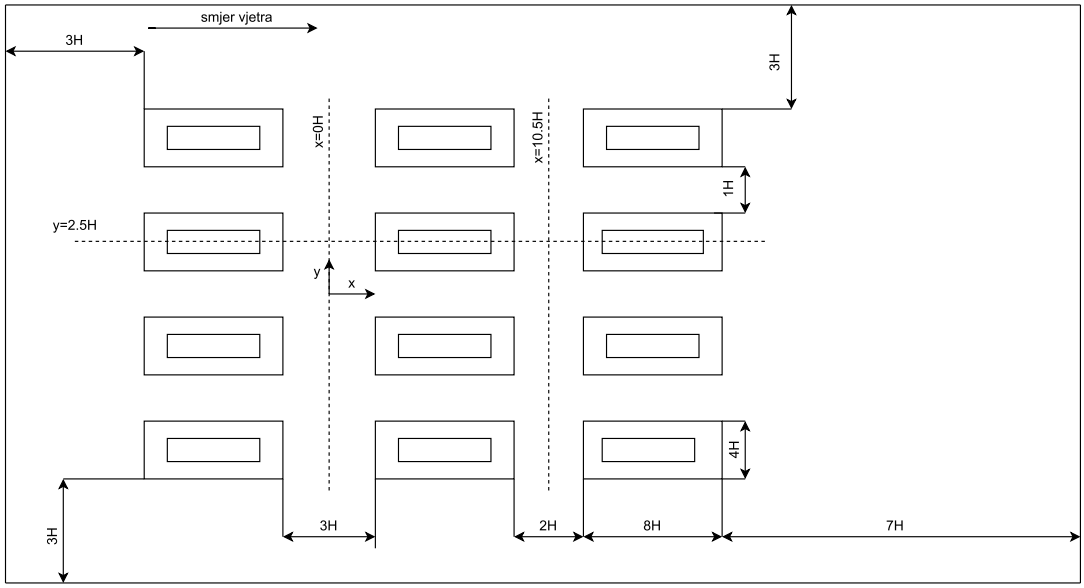
3. Numeričke postavke

3.1. Generiranje mreže konačnih volumena

Na početku svake numeričke simulacije treba modelirati geometriju i izraditi kvalitetnu geometrijsku mrežu. Geometrija se sastoji od tri stupca po četiri bloka zgrada jednakih oblika i dimenzija, jednog tornja (zgrada viša od ostalih u naselju) te ulica koje povezuju blokove. Zgrade su visoke 12 metara (H=12m) dok se visina tornja kreće u određenom rasponu, točnije postavlja se pet različitih slučajeva u kojima se visina tornja mijenja od visine jednake visini zgrada do visine 8 puta veće. Razlog postavljanja više različitih slučajeva jest usporedba utjecaja različitih visina tornja na karakteristike strujanja u naselju. Visine tornja su H, $2H$, $3H$, $4H$ i $8H$. Prvi i drugi stupac zgrada razdvojeni su avenijom širine $3H$, a drugi i treći stupac avenijom širine $2H$. Ovaj dio geometrije izrađen je u potpunosti na temelju informacija iz znanstvenog članka [1] s time da se u članku istraživanje provodilo samo s jednom visinom tornja ($4H$). Dimenzije domene izmijenjene su u skladu s ulomkom iz knjige [2]. Kako bi se postavili što bolji uvjeti za simuliranje atmosferskog graničnog sloja, dimenzije domene su povećane i iznose: udaljenost $3H$ na ulazu domene, $3H$ na bočnim stranama i na gornjoj granici te $7H$ na izlazu domene (izlazna granica u smjeru strujanja), kao što je prikazano na slikama 3.2 i 3.1. Na slici 3.2 su isprekidanim linijama prikazani položaji vertikalnih ravnina za prikaz rezultata.



Slika 3.1: Skica domene (bokocrt)



Slika 3.2: Skica domene (tlocrt)

Mreža je izrađena pomoću alata cfMesh u sklopu OpenFOAM računalnog programa. cfMesh je alat za automatsko generiranje mreže konačnih volumena. Omogućava izradu mreže na proizvoljno složenim geometrijama i zahtijeva unos minimalnog broja parametara od strane korisnika kako bi započelo generiranje mreže. Potrebno je izraditi geometriju, pohraniti je u .stl formatu te uvesti u cfMesh pokrenut iz terminala (Ubuntu računalni operativni sustav). U ovom radu, po uvođenju geometrije, vrlo jednostavnom naredbom *surfaceGenerateBoundingBox* kreirana je željena domena. Potom su zadane posebne naredbe, *objectRefinmen box* za izradu gušće mreže u blizini promatrane geometrije. Upisivanjem naredbe *cartesianMesh* započinje generiranje mreže i ono traje ovisno o veličini geometrije te veličini volumena na koje se želi podijeliti geometriju. Također, postavljeni su i granični slojevi, naredbom *Boundary layers* koja omogućava brzo i jednostavno manipuliranje brojem, debljinom i lokacijom graničnih slojeva.
Za razliku od mreže koja je navedena u članku [7], u ovom radu mreža je heksaedarskog, a ne tretaedarskog tipa. Razlog tome je dobivanje što kvalitetnije mreže putem alata cfMesh, a posljedično i što točnijih rezultata. Također, zbog navedenih razloga provedeno je progušćivanje mreže na dijelu domene koji obuhvaća opisanu geometriju kako bi se olakšalo dobivanje rezultata na mjestima gdje su očekivani značajniji gradijenti promatranih veličina. Mreža je progušćena postepeno u dva koraka, kao što je prikazano na slici 3.3, kako bi se osigurao blaži prijelaz i simulacija bila numerički stabilnija. Najveći konačni volumeni nalaze se na najudaljenijem dijelu mreže dok se najmanji volumeni nalaze uz same blokove zgrada, kao što se vidi na detalju prikazanom na slici 3.4. Konačan broj volumena mreže iznosi:

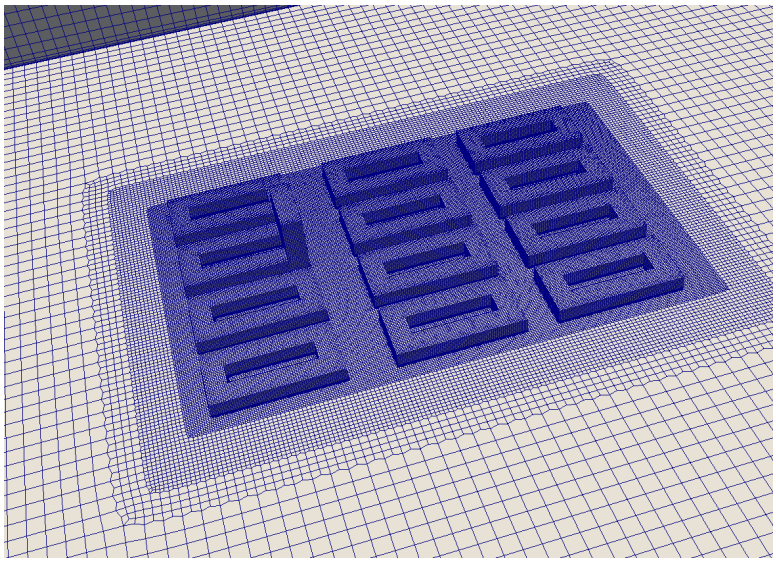
– 3 613 416 za slučaj visine tornja $1H$

– 3 510 028 za slučaj visine tornja $2H$

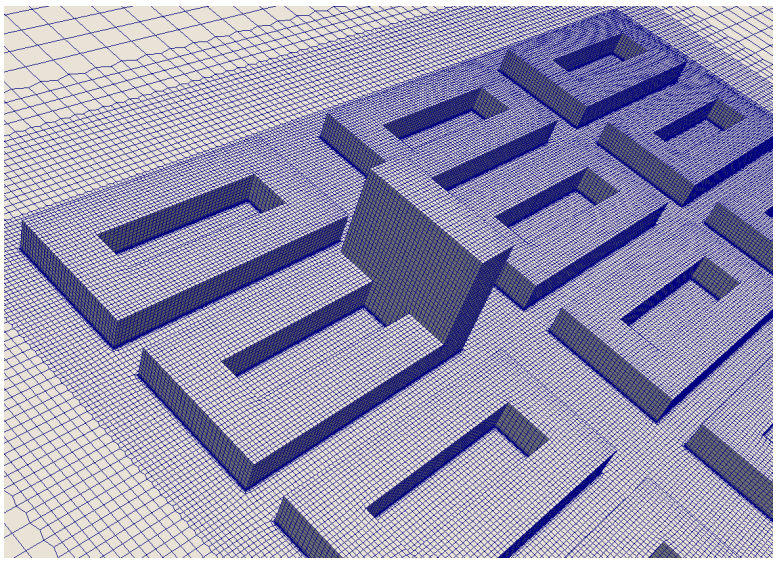
– 3 520 046 za slučaj visine tornja $3H$

– 3 885 848 za slučaj visine tornja $4H$

– 4 018 972 za slučaj visine tornja $8H$.



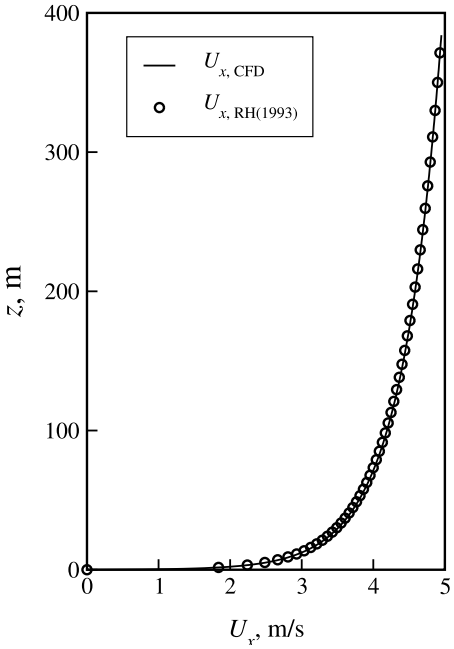
Slika 3.3: Prikaz površinske mreže na tlu i po površini zgrada



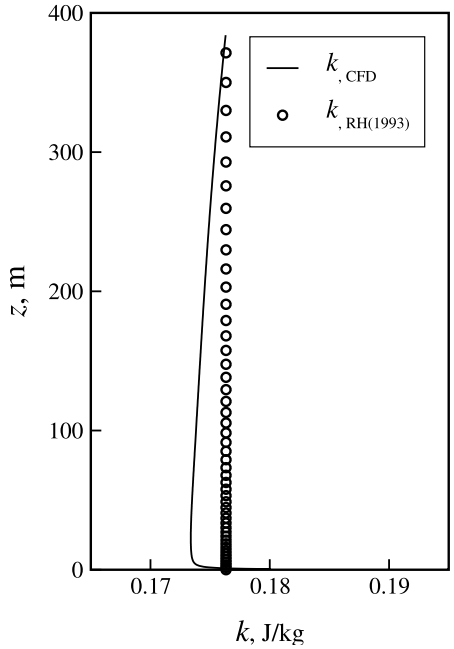
Slika 3.4: Prikaz detalja površinske mreže

3.2. Rubni uvjeti

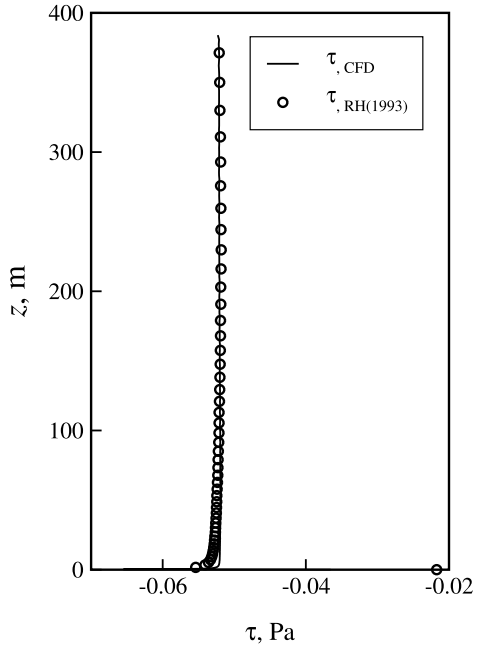
Rubni uvjeti, u simulacijama strujanja vjetra, trebali bi omogućiti homogeno strujanje zraka u graničnom sloju u području udaljenom od prepreka. Granice domene postavljaju se dovoljno daleko od promatranih objekata kako bi se spriječio njihov utjecaj na strujanje. Kako je navedeno u pregledu literature, granice su postavljene prema savjetima iz [2]. Za razliku od modela opisanom u članku [7], gdje se pri modeliranju strujanja kao turbulentni model koristila simulacija velikih vrtloga (*large eddy simulation*), u ovom radu korišten je $k - \varepsilon$ model turbulencije [1]. Rubni uvjeti na ulaznoj granici prema [5] nisu zadani eksplicitno već je prvo zadana prazna, 2D, domena pomoću *cyclic* i ostalih rubnih uvjeta pomoću kojih su se na izlazu dobili rubni uvjeti prema [5]. 2D domena je postavljena po visini i dužini stvarne domene, ali minimalne širine te ne sadrži nikakve objekte (prepreke). Kako je navedeno, postavljaju se *cyclic* rubni uvjeti na ulaznoj i izlaznoj granici domene. Oni omogućavaju tretiranje navedenih ploha kao da su fizički povezane, iako u stvarnosti nisu. Na bočne granice domene postavlja se rubni uvjet *empty*. Izlazni rubni uvjeti iz 2D domene očitavaju se i uzimaju kao ulazni rubni uvjeti 3D domene. Na taj način osigurava se homogeno strujanje u praznoj 3D domeni. U ovom radu korišten je $k - \varepsilon$ model turbulencije te je nekoliko veličina bilo bitno za uspostavljanje homogenog strujanja kroz domenu. Te veličine su brzina u smjeru strujanja (u smjeru osi apscisa) U_x, kinetička energija turbulencije k, te smično naprezanje τ. Smično naprezanje τ mora biti konstantno po visini domene da bi se ostvarilo homogeno strujanje te na gornjoj granici domene ima ulogu sile koja vuče strujanje kroz domenu. Navedene vrijednosti uzete su iz numeričke simulacije te prikazane u dijagramima u ovisnosti o visini domene z. Usporedno s njima, izračunate su vrijednosti navedenih veličina pomoću formula iz [5] te prikazane u istim dijagramima. Oznaka $U_{x,CFD}$ ukazuje na rezultate brzine dobivene numeričkom simulacijom dok oznaka $U_{x,RH(1993)}$ ukazuje na rezultate dobivene izračunavanjem vrijednosti po visini domene pomoću formula iz [5]. Isto vrijedi i za ostale dvije prikazane veličine.



(a) Prikaz promjene brzine U_x po visini domene z



(b) Prikaz promjene kinetičke energije turbulencije k po visini domene z



(c) Prikaz promjene smičnog naprezanja τ po visini domene z

Slika 3.5: Profili rubnih uvjeta na izlazu iz 2D domene. *CFD* označava rezultate dobivene numeričkom simulacijom. *RH(1993)* označava rezultate dobivene izračunavanjem vrijednosti pomoću formula iz [5].

Na prikazanom dijagramu 3.5a, vidljiva je promjena brzine vjetra u smjeru strujanja od donje granice domene, gdje je brzina strujanja jednaka nuli zbog lijepljenja fluida za površinu, prema gornjoj granici domene gdje je brzina približno jednaka 5 m/s. Temeljem dijagrama može se zaključiti da su brzina dobivena numerički i 'ručno' izračunata brzina, dobivena iz [5], gotovo identične. Dobiveni profil brzine mapira se na ulaze 3D domene. Iz priloženog dijagrama 3.5b, vidljiva je promjena kinetičke energije turbulencije od donje granice domene prema gornjoj granici. Odmak numeričkih rezultata od računski dobivenih javlja se zbog formule za izračun kinetičke energije turbulencije [5] prema kojoj se dobiva konstantna vrijednost k po visini domene. Vrijednost dobivena numeričkim putem varira, ali neznatno, što je vidljivo iz vrijednosti odmaka na osi apscisa. Ovaj profil kinetičke energije turbulencije mapira se na ulaz 3D domene. Dijagram 3.5c prikazuje promjenu smičnog naprezanja po visini domene. Uspoređujući rezultate vidi se da su numerički dobiveni rezultati gotovo identični rezultatima dobivenim pomoću formula iz [5] s manjim odstupanjima bliže donjoj granici domene. Kako je navedeno u [5] naprezanje zadano na gornjoj granici domene mora biti konstantno kroz cijelu domenu što je potvrđeno na dijagramu 3.5c, prikazano punom linijom.

Iz gore prikazanih dijagrama vidljivi su formirani profili potrebnih veličina koji, kako je već navedeno, osiguravaju homogeno strujanje kada se postave kao ulazni rubni uvjeti 3D domene. U sljedećoj tablici navedeni su korišteni rubni uvjeti na svim granicama domene.

Tablica 3.1: Tablica rubnih uvjeta

Veličine	u	p	k	ν_t	ε
Buildings	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction	nutWallFunction	epsilonWallFunction
Inlet	fixedValue	zeroGradient	fixedValue	fixedValue	fixedValue
Outlet	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
Sides (left and right)	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
Top	fixedValue	zeroGradient	fixedValue	fixedValue	fixedValue
Bottom	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction	nutABLWallFunction	epsilonABLWallFunction

Brzina u zadana je rubnim uvjetom zadanog iznosa na svim rubovima geometrije osim bočnim granicama i izlaznoj granici domene, gdje je zadan uvjet *zero gradient*, te na ulaznoj granici gdje je zadano polje vektora brzine dobiveno na izlazu iz 2D domene. Uvjet *zero gradient* zadaje se na onim rubovima na kojima se ne očekuje

promjena brzine strujanja. Na gornjoj granici (*Top*) je zadan iznos brzine dobiven profilom iz [5] 4.874 m/s koja, uz ostale rubne uvjete, omogućava da sustav generira smično naprezanje koje pokreće strujanje u pozitivnom smjeru apscise. Na zgradama i donjoj granici brzina je nula zbog uvjeta lijepljenja fluida za površinu.

Tlak p zadan je uvjetom *zero gradient* na svim granicama i njegovo se polje dobiva simulacijom. Razina tlaka se određuje zadavanjem iznosa tlaka u jednoj točki.

S obzirom na korišteni $k - \varepsilon$ model turbulencije, potrebno je na ulaznom rubu zadati profile kinetičke energije turbulencije k, disipaciju kinetičke energije turbulencije ε te kinematičke turbulentne viskoznosti ν_t. I kod ovih triju veličina na ulaznoj granici su zadana vektorska polja. Ti ulazni profili su dobiveni na izlazu iz 2D domene, dok su izlazna te bočne granice zadane rubnim uvjetom *zero gradient*. $k - \varepsilon$ model vrijedi za visoke vrijednosti *Re* (Reynoldsov broj) gdje je $\nu_t \gg \nu$ (ν je laminarna kinematička viskoznost), točnije u razvijenom turbulentnom području. Problem se javlja na stijenkama gdje se fluid lijepi te je brzina jednaka nuli. Približavanjem stijenci se i *Re* sve više smanjuje te navedeni model turbulencije ovdje prestaje vrijediti. Kako bi se premostilo područje niskog *Re* koriste se teorijska rješenja primjenjiva uz stijenku, takozvane zidne funkcije. Rubni uvjeti postavljeni pomoću zidnih funkcija vidljivi su u tablici 3.1 za granice *Buildings* i *Bottom*.

3.3. Sheme diskretizacije

Kako bi se riješio sustav parcijalnih diferencijalnih jednadžbi potrebno je integrirati te jednadžbe po kontrolnom volumenu [9]. Članovi jednadžbi (difuzijski, konvektivni i izvorski/ponorski član) se diskretiziraju raznim metodama. Numeričke sheme diskretizacije zapravo predstavljaju transformiranje beskonačno-dimenzionalne jednadžbe operatora u konačno-dimenzionalnu algebarsku jednadžbu. Metode diskretizacije različito rješavaju zadatak zamjene sustava parcijalnih diferencijalnih jednadžbi algebarskim jednadžbama i prilikom tog procesa se neizbježno gube određene informacije. U ovom radu korištena je metoda konačnih volumena. U njoj je područje koje se razmatra podijeljeno na konačan broj volumena koji u potpunosti ispunjavaju područje strujanja te se jednadžbe postavljaju i rješavaju za svaki od njih. Fizikalne veličine se računaju u težištima konačnih volumena i interpoliraju se kako bi se dobile vrijednosti na stranicama konačnog volumena. Volumenski i površinski integrali aproksimiraju se nekom od metoda za diskretizaciju integrala. Konvektivni član predstavlja transport fizikalnih veličina zbog strujanja fluida. Uloga sheme diskretizacije konvektivnog člana je odrediti vrijednost fizikalne veličine na stranici volumena iz vrijednosti veličine u njegovom središtu. Za diskretizaciju konvektivnog člana korištena je shema *Gauss Gamma V*

1.0. Uslijed postojanja gradijenata u sustavu dolazi do transporta fizikalnih veličina i o tome govori difuzijski član. Princip gradijentnih shema je pisanje slabe formulacije parcijalnih diferencijalnih jednadžbi zamjenom svih kontinuiranih prostora i operatora diskretnim. Za gradijentnu shemu odabrana je *Gauss linear* shema diskretizacije. Laplace-ov član predstavlja kombinaciju operatora divergencije i gradijenta. Princip je isti, diskretizirati parcijalne diferencijalne jednadžbe zamjenom parcijalnih derivacija njihovim aproksimacijama. Korištena shema diskretizacije Laplaceov-og izvorskog člana je *Gauss linear corrected.*

3.4. Povezivanje tlaka i brzine

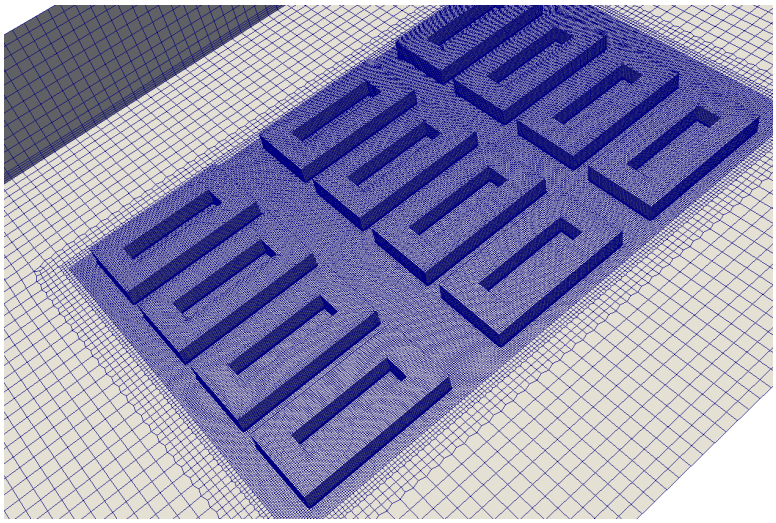
SIMPLE algoritam je iterativna procedura u kojoj se određuju polje tlaka i polje brzine rješavanjem sustava lineariziranih jednadžbi nastalih diskretiziranjem jednadžbe kontinuiteta i jednadžbe količine gibanja. Koraci u SIMPLE algoritmu su sljedeći:

1. Preuzimanje polja tlaka i protoka iz prethodne iteracije.
2. Izračunavanje novog polja brzine rješavanjem podrelaksirane jednadžbe količine gibanja.
3. Izračunavanje novog polja korekcije tlaka rješavanjem jednadžbe kontinuiteta u obliku jednadžbe korekcije tlaka.
4. Eksplicitno podrelaksiranje korekcije tlaka.
5. Izračunavanje novih protoka kroz stranice konačnih volumena.
6. Rješavanje diskretiziranih jednadžbi modela turbulencije.
7. Provjera konvergencije rješenja te nastavak iterativnog rješavanja u slučaju da rješenje nije konvergiralo.

4. Rezultati

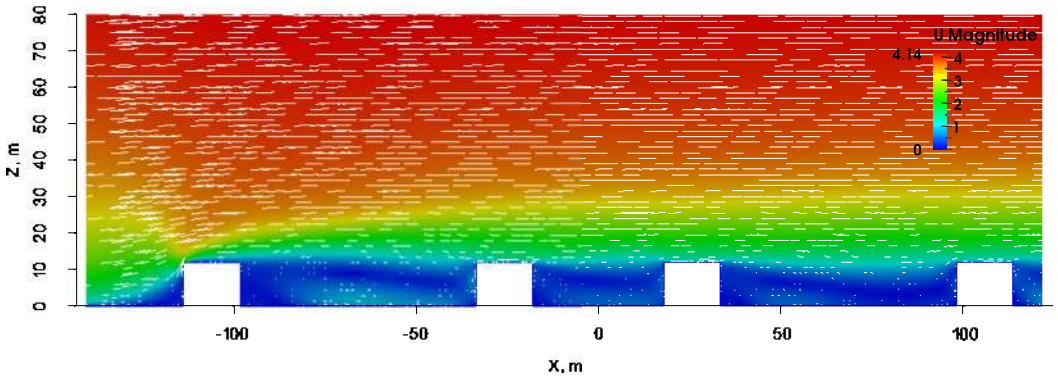
Kao što je već navedeno, za razliku od članka [7], u ovom radu modeliralo se nekoliko različitih slučajeva kako bi se mogla napraviti usporedba te zaključiti o tome koliki utjecaj na polje strujanja ima određena visina zgrade. Slučajevi koji su izrađeni u tu svrhu razlikuju se prema visini najviše zgrade, tornja, te se njihovi nazivi odnose na tu visinu. Visina H koja služi za skaliranje iznosi H=12m i to je visina svih zgrada u naselju, osim tornja, stoga se slučajevi zovu: $1H$, $2H$, $3H$, $4H$ i $8H$ (ovisno o tome koliko je puta visina u određenom slučaju veća ili nije veća, u slučaju $1H$, od osnovne visine H). Nadalje, slučajevi se razlikuju i prema broju konačnih volumena mreže jer se s povećanjem visine tornja proporcionalno povećavala i visina domene. Na sve slučajeve primijenjeni su isti rubni uvjeti i postavljeni isti profili veličina dobivenih na izlazu iz 2D domene. Na taj način osigurano je da je visina tornja jedini parametar koji utječe na promjene polja strujanja u naselju. Opis rezultata započet će najmanjom visinom tornja te će se pratiti razvoj polja brzine i tlaka s povećanjem visine tornja. Osim opisa, bit će dana i usporedba slučajeva međusobno.

Slučaj visine tornja $1H$

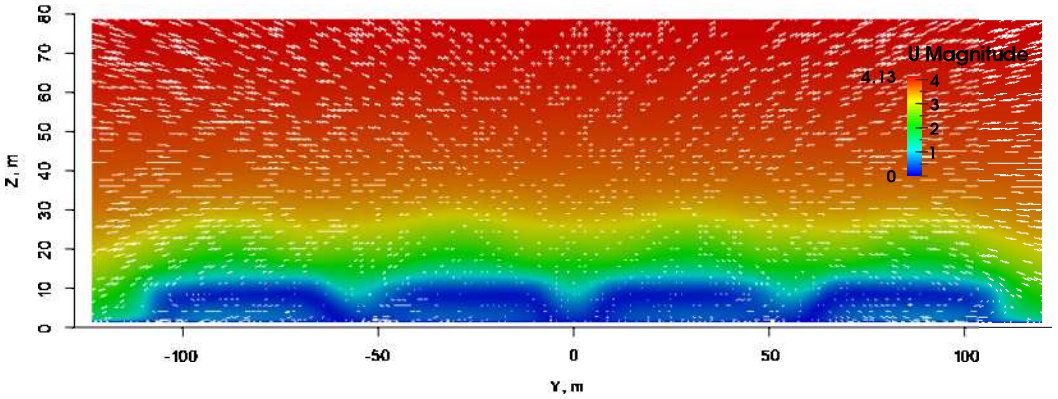


Slika 4.1: Prikaz geometrije i mreže konačnih volumena u slučaju visine tornja $1H$

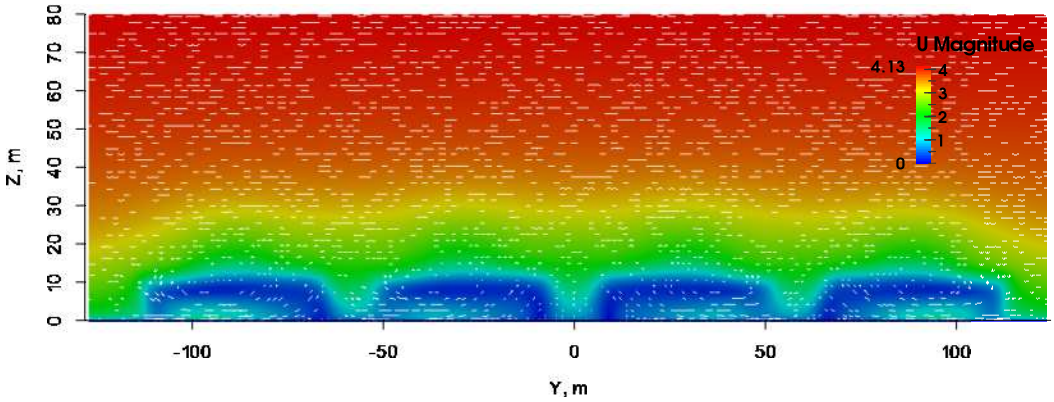
Slučaj $1H$ opisuje geometriju naselja u kojem je visina tornja jednaka visini svih ostalih zgrada u naselju, prikazano na slici 4.1, točnije tornja u ovom slučaju niti nema. Ovakav slučaj izrađen je kako bi se vidjela razlika između polja strujanja onda kada su sve zgrade jednake visine i onda kada postoji neka viša zgrada u naselju. Pretpostavka je da u ovom slučaju nema očekivane promjene polja strujanja, koje se javljaju s uvrštavanjem tornja u naselje prema [7]. Iz tog razloga postoji veća šansa da se štetne čestice zadržavaju u blizini tla jer neće postojati struja zraka koja bi ih mogla odnijeti. Iz sljedećih prikaza mogu se potvrditi navedene pretpostavke. Na slici 4.2a vidi se vektorsko polje brzine u smjeru strujanja. U ovom slučaju tornja nema, zgrada koja bi trebala biti toranj jednake je visine kao i sve ostale i stoga se jako mali dio strujanja odvaja u vertikalni tok prema dolje nakon što udari o zgradu. Zbog toga nema značajnijeg prijenosa momenta u vertikalnom smjeru prema dolje i vrtlog koji se stvara na nastrujnoj strani je veoma mali. Veći dio strujanja prolazi iznad i zbog toga ne dolazi do izdizanja strujanja na zavjetrinskoj strani zgrade.



(a) Vektori brzine za slučaj $1H$ u presjeku y=30m ($2.5H$), presjek na polovici tornja. Strujanje je s lijeva na desno.



(b) Vektori brzine za slučaj $1H$ u presjeku x=0m ($0H$), na polovici avenije iza tornja (okomito na smjer strujanja).

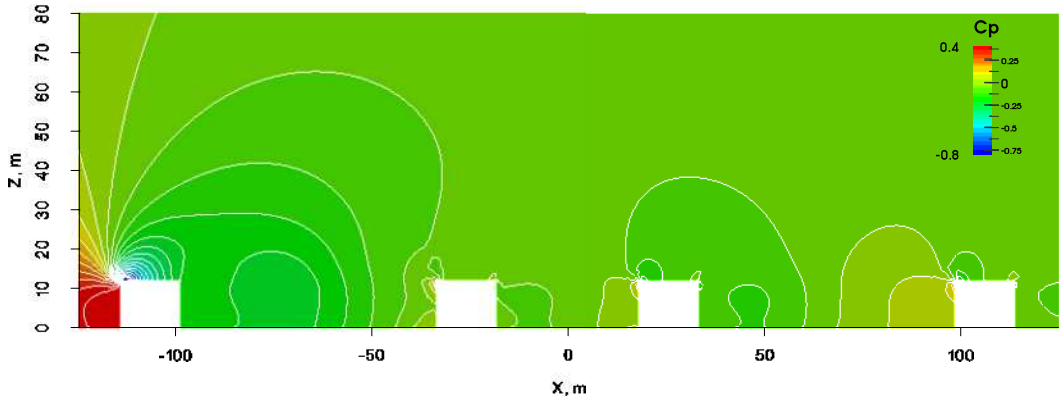


(c) Vektori brzine za slučaj $1H$ u presjeku x=126m ($10.5H$), na polovici avenije (okomito na smjer strujanja), jedan blok iza tornja.

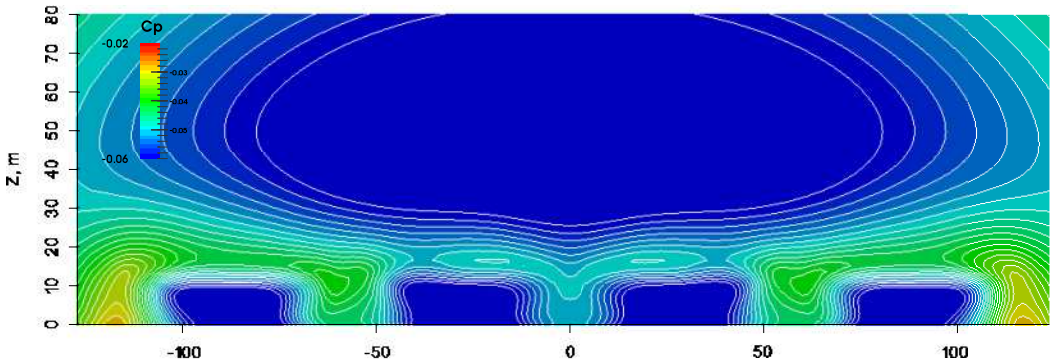
Slika 4.2: Vektori brzine za slučaj $1H$

U slučaju $1H$ ne dolazi ni do nastajanja bočnog strujanja od podnožja susjednih zgrada prema tornju u aveniji sa zavjetrinske strane tornja. Izostankom bočnog strujanja nema ničega što bi uzrokovalo nastajanje vrtloga sa zavjetrinske strane tornja. Navedene tvrdnje vidljive su na slici 4.2b. U ovom slučaju može se pretpostaviti da neće biti ni nastanka strujanja prema tornju u aveniji udaljenoj jedan blok nistrujno od tornja, što se može potvrditi pogledom na sliku 4.2c.

Kako bi se dodatno opisalo strujanje izrađeni su i prikazi koeficijenta tlaka C_p za slučaj $1H$. Iz njih se može uočiti polje tlaka u naselju koje se sastoji od zgrada jednake visine. Ti prikazi poslužit će prilikom analize sljedećih slučajeva i usporedbe utjecaja različitih visina tornja. Iz slike 4.3a može se uočiti da područje potlaka započinje već nakon naleta vjetra na prvu zgradu. Zbog izostanka prepreka strujanju, brzina nakon prve zgrade ostaje ista, a samim time i polje tlaka ostaje nepromijenjeno duž promatrane geometrije. Na slici 4.3b prikazano je polje potlaka iz pogleda okomito na smjer strujanja što potvrđuje navedene tvrdnje.



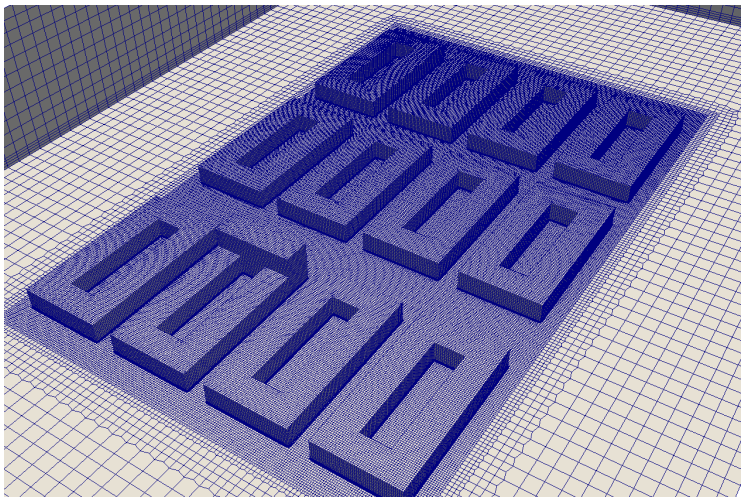
(a) Koeficijent tlaka C_p za slučaj $1H$ u presjeku y=30m ($2.5H$), presjek na polovici tornja.



(b) Koeficijent tlaka C_p za slučaj $1H$ u presjeku x=0m ($0H$), na polovici avenije iza tornja (okomito na smjer strujanja).

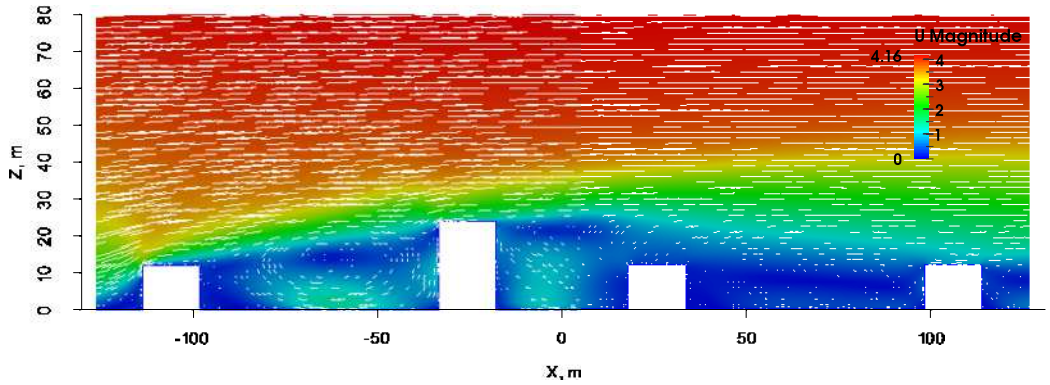
Slika 4.3: Koeficijenti tlaka C_p za slučaj $1H$

Slučaj visine tornja $2H$

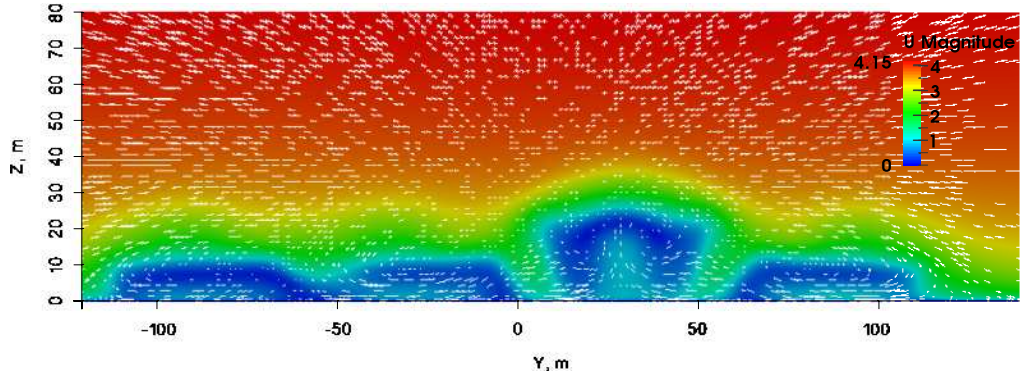


Slika 4.4: Prikaz geometrije i mreže konačnih volumena u slučaju visine tornja $2H$

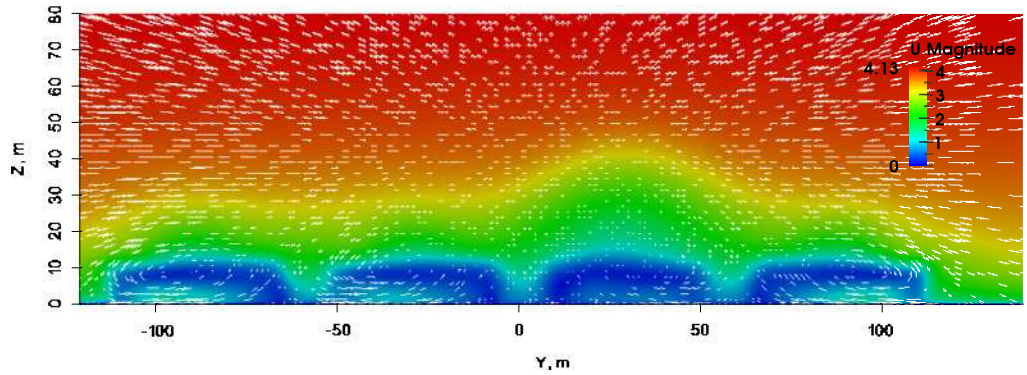
Slučaj $2H$ sadrži geometriju takvu da su sve zgrade jednake visine, $1H$, osim tornja čija visina iznosi $2H$ (toranj je dva puta viši od ostalih zgrada). Mreža konačnih volumena i geometrija za slučaj $2H$ prikazane su na slici 4.4. Vertikalno strujanje zamijećeno je na nastrujnoj strani tornja prema podu te na zavjetrinskoj strani od poda prema vrhu tornja. Ono je veoma bitno zbog transporta zraka od razine tla u visinu kako bi se poboljšala ventilacija ulica i izmjena zraka u području obitavanja ljudi. Kako se strujanje približi tornju, veći dio strujanja odvaja se u smjeru tla što uzrokuje transport momenta iz viših područja u dvorišta blokova. Taj dio strujanja stvara vrtlog na nastrujnoj strani tornja koji utječe na odnošenje čestica iz dvorišta gradskih blokova, što je vidljivo na slici 4.5a. Drugi dio strujanja nastavlja preko vrha tornja te uzrokuje povlačenje strujanja od smjera tla u visinu na zavjetrinskoj strani. Na slici 4.5b navedeno vertikalno uzdizanje može se uočiti iz presjeka okomitog na smjer strujanja zraka. Također, na istoj slici može se vidjeti bočno strujanje iz podnožja susjednih zgrada prema tornju. Ovaj zrak nadomješta prazninu koju je stvorilo vertikalno povlačenje na zavjetrinskoj strani tornja. Osim bočnog strujanja duž avenija javljaju se i dva vrloga, svaki s jedne strane tornja, koji se rotiraju u suprotnim smjerovima (desni vrtlog u smjeru kazaljke na satu, a lijevi u suprotnom smjeru). Bočno strujanje je najjače u onim dijelovima ulica gdje zgrade u smjeru strujanja vjetra pružaju zaštitu od nadolazećih vjetrova i ono je razlog stvaranja navedenih vrtloga. Još jedna značajna pojava u vektorskom polju brzine je strujanje zraka prema tornju u aveniji udaljenoj jedan blok nistrujno od tornja. Opisana pojava može se vidjeti na slici 4.5c i ona je posljedica vertikalnog povlačenja strujanja koje stvara polje potlaka daleko iza tornja u smjeru strujanja zraka.



(a) Vektori brzine za slučaj $2H$ u presjeku y=30m ($2.5H$), presjek na polovici tornja. Strujanje je s lijeva na desno.



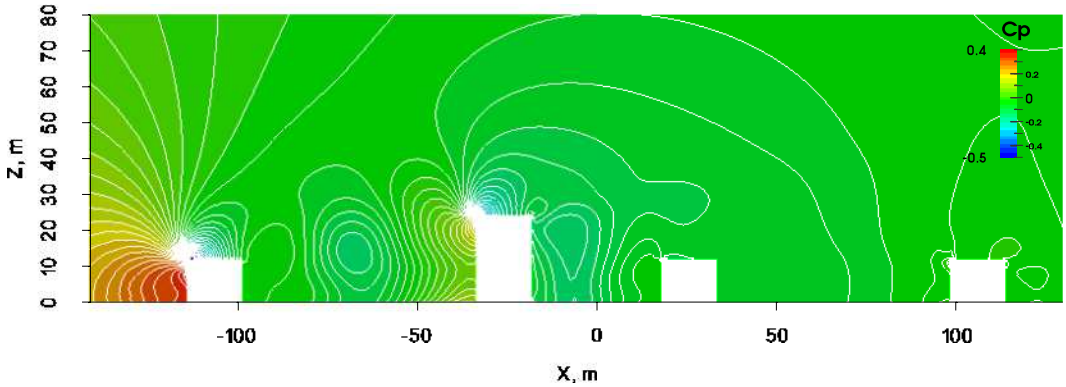
(b) Vektori brzine za slučaj $2H$ u presjeku x=0m ($0H$), na polovici avenije iza tornja (okomito na smjer strujanja).



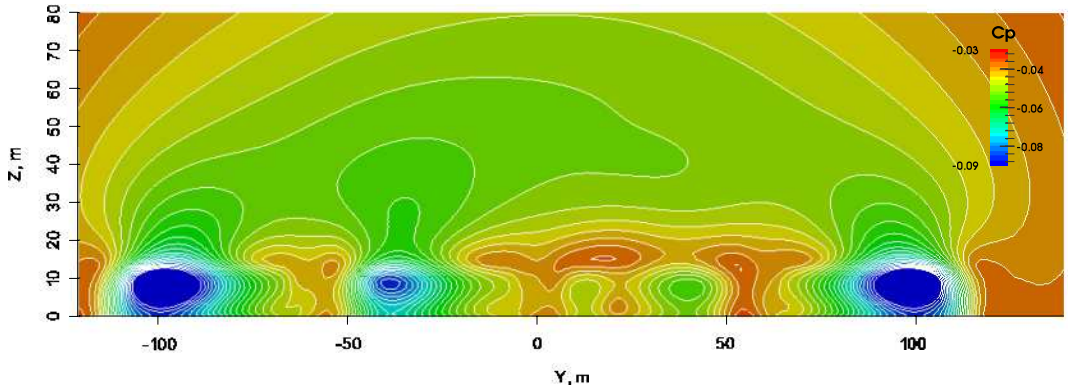
(c) Vektori brzine za slučaj $2H$ u presjeku x=126m ($10.5H$), na polovici avenije (okomito na smjer strujanja), jedan blok iza tornja.

Slika 4.5: Vektori brzine za slučaj $2H$

Kako bi se dobila cjelokupna slika strujanja, izrađeni su i prikazi polja tlaka u naselju. Izračunat je koeficijent tlaka C_p koji nam ukazuje na pretlak (ako je pozitivan) ili potlak (ako je negativan) u promatranom području. Kako je vidljivo na slikama 4.6a i 4.6b, polje visokog tlaka nalazi se ispred tornja, na nastrujnoj strani, kako se strujanje primiče tornju i usporava. Polje nižeg tlaka nalazi se na zavjetrinskoj strani tornja i najšire je upravo uz sam toranj gdje se širi bočno i uvis. To polje odgovara strujanju zraka prema gore uz sam toranj te bočnom strujanju u avenijama.



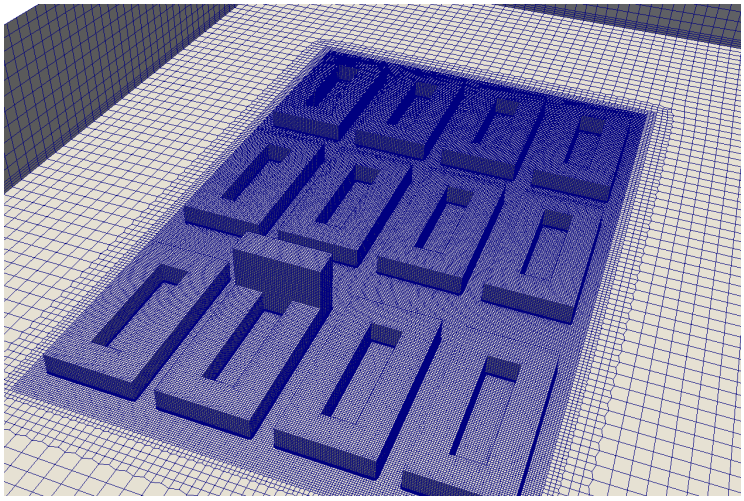
(a) Koeficijent tlaka C_p za slučaj $2H$ u presjeku y=30m ($2.5H$), presjek na polovici tornja.



(b) Koeficijent tlaka C_p za slučaj $2H$ u presjeku x=0m ($0H$), na polovici avenije iza tornja (okomito na smjer strujanja).

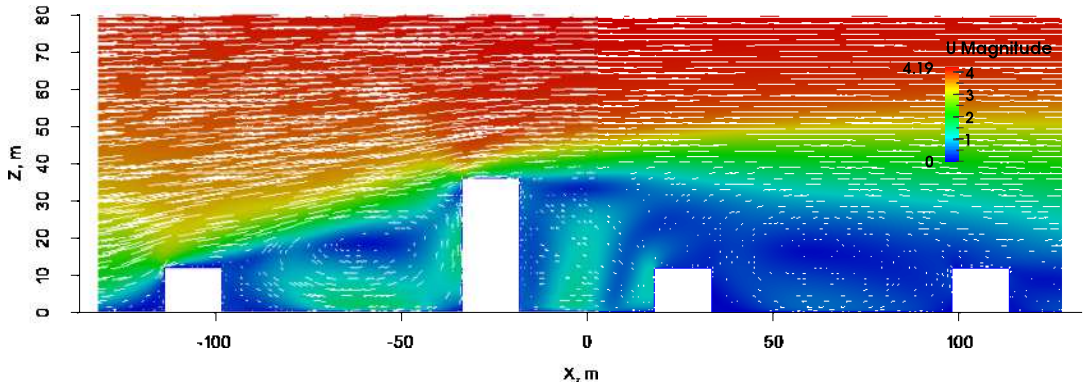
Slika 4.6: Koeficijenti tlaka C_p za slučaj $2H$

Slučaj visine tornja $3H$

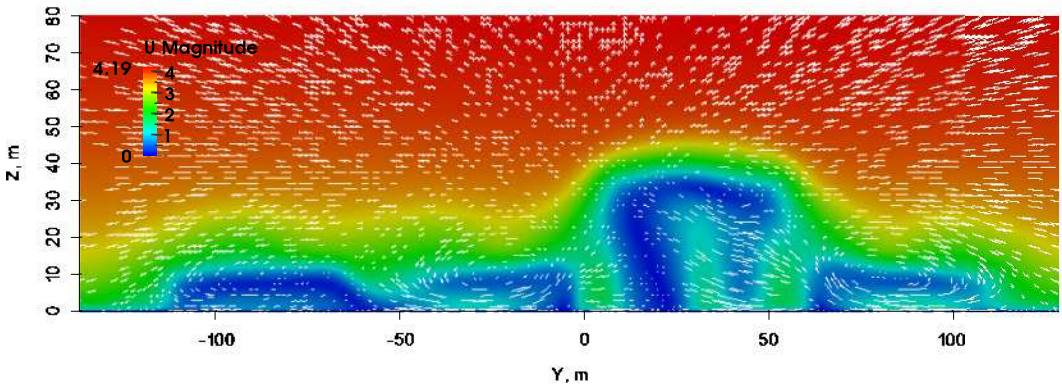


Slika 4.7: Prikaz geometrije i mreže konačnih volumena u slučaju visine tornja $3H$

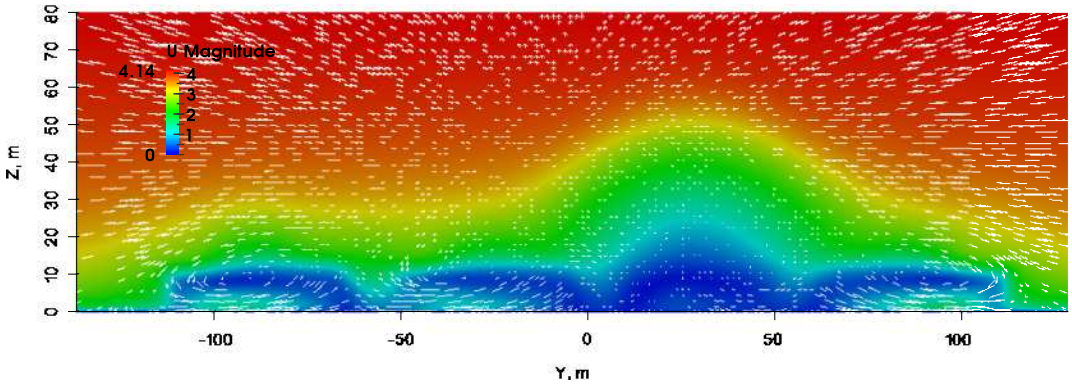
U slučaju visine tornja $3H$, toranj je tri puta veće visine od ostalih zgrada u naselju. Mreža konačnih volumena i geometrija za ovaj slučaj prikazane su na slici 4.7. Na slikama 4.8a, 4.8b i 4.8c prikazano je vektorsko polje brzine. Uočava se značajno odvajanje strujanja na nastrujnoj strani tornja te nastanak vrtloga koji uzrokuje miješanje zraka u dvorištima blokova. Ostatak strujanja prelazi preko vrha tornja, uzrokuje izdizanje na zavjetrinskoj strani tornja i stvara polje potlaka. Na zavjetrinskoj strani zamjećuje se i bočno strujanje zraka od podnožja susjednih zgrada prema tornju kao posljedica vertikalnog povlačenja strujanja uvis. Vidljivi su i vrtlozi na zavjetrinskoj strani, svaki s jedne strane tornja, koji nastaju kao posljedica bočnog strujanja u aveniji, slika 4.8b. Različit intenzitet vrtloga javlja se zbog nesimetričnosti geometrije naselja. Na slici 4.8c uočava se strujanje prema tornju iz avenije udaljene jedan blok nistrujno od tornja koje je posljedica stvaranja polja potlaka na zavjetrinskoj strani tornja.



(a) Vektori brzine za slučaj $3H$ u presjeku y=30m ($2.5H$), presjek na polovici tornja. Strujanje je s lijeva na desno.



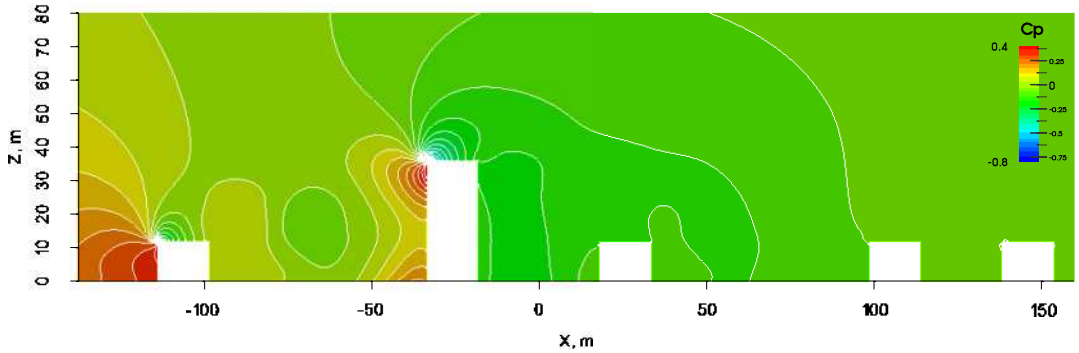
(b) Vektori brzine za slučaj $3H$ u presjeku x=0m ($0H$), na polovici avenije iza tornja (okomito na smjer strujanja)



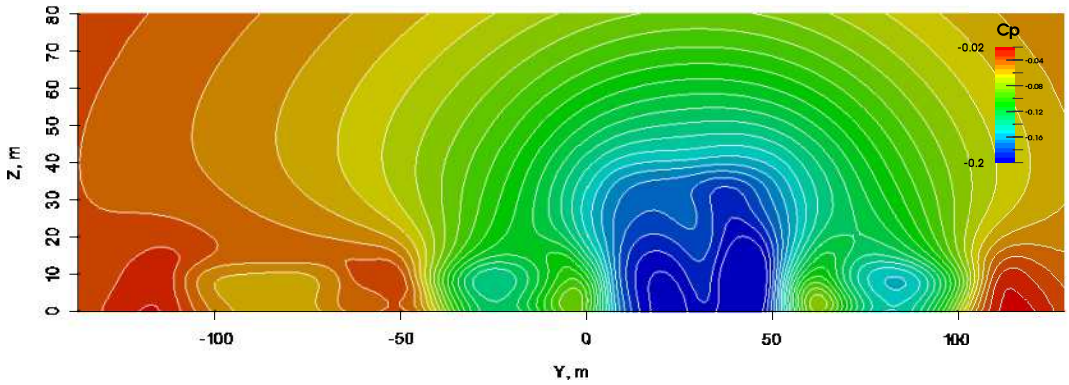
(c) Vektori brzine za slučaj $3H$ u presjeku x=126m ($10.5H$), na polovici avenije (okomito na smjer strujanja), jedan blok iza tornja.

Slika 4.8: Vektori brzine za slučaj $3H$

Napravljeni su i prikazi koeficijenta tlaka C_p. Na slici 4.9a primjećuje se veće polje pretlaka na nastrujnoj strani tornja kao posljedica nastrujavanja zraka zbog povećanja visine tornja. Usporedi li se polje tlaka s nastankom većeg vrtloga na slici 4.8a, zaključuje se kako polje tlaka na slici 4.9a u potpunosti odgovara novom vektorskom polju brzine. Vidljivo je i povećanje polja potlaka koje se širi nistrujno iza tornja, slika 4.9b. Uočavaju se i niže vrijednosti koeficijenta C_p u odnosu na slučaj $2H$ (slika 4.6b).



(a) Koeficijent tlaka C_p za slučaj $3H$ u presjeku y=30m ($2.5H$), presjek na polovici tornja.

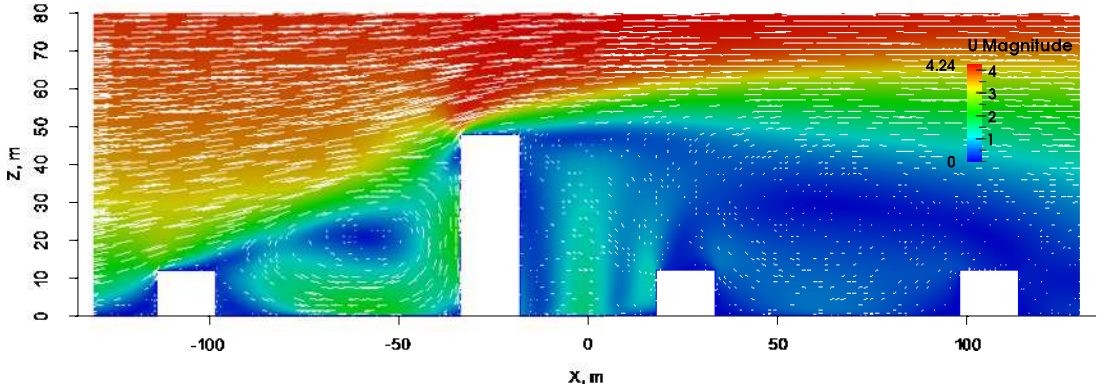


(b) Koeficijent tlaka C_p za slučaj $3H$ u presjeku x=0m ($0H$), na polovici avenije iza tornja (okomito na smjer strujanja).

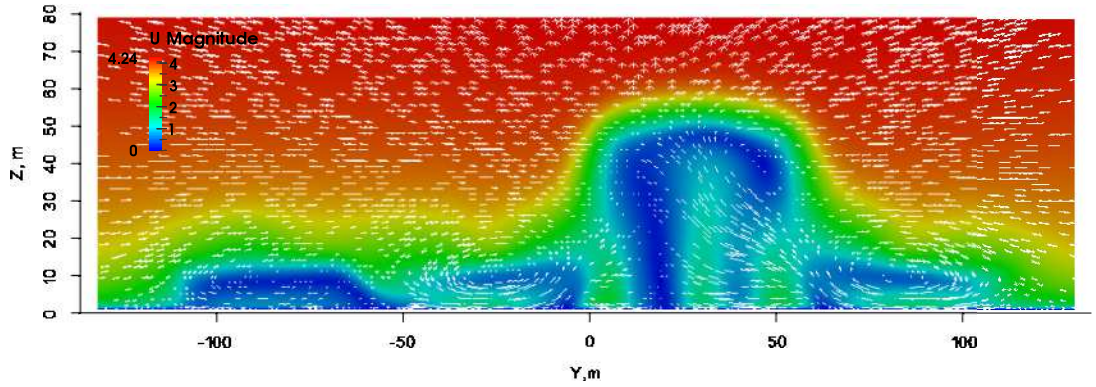
Slika 4.9: Koeficijenti tlaka C_p za slučaj $3H$

Slučaj visine tornja $4H$

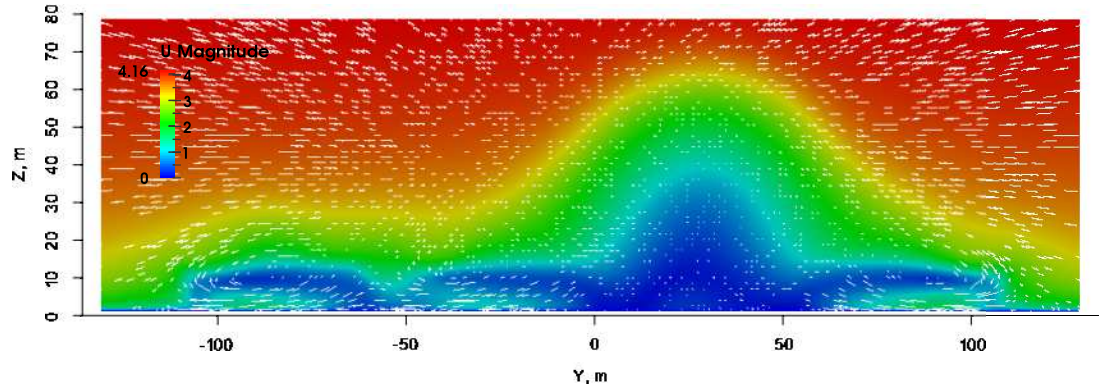
Slučaj visine tornja $4H$ pokazuje polje strujanja na koje utječe toranj četiri puta viši od ostalih zgrada u naselju. Navedena geometrija vidljiva je na slici 3.3. Na nastrujnoj strani tornja vidljivo je veliko odvajanje strujanja i nastanak intenzivnog vrtloga. Dio strujanja koji prelazi preko vrha tornja uzrokuje vertikalno povlačenje strujanja od podnožja do vrha tornja. Sve navedeno vidljivo je na slici 4.10a. Na slici 4.10b može se bolje vidjeti intenzitet vertikalnog uzdizanja strujanja te bočno strujanje u aveniji od podnožja bočnih zgrada prema tornju uzrokovano izdizanjem na zavjetrinskoj strani tornja. Na istoj slici mogu se primijetiti i vrtlozi na zavjetrinskoj strani tornja koji su posljedica bočnog strujanja prema tornju. Treći prikaz, slika 4.10c, pokazuje strujanje prema tornju iz avenije udaljene jedan blok nistrujno od tornja. Može se uočiti da su sve navedene pojave intenzivnije u odnosu na prethodne slučajeve. Na slikama 4.11a i 4.11b prikazano je polje tlaka opisano koeficijentom C_p. Uočava se veće polje povišenog tlaka na nastrujnoj strani tornja koje je višeg iznosa i u podnožju tornja na nastrujoj strani. Razlog tome je odvajanje strujanja na nastrujnoj strani koje velikim momentom kreće prema podnožju tornja te udara o tlo i toranj prije skretanja i stvaranja vrtloga. Na slici 4.11b uočava se polje potlaka koje se širi iza tornja i preko zgrada s obje strane tornja.



(a) Vektori brzine za slučaj $4H$ u presjeku y=30m ($2.5H$), presjek na polovici tornja. Strujanje je s lijeva na desno.

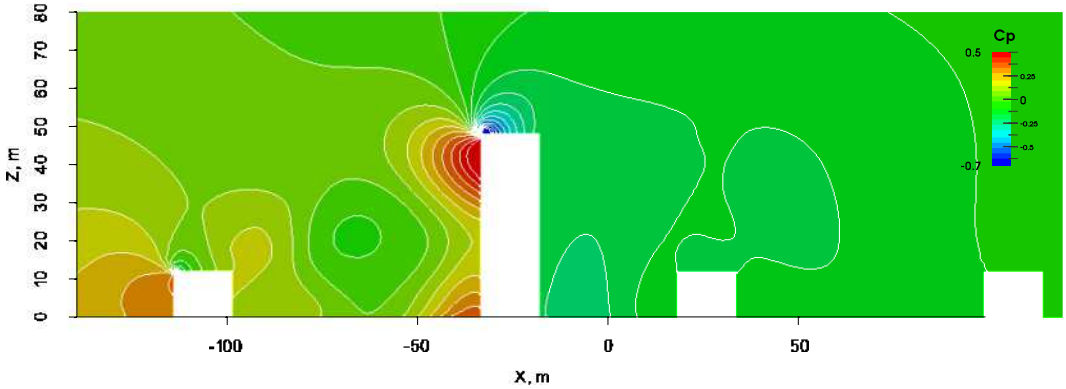


(b) Vektori brzine za slučaj $4H$ u presjeku x=0m ($0H$), na polovici avenije iza tornja (okomito na smjer strujanja).

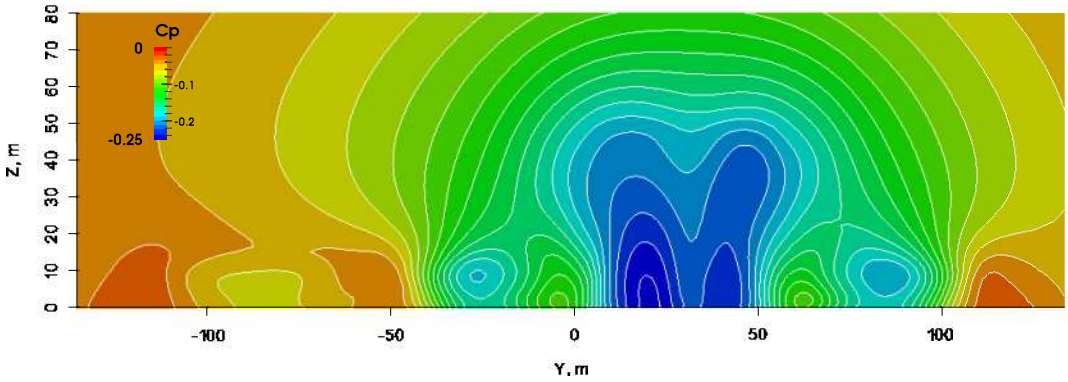


(c) Vektori brzine za slučaj $4H$ u presjeku x=126m ($10.5H$), na polovici avenije (okomito na smjer strujanja), jedan blok iza tornja.

Slika 4.10: Vektori brzine za slučaj $4H$



(a) Koeficijent tlaka C_p za slučaj $4H$ u presjeku y=30m ($2.5H$), presjek na polovici tornja.



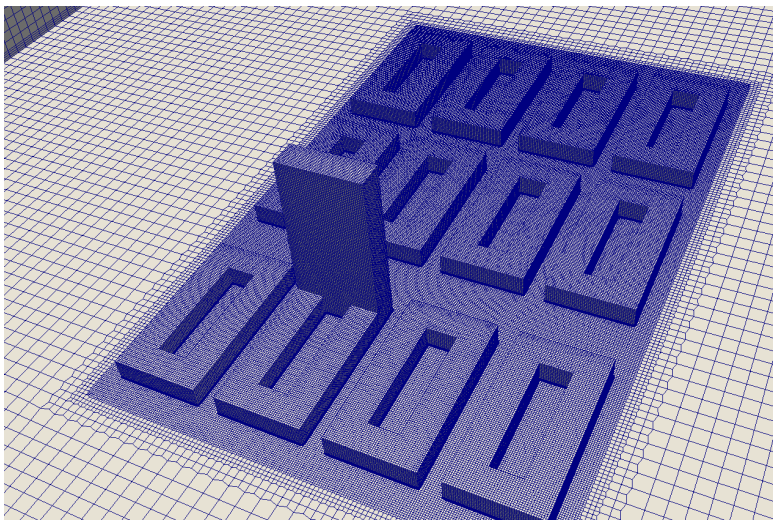
(b) Koeficijent tlaka C_p za slučaj $4H$ u presjeku x=0m ($0H$), na polovici avenije iza tornja (okomito na smjer strujanja).

Slika 4.11: Koeficijenti tlaka C_p za slučaj $4H$

U članku [7] model za simulaciju izrađen je tako da je najviša zgrada (toranj) visine $4H$. Zato je moguće usporedbu dobivenih rezultata s rezultatima članka vršiti isključivo pomoću slučaja $4H$. Članak navodi značajno vertikalno strujanje u neposrednoj blizini tornja na zavjetrinskoj strani, odvajanje strujanja i nastajanje vrtloga na nastrujnoj strani tornja, bočno strujanje u aveniji (ulica okomita na smjer strujanja), pojavu vrtloga na zavjetrinskoj strani tornja kao posljedicu bočnog strujanja te strujanje u smjeru tornja iz avenije udaljene jedan blok nistrujno. Rezultati dobiveni ovim radom potvrđuju rezultate prikazane u članku. Međutim, prikazi se ne poklapaju u potpunosti pošto vrtlozi na zavjetrinskoj strani tornja, pri visini tornja $4H$, nisu jednako vidljivi kao na prikazima iz članka, ali su postojeći. Razlika između rezultata dobivenih u članku i prikazanih rezultata javlja se zbog korištenja $k-\varepsilon$ modela turbulencije umjesto LES modela za modeliranje strujanja. Iz prikaza 4.11a i 4.11b vidljivo je

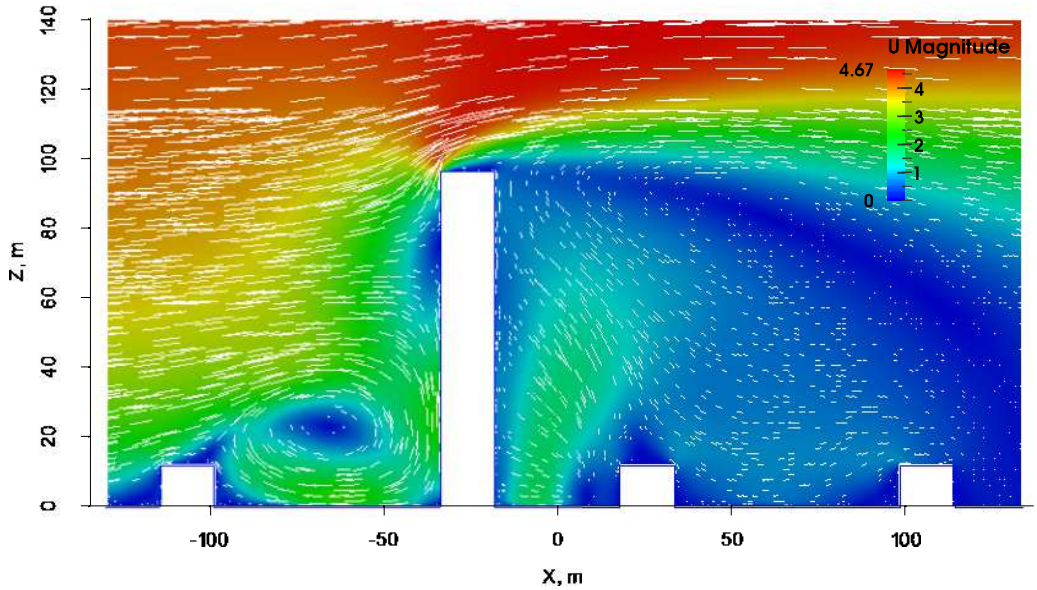
da dobiveni rezultati polja tlaka odgovaraju rezultatima iz članka uz nešto drugačije vrijednosti koeficijenta tlaka C_p. Potrebno je naglasiti da je prilikom izrade prikaza koeficijenta tlaka C_p u svim slučajevima korištena referentna vrijednost statičkog tlaka na vrhu tornja p_{ref} koja iznosi $p_{ref} = 0$ Pa dok je u članku navedeno šest kapacitivnih manometara koji mjere statički tlak na različitim lokacijama u modelu. Iz tog razloga javljaju se odstupanja u vrijednostima koeficijenta dok se područja pretlaka i potlaka poklapaju s prikazima iz članka.

Slučaj visine tornja $8H$

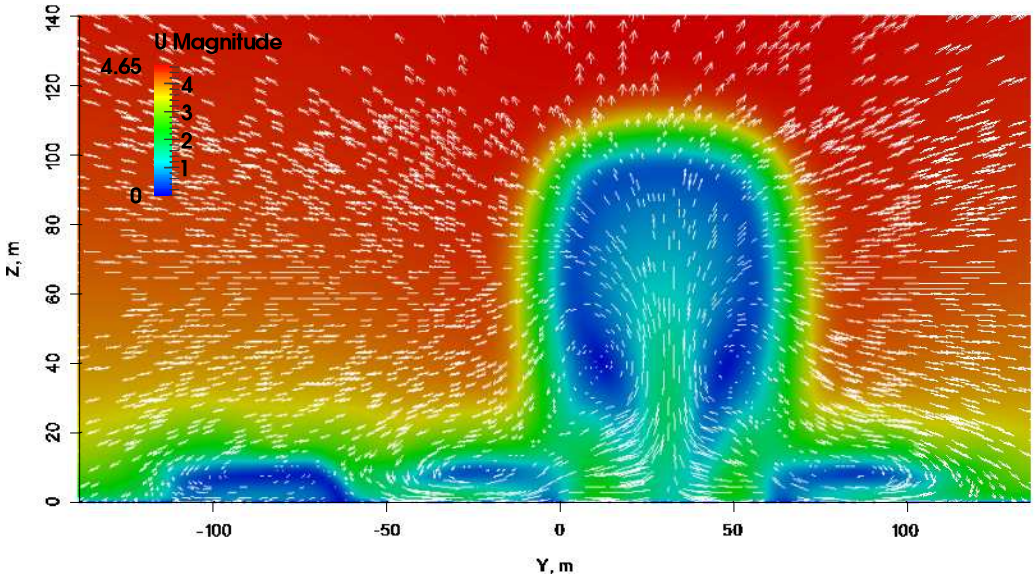


Slika 4.12: Prikaz geometrije i mreže konačnih volumena u slučaju visine tornja $8H$

Slučaj visine tornja $8H$ posljednji je od slučaja ispitanih u ovom radu i prikazan je na slici 4.12. Ovdje je toranj visine osam puta veće od visine ostalih zgrada. Slučaj je izrađen kako bi se provjerilo hoće li se i drastičnim povećanjem visine tornja u odnosu na visinu ostalih zgrada nastaviti trend povećanja intenziteta dosad navedenih pojava. Na slici 4.13a može se uočiti odvajanje velikog dijela strujanja prema dolje na nastrujnoj strani tornja te posljedično stvaranje vrlo intenzivnog vrtloga. Na slici 4.13b vidljivo je do sada najveće izdizanje strujanja na zavjetrinskoj strani te intenzivno bočno strujanje od podnožja susjednih zgrada prema tornju. Mogu se primijetiti i vrtlozi s obje strane tornja koji su posljedica bočnog strujanja u aveniji. Pogleda li se slika 4.14, primjećuje se najintenzivnije strujanje u smjeru tornja u odnosu na sve prethodne slučajeve u aveniji koja se nalazi jedan blok nistrujno od tornja.

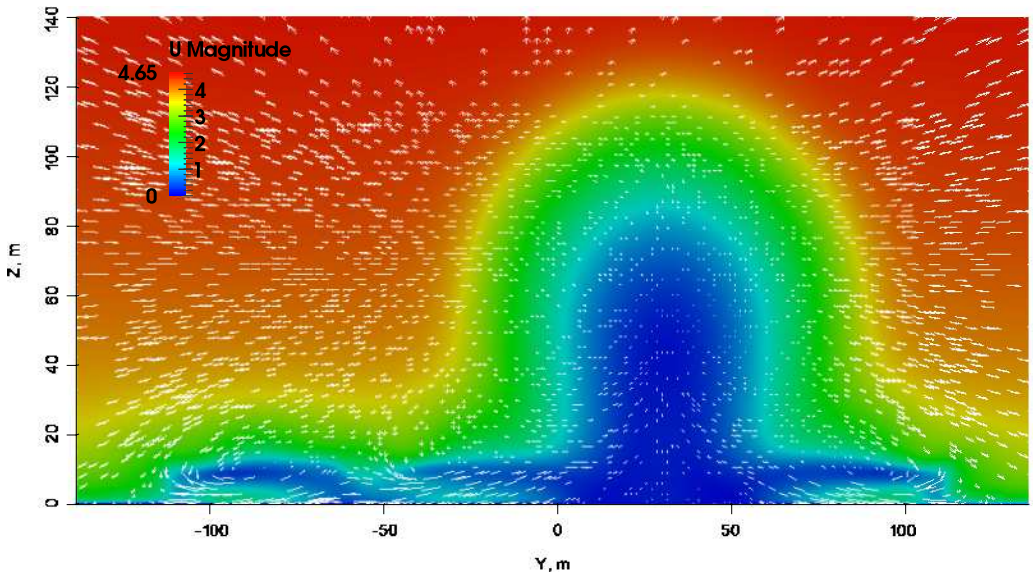


(a) Vektori brzine za slučaj $8H$ u presjeku y=30m ($2.5H$), presjek na polovici tornja. Strujanje je s lijeva na desno.



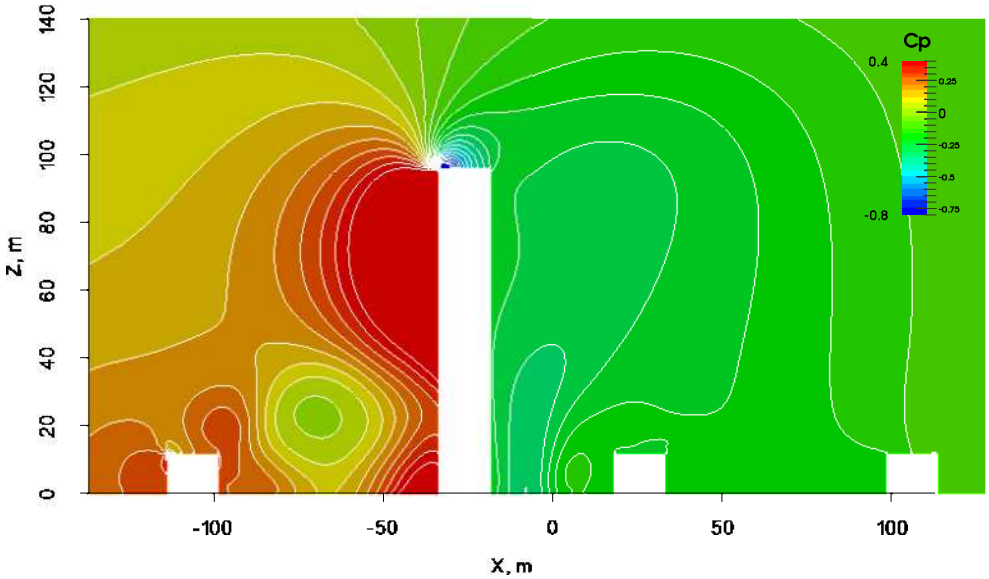
(b) Vektori brzine za slučaj $8H$ u presjeku x=0m ($0H$), na polovici avenije iza tornja (okomito na smjer strujanja).

Slika 4.13: Vektori brzine za slučaj $8H$

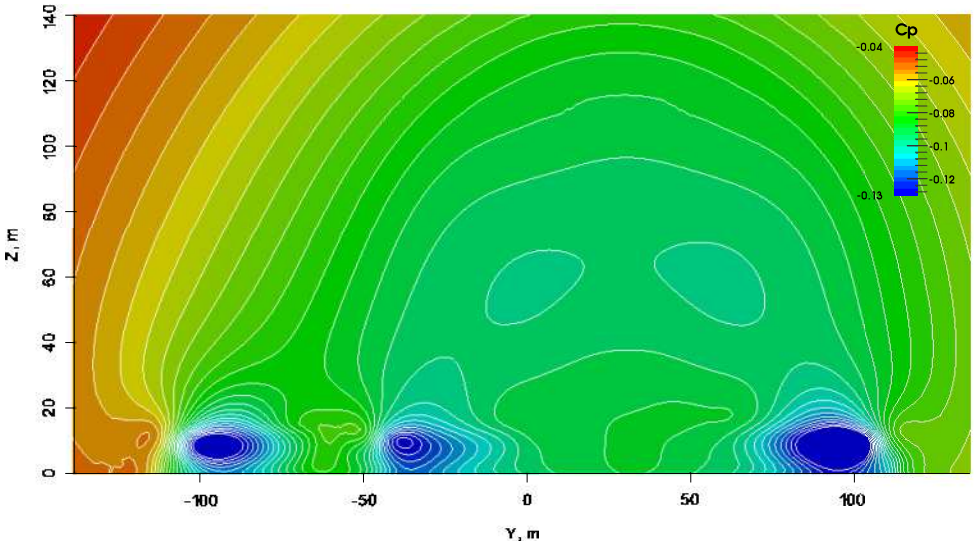


Slika 4.14: Vektori brzine za slučaj $8H$ u presjeku x=126m ($10.5H$), na polovici avenije (okomito na smjer strujanja), jedan blok iza tornja.

Posljednji prikazi koeficijenta tlaka C_p vidljivi su na slikama 4.15a i 4.15b. Primjećuje se najveće polje pretlaka na nastrujnoj strani tornja u odnosu na sve dosadašnje slučajeve, kao posljedica naleta strujanja na toranj i njegovog usporavanja. Polje pretlaka prisutno je i u podnožju nastrujne strane tornja s relativno visokim koeficijentom tlaka C_p u odnosu na ostatak domene. Polje potlaka je također veće u odnosu na prethodne slučajeve što je vidljivo na slici 4.15b. Ono se širi iza tornja u smjeru strujanja, a pošto je toranj u ovom slučaju iznimno visok, onda se i polje potlaka prostire na većem području. Vrijednosti koeficijenta C_p na zavjetrinskoj strani, slika 4.15a, su značajno niže u odnosu na slučajeve s manjim visinama tornja i dosežu do -0.5.



(a) Koeficijent tlaka C_p za slučaj $8H$ u presjeku y=30m ($2.5H$), presjek na polovici tornja.



(b) Koeficijent tlaka C_p za slučaj $8H$ u presjeku x=0m ($0H$), na polovici avenije iza tornja (okomito na smjer strujanja).

Slika 4.15: Koeficijenti tlaka C_p za slučaj $8H$

4.1. Međusobna usporedba slučajeva

Informacije dobivene iz prikaza polja brzine i tlaka za slučaj $1H$ pokazuju da željenih utjecaja na strujanje u tom slučaju nema. Slučaj $1H$ izrađen je kako bi se pokazao utjecaj tornja na polje strujanja u odnosu na slučaj kada su sve zgrade uniformne visine. On služi za usporedbu daljnjih slučajeva.

U slučaju $2H$ može se primijetiti koliki utjecaj na polje strujanja ima povećanje visine tornja na 2H. U odnosu na slučaj $1H$, nastalo je odvajanje strujanja na nastrujnoj strani tornja, vidljivo na slici 4.5a, koje uzrokuje nastanak vrtloga na istoj strani. Usporedi li se slika 4.5b sa slučajem $1H$, slika 4.2b, uočljivo je da je na zavjetrinskoj strani tornja nastalo vertikalno povlačenje strujanja prema vrhu tornja. Pogleda li se slika 4.5c i usporedi sa slikom 4.2c, vidljiv je nastanak strujanja u smjeru tornja u aveniji udaljenoj jedan blok nistrujno od tornja. Usporedbom polja tlaka slučaja $2H$, slike 4.6a i 4.6b, sa slučajem $1H$ primjećuje se nastanak polja pretlaka na nastrujnoj strani tornja kao posljedica naleta strujanja na stijenku tornja. Također, primjećuje se nastanak polja potlaka koji se širi oko tornja i nistrujno iza tornja (na slici 4.6b prikazano zelenom bojom). Iz svega navedenog može se zaključiti da je povećanje visine tornja već na dvostruku visinu od ostalih zgrada u naselju imalo značajan utjecaj na promjene polja strujanja u promatranom području. Promijenilo se vektorsko polje brzine, nastalo je izdizanje strujanja na zavjetrinskoj strani te posljedično i vrtlozi. Zbog nabrojanih promjena mijenja se i ventilacija naselja te se udvostručavanjem visine jedne zgrade postiže značajna promjena izgleda polja strujanja zraka.

U slučaju $3H$ odmah se može uočiti veće odvajanje strujanja i nastanak intenzivnijeg vrtloga na nastrujnoj strani tornja u odnosu na slučaj $2H$, slike 4.8a i 4.5a. Također, povećano je i izdizanje strujanja na zavjetrinskoj strani tornja u odnosu na slučaj 2H. Ako se pak usporedi slika 4.8a sa slikom 4.2a, uočava se koliko je značajan utjecaj tornja visine $3H$ na polje strujanja u odnosu na polje uniformne visine zgrada, točnije slučaj $1H$. Na slici 4.8b primjećuje se i veći intenzitet izdizanja strujanja na zavjetrinskoj strani u odnosu na slučaj $2H$. Uočava se i bočno strujanje od podnožja susjednih zgrada prema tornju te nastanak primjetnijih vrtloga s lijeve i desne strane tornja usporedimo li sa slučajem $2H$, slika 4.5b. Pogleda li se slika 4.8c uočljivo je i intenzivnije strujanje u smjeru tornja u odnosu na slučaj $2H$ u aveniji koja se nalazi jedan blok nistrujno od tornja. Polje tlaka je također izmijenjeno u odnosu na prethodni slučaj. Povećanje visine tornja uzrokovalo je povećanje polja pretlaka na nastrujnoj strani tornja te viši koeficijent C_p na istom mjestu. Također, polje potlaka koje se širi iza tornja je veće te je koeficijent C_p nižeg iznosa, usporedi li se sa slučajem $2H$. Navedene usporedbe govore o intenzivnijim promjenama polja strujanja s povećanjem visine tornja.

U slučaju visine tornja $4H$ dobivaju se značajne promjene polja strujanja. Ako se slika 4.10a usporedi sa slikom 4.8a zaključuje se da se povećanjem visine tornja s $3H$ na $4H$ postiže intenzivnije vrtloženje na nastrujnoj strani tornja te intenzivnije izdizanje na zavjetrinskoj strani. Pogleda li se i prikaz koeficijenta C_p za slučaj $4H$ (slika 4.11a) i usporedi se sa prikazom koeficijenta C_p za slučaj $3H$ (slika 4.9a), ponovo se uočava povećanje polja pretlaka na nastrujnoj strani tornja s povećanjem visine tornja te sve niže vrijednosti koeficijenta C_p na zavjetrinskoj strani te dalje iza tornja, u smjeru strujanja.

Usporedbom slučaja visine tornja $8H$, slika 4.13a, s prethodnim slučajevima, slike 4.2a, 4.5a , 4.8a te 4.10a, može se uočiti povećanje intenziteta vrtloga na nastrujnoj strani tornja te izdizanja strujanja na zavjetrinskoj strani s povećanjem visine tornja. Slučaj $8H$ pokazao je najveći intenzitet svih navedenih pojava. Prilikom nastrujavanja struje vjetra na nastrujnu stranu tornja, odvaja se najveći dio strujanja u odnosu na ostale slučajeve stoga se i stvara najintenzivniji vrtlog. Vertikalno povlačenje strujanja na zavjetrinskoj strani, koje je posljedica strujanja preko vrha tornja (slika 4.13b), pokazalo je najveći intenzitet u odnosu na prethodne slučajeve i uzrokovalo najveće bočno strujanje u aveniji. Zbog navedenog vertikalnog strujanja, nastalo polje potlaka je najnižeg iznosa te najvećeg volumena u odnosu na ostale slučajeve stoga je i strujanje prema tornju iz avenije udaljene jedan blok nistrujno od tornja također najintenzivnije.

Iz iznesenih rezultata može se zaključiti da je povećanje visine tornja na $8H$ pokazalo najznačajnije promjene polja strujanja na promatranom području. Zaključak koji proizlazi iz prikazanih rezultata je da se dodavanjem jedne visoke zgrade u inače uniformnom nizu zgrada može uvelike utjecati na polje strujanja u ulicama, a time i na prirodnu ventilaciju ulica. Prisustvo visoke zgrade znatno utječe na strujanja u ulicama u blizini tornja i uzrokuje bočno strujanje od podnožja susjednih zgrada prema tornju te izdizanje strujanja duž zavjetrinske zgrade tornja prema vrhu i iznad krovova zgrada.

4.2. Utjecaj visine zgrade na polje strujanja

Provedena analiza pokazala je da se izgradnjom tornja u naselju inače uniformnih zgrada utječe na polje strujanja u naselju. Pokazano je da intenzitet promjena strujanja uvelike ovisi i o visini tornja. Što je razlika visine tornja i ostalih zgrada u naselju veća, to su promjene unutar polja strujanja intenzivnije. Navedena tvrdnja dokazana je povećavanjem visine tornja i međusobnom usporedbom dobivenih rezultata polja strujanja za svaki slučaj, u prethodnom poglavlju.

4.3. Utjecaj visine zgrade na polje tlaka

Polje tlaka u naselju također se mijenja s promjenom visine najviše zgrade (tornja). Što je veća razlika visine između tornja i ostalih zgrada u naselju, to se veće polje pretlaka stvara na nastrujnoj strani tornja zbog sudaranja strujanja s prednjom površinom tornja. Što je veća razlika visine između tornja i ostalih zgrada u naselju, to je veće i polje potlaka koje nastaje i širi se iza tornja i iznad ostalih zgrada. Polje pretlaka na nastrujnoj strani tornja omogućava nastajanje vrtloga koji je intenzivniji što je veća visina tornja na koju struja zraka nalijeće. Polje potlaka omogućava izdizanje strujanja na zavjetrinskoj strani tornja, stvaranje bočnog strujanja u aveniji iza tornja te strujanje u smjeru tornja u aveniji udaljenoj jedan blok nistrujno od tornja. Navedene pojave također su intenzivnije što je veća visina tornja.

5. Zaključak

U ovom radu proučavan je utjecaj visoke zgrade (tornja) na polje strujanja u naselju inače uniformnih zgrada. Rad je temeljen na članku [7] u kojem je pokazano da visoka zgrada u naselju inače uniformnih zgrada uzrokuje promjenu polja strujanja u naselju. Ovaj rad izrađen je na temelju geometrije navedene u članku, dok su mreža i rubni uvjeti prilagođeni dostupnim rješavačima i alatima. Mreža konačnih volumena izrađena je pomoću automatskog rješavača cfMesh. Rubni uvjeti zadani su postavljanjem stacionarnog homogenog atmosferskog graničnog sloja pomoću $k - \varepsilon$ modela turbulencije i korištenjem zidnih funkcija. Za povezivanje polja brzine i polja tlaka korišten je SIMPLE algoritam. Rezultati dobiveni u ovom radu su uspoređeni s rezultatima prikazanim u navedenom članku. Zaključeno je da se rezultati za toranj visine $4H$ dobro slažu s rezultatima iz članka iako je korišten heksaedarski tip mreže umjesto tetraedarskog, granice domene izmijenjene te korišten $k-\varepsilon$ model turbulencije umjesto LES modela.

Zbog analize utjecaja visine tornja na polje brzine i polje tlaka u naselju simulirano je pet slučajeva različite visine tornja: $1H$, $2H$, $3H$, $4H$ i $8H$. Zamijećeno je odvajanje strujanja na nastujnoj strani tornja koje stvara vrtlog, izdizanje strujanja prema vrhu tornja na zavjetrinskoj strani te povlačenje strujanja od podnožja zgrada prema tornju koje uzrokuje vrtloge sa svake strane tornja na zavjetrinskoj strani. Navedene pojave javljaju se intenzivnije s povećanjem visine tornja i imaju snažan utjecaj na promjenu izgleda polja strujanja i ventilaciju naselja.

Sve gore navedeno potvrđuje rezultate članka [7] o utjecaju visokog tornja na polje strujanja. Dodatno se utvrđuje da se željeni efekti izdizanja strujanja na zavjetrinskoj strani tornja i povlačenja strujanja iz avenija javljaju to više, što je veća razlika visine tornja u odnosu na ostale zgrade u naselju. Ovaj rad, nastavno na članak [7], ujedno dokazuje i da se pomnim planiranjem izgradnje gradskih blokova može utjecati na ventiliranost ulica te se na taj način štetne čestice potencijalno mogu prirodnim putem ukloniti iz područja obitavanja ljudi.

Literatura

[1] Virag Z, Šavar M, Džijan I. *Mehanika fluida II, predavanja.* Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.

[2] Jorg Franke. *Introduction to the Prediction of Wind Loads on Buildings by Computational Wind Engineering (CWE).* Department of Fluid and Thermodynamics, University of Seigen, Germany, 2009.

[3] Cindori M, Džijan I, Juretić F, Kozmar H. *The Atmospheric Boundary Layer Above Generic Hills: Computational Model of a Unidirectional Body Force-Driven Flow.* Springer Nature B.V., 2020.

[4] Kaimal JC, Finnigan JJ. *Atmospheric Boundary Layer Flows - Their Structure and Measurement.* Oxford University Press, 1994.

[5] Richards PJ, Hoxey RP. *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ϵ turbulence model.* Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Volumes 46–47, 1993.

[6] Brixey LA, Heist DK, Richmond-Bryant J, Bowker G E, Perry SG, Wiener RW. *The effect of a tall tower on flow and dispersion through a model urban neighborhood: Part 2. Pollutant dispersion.* Journal of Environmental Monitoring 11, 2171-2179, 2009.

[7] Heist DK, Brixey LA, Richmond-Bryant J, Bowker GE, Perry SG, Wiener RW. *The effect of a tall tower on flow and dispersion through a model urban neighborhood: Part 1. Flow characteristics.* Journal of Environmental Monitoring 11, 2163-2170, 2009.

[8] Richards PJ, Norris SE. *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited.* Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011.

[9] Džijan I, Virag Z. *Računalna Dinamika Fluida, Predavanja iz kolegija Računalna dinamika fluida.* Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2010.