Računalne simulacije disperzije štetnih tvari u atmosferi

Živković, Dario

Undergraduate thesis / Završni rad

2014

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:235:631044

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

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

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dario Živković

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

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

Zagreb, 2014.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Hrvoju Kozmaru na pomoći i savjetima prilikom izrade ovog završnog rada.

Dario Živković

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:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Mat. br.:

Naslov rada na hrvatskom jeziku:

Naslov rada na engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan: Rok predaje rada: Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VIII
SUMMARY IX
1. UVOD 1
2. ATMOSFERSKI GRANIČNI SLOJ I ATMOSFERSKA TURBULENCIJA 4
2.1. Atmosferski granični sloj 4
2.2. Atmosferska turbulencija 8
2.3. Disperzija štetnih tvari u atmosferskom graničnom sloju 11
3. MATEMATIČKI MODEL 13
3.1. Osnovne jednadžbe modela 13
3.1.1. Jednadžbe strujanja 13
3.1.2. Jednadžba transporta čestica štetnih tvari 13
3.2. Turbulentno strujanje i modeliranje turbulencije 14
3.2.1. Reynoldsove jednadžbe 15
3.2.2. Modeliranje turbulencije 16
3.2.3. Jednadžba transporta štetnih tvari u turbulentnom strujanju 18
3.3. Strujanje u blizini čvrste stijenke 19
3.4. Postupak provođenja računalne simulacije 22
4. RAČUNALNI MODEL DISPERZIJE ŠTETNIH TVARI 24
4.1. Izolirana zgrada s dimnjakom na krovu 24
4.1.1. Računalna domena i geometrija zgrade 24
4.1.2. Geometrijska mreža 27
4.1.3. Rubni uvjeti 29
4.1.4. Odabir modela turbulencije i parametara simulacije 34
4.2. Susjedna zgrada postavljena ispred zgrade s dimnjakom na krovu 34
4.2.1. Računalna domena 34
4.2.2. Geometrijska mreža 36
4.2.3. Rubni uvjeti, parametri simulacije 37
4.3. Susjedna zgrada postavljena iza zgrade s dimnjakom na krovu 38
4.3.1. Domena proračuna 38
4.3.2. Geometrijska mreža 39
4.3.3. Rubni uvjeti, parametri simulacije 39
4.4. Definicija bezdimenzijske koncentracije plinova i mjernih točaka 39
5. REZULTATI I ANALIZA RAČUNALNIH SIMULACIJA 41
5.1. Vertikalni profili bitnih parametara strujanja 41
5.2. Izolirana zgrada s dimnjakom na krovu 43
5.2.1. Karakteristike strujanja 43

5.2.2. Polja koncentracije emisije u okolišu zgrade 44
5.3. Susjedna zgrada postavljena ispred zgrade s dimnjakom na krovu 48
5.3.1. Karakteristike strujanja 48
5.3.2. Polja koncentracije emisije u okolišu zgrade 49
5.4. Susjedna zgrada postavljena iza zgrade s dimnjakom na krovu 52
5.4.1. Karakteristike strujanja 52
5.4.2. Polje koncentracije emisije u okolišu zgrade 53
6. ZAKLJUČAK 55
LITERATURA 56
PRILOZI 59

POPIS SLIKA

Slika 1. Profil osrednjene brzine u atmosferskom graničnom sloju 4
Slika 2. Pulzacije brzine strujanja u atmosferskom graničnom sloju na različitim visinama od tla 5
Slika 3. Eksponent zakona potencije α u ovisnosti o aerodinamičkoj duljini hrapavosti z_o . 6
Slika 4. Profili osrednjene brzine u atmosferskom graničnom sloju 8
Slika 5. Intenzitet turbulencije prema rezultatima mjerenja u prirodi 10
Slika 6. Reynoldsovo osrednjavanje na primjeru brzine *v* 14
Slika 7. Profil osrednjene brzine u graničnom sloju uz ravnu ploču 20
Slika 8. Postupak provođenja računalnih simulacija 22
Slika 9. Računalna domena i geometrijski model ispitivane zgrade 25
Slika 10. Trodimenzijski model zgrade s dimnjakom na krovu 26
Slika 11. Geometrijska mreža za slučaj izolirane zgrade 27
Slika 12. Detalji geometrijske mreže na zgradi i na površini podloge 28
Slika 13. Detalji geometrijske mreže oko dimnjaka 28
Slika 14. Rubni uvjeti na granicama domene 29
Slika 15. Profil osrednjene vrijednosti brzine *u* 30
Slika 16. Profil intenziteta turbulencije I_u 31
Slika 17. Profil kinetičke energije turbulencije *k* 32
Slika 18. Računalna domena i geometrijski model za slučaj uzvodne zgrade visine *H* 35
Slika 19. Računalna domena i geometrijski model za slučaj uzvodne zgrade visine 2*H* 36
Slika 20. Geometrijska mreža, slučaj uzvodne zgrade visine *H* 37
Slika 21. Geometrijska mreža, slučaj uzvodne zgrade visine 2*H* 37
Slika 22. Računalna domena i geometrijski model za slučaj susjedne zgrade postavljene niz vjetar 38
Slika 23. Mreža za slučaj susjedne zgrade postavljene nizvodno 39
Slika 24. Mjerne lokacije na krovu i stražnjem zidu 40
Slika 25. Profil osrednjene brzine *u* na ulazu i na poziciji zgrade 41
Slika 26. Profil kinetičke energije turbulencije *k* na ulazu i na poziciji zgrade 42
Slika 27. Profil disipacije kinetičke energije turbulencije *ε* na ulazu i na poziciji zgrade ... 42
Slika 28. Trajektorije čestica nošenih strujanjem vjetra oko izolirane zgrade 43
Slika 29. Usporedba rezultata mjerenja i numeričkog proračuna bezdimenzijske koncentracije za strujanje pod napadnim kutom od 30° 44
Slika 30. Polje bezdimenzijske koncentracije na površini krova u *x* - *y* ravnini za strujanje pod napadnim kutom od 30° 45
Slika 31. Usporedba rezultata mjerenja i računalne simulacije bezdimenzijske koncentracije za strujanje okomito na zid 46
Slika 32. Polje bezdimenzijske koncentracije na površini krova u *x* - *y* ravnini za smjer strujanja vjetra okomito na zid 47
Slika 33. Polje bezdimenzijske koncentracije u vertikalnoj ravnini (*x* - *z*) za smjer strujanja vjetra okomito na zid 47
Slika 34. Trajektorije čestica nošenih strujanjem vjetra kad je visina uzvodne zgrade *H* 48
Slika 35. Trajektorije čestica nošenih strujanjem vjetra kad je visina uzvodne zgrade 2*H* .. 48
Slika 36. Polje bezdimenzijske koncentracije na krovu u *x* - *y* ravnini, slučaj uzvodne zgrade visine *H* 49
Slika 37. Polje koncentracije u vertikalnoj ravnini (*x*-*z*), slučaj uzvodne zgrade visine *H* .. 50

Slika 38. Polje bezdimenzijske koncentracije na krovu u *x* - *y* ravnini, slučaj uzvodne zgrade visine 2*H* 50
Slika 39. Polje koncentracije u vertikalnoj ravnini (*x* - *z*), slučaj uzvodne zgrade visine 2*H* 51
Slika 40. Trajektorije čestica nošenih strujanjem vjetra, slučaj susjedne zgrade postavljene nizvodno 52
Slika 41. Polje bezdimenzijske koncentracije na krovu u *x* - *y* ravnini, slučaj susjedne zgrade postavljene nizvodno 53
Slika 42. Polje koncentracije u vertikalnoj ravnini (*x*-*z*), slučaj susjedne zgrade postavljene nizvodno 54

POPIS TABLICA

Tablica 1. Klasifikacija hrapavosti terena s odgovarajućim vrijednostima z_o 7
Tablica 2. Dimenzije krovnih struktura 26

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_b	m^2	površina nastrujne površine zgrade
I_u, I_v, I_w	-	intenzitet turbulencije u *x*, *y* i *z* smjeru
Re_t	-	Reynoldsov broj turbulencije
Sc_t	-	turbulentni Schmidtov broj
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	m/s	osrednjene vrijednosti brzine u *x*, *y* i *z* smjeru
u', v', w'	m/s	pulzirajuće vrijednosti brzine u *x*, *y* i *z* smjeru
u_{ref}	m/s	referentna brzina na z_{ref}
u_τ	m/s	brzina trenja
w_i	-	maseni udio plina *i*
z_0	m	aerodinamička duljina hrapavosti
z_{ref}	m	referentna visina
Γ^k	-	koeficijent turbulentne difuzije kinetičke energije turbulencije
Γ^ε	-	koeficijent turbulentne difuzije disipacije kinetičke energije turbulencije
$\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$	m/s	standardna devijacija brzine u *x*,*y* i *z* smjeru
A_d	m^2	površina ulaza u domenu
B	-	faktor zagušenja
B	m	širina zgrade
B_d	m	širina domene
d	m	debljina istisnuća
f	1/s	frekvencija
h	m	visina objekta
H	m	visina zgrade
H_d	m	visina domene
k	m^2/s^2	kinetička energija turbulencije
K	-	bezdimenziijska koncentracija
k_s	m	hidrodinamička visina hrapavosti
L	m	duljina zgrade
L_d	m	duljina domene
M	-	Machov broj
p	Pa	tlak
Re	-	Reynoldsov broj
t	s	vrijeme
u, v, w	m/s	apsolutne vrijednosti brzine u *x*, *y* i *z* smjeru
x, y, z	-	osi koordinatnog sustava

z	m	visina
α	-	eksponent zakona potencije
δ	m	debljina graničnog sloja
ε	$\mathrm{m^2/s^3}$	disipacija kinetičke energije turbulencije
κ	-	von Kármánova konstanta
μ	kg/ms	dinamička viskoznost
ν	$\mathrm{m^2/s}$	kinematička viskoznost
ρ	$\mathrm{kg/m^3}$	gustoća zraka
τ	$\mathrm{N/m^2}$	tangencijalno naprezanje
τ	s	vrijeme

SAŽETAK

Zagađenje zraka emisijama tvari štetnih po ljudsko zdravlje je u stalnom porastu. Taj je problem naročito izražen u urbanim područjima zbog gustoće naseljenosti i velikog broja izvora onečišćenja zraka. Metode kojima se istražuje disperzija tvari u atmosferi uključuju mjerenja u prirodi, zračnom tunelu i provedba računalnih simulacija. U ovom radu je postavljen računalni model disperzije štetnih tvari iz dimnjaka zgrade smještene u urbanom okruženju. Strujanje vjetra je modelirano kao termički neutralno stratificirani atmosferski granični sloj. Izrada računalnog modela provedena je prema važećim preporukama za korištenje računalne dinamike fluida u proučavanju utjecaja vjetra na objekte. Simulacije su provedene računalnim paketom koji rješava postavljeni matematički model uz primjenu osrednjenih Navier-Stokesovih jednadžbi i k-ε modela turbulencije. Rezultati računalnih simulacija validirani su rezultatima eksperimenata u zračnom tunelu i u prirodi. Nakon validacije računalnog modela u konfiguraciji s jednom izoliranom zgradom provedene su dodatne simulacije s ciljem ispitivanja disperzije štetnih tvari pod utjecajem okolnih zgrada.

Usporedba rezultata računalnih simulacija s rezultatima mjerenja u prirodi i u zračnom tunelu pokazuje da su računalnim simulacijama uspješno modelirane koncentracije emisije u smjeru glavnog strujanja, dok su rezultati postignuti u poprečnom smjeru niži od eksperimentalnih rezultata. Postignuti rezultati ukazuju na činjenicu da konfiguracija objekata u neposrednoj blizini izvora emisije štetnih plinova u bitnome određuje koncentraciju tih plinova u urbanim područjima.

Ključne riječi: atmosferski granični sloj; aerodinamika zgrade; disperzija štetnih tvari; računalna dinamika fluida (CFD).

SUMMARY

Air pollution dispersion with adverse effects on human health has been constantly increasing. This problem is particularly exhibited in urban areas due to high population density and a large number of pollutant sources. Field measurements, wind-tunnel experiments and computational modelling are common research tools used to tackle air pollution dispersion and dilution. In this study, a computational model has been developed to investigate air pollutant dispersion from a roof stack of a building placed in an urban environment. Wind flow is modelled as neutrally stratified atmospheric boundary layer. Simulations are carried out by using the best practice guidelines in computational wind engineering. A developed computational model uses Reynolds-Averaged-Navier -Stokes equations and the realisable k-ε turbulence model. The computational results are validated using the wind-tunnel and field measurements. Subsequently additional simulations are carried out in order to investigate the role of neighbouring buildings on air pollution concentration. While the computational results agree well with experiments for the main wind direction, the concentrations in the lateral direction are underestimated with respect to experimental results. Architecture proved to have a major role in determining air pollution concentration in urban environment.

Key words: Atmospheric boundary layer; building aerodynamics; air pollutant dispersion; Computational Fluid Dynamics (CFD).

1. UVOD

Analiza disperzije štetnih tvari u atmosferi i predviđanje njihove koncentracije ima sve veću ulogu u procjeni posljedica i planiranju reakcije na nepovoljno djelovanje koje po ljudsko zdravlje imaju emisije plinova, aerosoli i čestica, a s ciljem njihovog izbjegavanja ili ublažavanja [1]. Motivacija za to dolazi od brojnih toksikoloških istraživanja koja ukazuju na korelaciju između koncentracija štetnih tvari u zraku i čitavog niza zdravstvenih problema koji pogađaju ljude na ugroženom području [2] - [4]. Pritom koncentracije ne moraju biti visoke da bi imale negativan učinak na zdravlje ljudi [5].

Gradska područja su od posebnog interesa kako zbog velike količine različitih izvora šetnih emisija tako zbog guste populacije ljudi čije zdravlje i produktivnost njihovo štetno djelovanje može ugroziti. Način na koji zagađivači prodiru u unutrašnje prostore u kojima ljudi borave su najčešće usis zagađenog zraka kroz ventilacijske otvore ili prodiranje kroz prozore i vrata, a izvor zagađenja može biti na istom ili nekom od susjednih objekata. Prema Stathopoulos i dr. [6] ponovni je usis vlastitih emisija naročit problem u slučajevima laboratorija u sklopu sveučilišta, bolnica ili farmaceutske industrije, kao i proizvodnih pogona raznih industrija, podjednako zbog širokog raspona škodljivih tvari koje nastaju u takvim prostorima kao i potencijalno visokih zahtjeva za kvalitetom unutrašnjeg zraka. Pri tome je utjecaj na zdravlje, sigurnost i ugodnost radnika i osoblja, kao i moguće ugrožavanje procesa koji se odvijaju u prostoru potrebno što je moguće više umanjiti. Razumijevanje kretanja štetnih tvari u atmosferi gradskog okoliša, odnosno u neposrednoj blizini ugroženih objekata može omogućiti optimalan smještaj ventilacijskih otvora kao i konstrukciju odgovarajućih dimnjaka i ispusta koji pospješuju razrjeđenje emisija.

Disperzija štetnih tvari ovisi o strujanju vjetra u neposrednoj blizini izvora, gdje turbulentni vrtlozi miješaju emisije sa zrakom te ih razrjeđuju i transportiraju dalje od izvora. Aerodinamika građevina je u području gdje su one gusto raspoređene odlučujući faktor za karakteristike strujanja vjetra i posljedično procese disperzije i transporta onečišćivača. S obzirom na visinu objekata potrebno je uzeti u obzir i karakteristike strujanja u atmosferskom graničnom sloju i karakteristike atmosferske turbulencije [6], [7].

Prema Meroney [1] u analizi i predviđanju disperzije zagađivača u atmosferi koristi se nekoliko pristupa: mjerenje u prirodi, eksperimenti u zračnom tunelu, polu-empirijski izrazi ili simulacije pomoću računalne dinamike fluida.

Ispitivanja u prirodi daju rezultate na kojima se najbolje odražava kompleksnost fenomena atmosferske turbulencije kao i zajedničko djelovanje svih utjecajnih faktora, bez pretpostavki modela i pojednostavljenja. Stoga su ispitivanja iz prirode i sa stvarnih objekata najpouzdaniji izvor informacije o promatranom fenomenu. Nedostaci ove metode su nemogućnost kontroliranja uvjeta strujanja te su ona dugotrajna i skupa. Osim toga, mjerenja se mogu provesti samo na već postojećim objektima, tako da je ta metoda isključena za planiranje i konstruiranje budućih, još neizgrađenih građevina. Brojna su ispitivanja provedena u prirodi s ciljem utvrđivanja koncentracija emisija zagađenja. Rezultate ispitivanja na stvarnim objektima u gradskom okolišu daju Stathopoulos i dr. u [6], [7].

Druga spomenuta metoda je ispitivanje u zračnom tunelu s mogućnošću modeliranja atmosferskog graničnog sloja. Metoda može točno predvidjeti rezultate i za vrlo kompleksne geometrije, a moguće je i kontrolirati uvjete strujanja. Općenito su ispitivanja u zračnom tunelu jedan od glavnih temelja proučavanja aerodinamike. Disperziju štetnih tvari u okolišu građevina u zračnom tunelu ispitivali su Li i Meroney u [8] te nakon njih mnogi drugi. Stathopuolos daje usporedbu rezultata dobivenih ispitivanjima u prirodi i na modelu u zračnom tunelu u [6], [7]. Nedostatak ovog pristupa je taj što su ispitivanja skupa i dugotrajna kao i česta pojava problema sa zadovoljavanjem uvjeta sličnosti.

Polu-empirijski izrazi kao što ih predlažu Turner [9] ili Wilson i Lamb [10] jednostavni su za korištenje, međutim njihova primjenjivost vrlo je ograničena, kao i točnost rezultata.

Numeričke simulacije računalne dinamike fluida brže su i jeftinije u odnosu na eksperimentalne metode te uvijek daju rezultate za cijelo polje strujanja. Međutim, potrebno je pažljivo odabrati parametre simulacije prilikom numeričkog modeliranja kako bi rezultati bili pouzdani te ih je uvijek potrebno validirati usporedbom s eksperimentalnim rezultatima. Računalni resursi su ograničeni i potrebno je koristiti pojednostavljene modele turbulencije što uvelike ograničava mogućnosti dobivanja kvalitetnih rezultata. Računalno modeliranje termički neutralno stratificiranog atmosferskog graničnog sloja poboljšano je uz primjenu standardnog k-ε modela turbulencije (Juretić i Kozmar [11]), kao i uz primjenu drugih važnijih modela turbulencije s dvije jednadžbe (Juretić i Kozmar [12]). Strujanje vjetra oko zgrade u uvjetima atmosferskog graničnog sloja s modeliranom atmosferskom turbulencijom numerički je simulirano i rezultati su uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima iz prirode u Barić i dr. [13], [14]. Računalno dobivene karakteristike strujanja u recirkulacijskoj zoni zgrade dobro se podudaraju s rezultatima mjerenja. Sposobnostima računalnih modela da simuliraju disperziju u turbulentnom strujanju vjetra bave se Gousseau i dr. u [15] i Tominaga

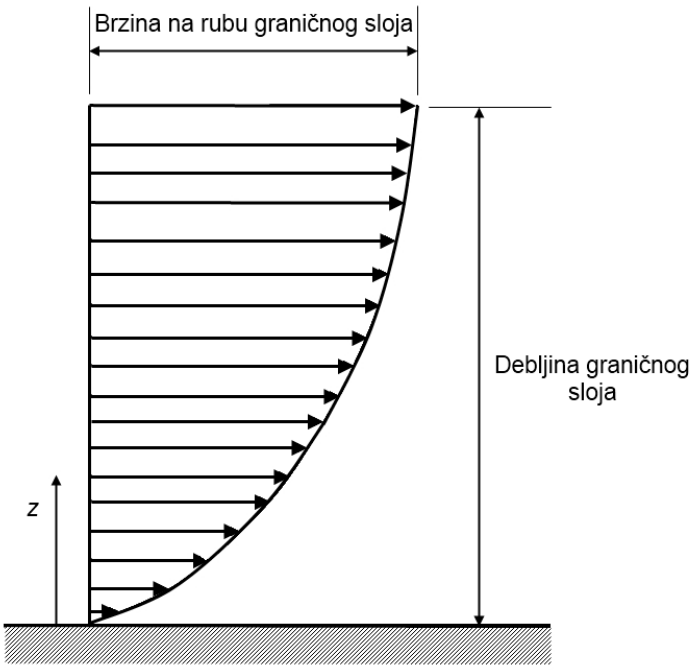
u [16]. Numeričke simulacije disperzije štetnih tvari oko građevine u gradskom okolišu provodili su Blocken i dr. [17] , Chavez [18], [19] i Gosseau [20].

U ovom radu će biti korištene metode numeričke simulacije računalne mehanike fluida kako bi se modelirala emisija štetnih tvari u uvjetima strujanja u atmosferskom graničnom sloju uključujući i atmosfersku turbulenciju, i to za nekoliko karakterističnih slučajeva. Prvo za izoliranu građevinu s dimnjakom kao izvorom emisije. Za ovaj slučaj će računalni model biti uspoređen s eksperimentalnim rezultatima iz zračnog tunela i mjerenjima u prirodi. Ocijenit će se mogućnosti odabranog modela. Nakon toga daljnje simulacije uključit će neposrednu okolinu građevine tako što će se eksplicitno modelirati susjedni objekti, prvo za slučaj da je susjedna zgrada uzvodno od emitirajuće, na kraju i za slučaj susjedne zgrade nizvodno. Ocijenit će se utjecaj okolnih zgrada na polja koncentracije oko emitirajuće zgrade, kao i kakav je utjecaj neposredne blizine izvora onečišćivača na okolinu.

2. ATMOSFERSKI GRANIČNI SLOJ I ATMOSFERSKA TURBULENCIJA

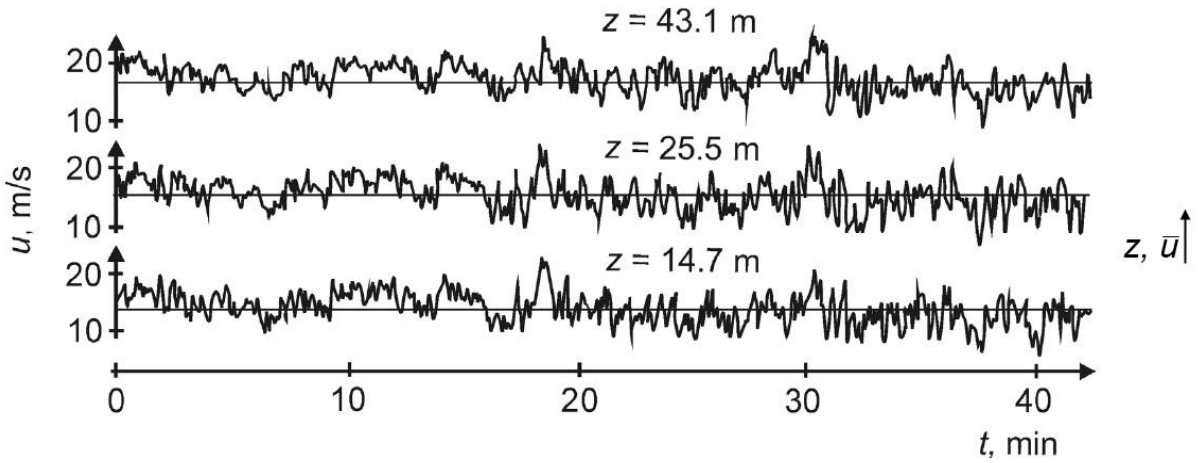
2.1. Atmosferski granični sloj

Atmosferski granični sloj je najniži sloj atmosfere, u neposrednom kontaktu s površinom Zemlje, tako da efekti na površini (trenje, izmjena topline) uvjetuju strukturu strujanja Prema teoriji graničnog sloja, osrednjene vrijednosti brzine na podlozi su jednake nuli (fluid se lijepi na čvrstu podlogu) i rastu do maksimuma na rubu graničnog sloja kako je prikazano na slici 1 prema Simiu i Scanlan [21]. Srednja debljina graničnog sloja prema Counihan [22] iznosi približno 600 m.



Slika 1. Profil osrednjene brzine u atmosferskom graničnom sloju

Proučavanje atmosferskog graničnog sloja nije potpuno ako se ne uzme u obzir fenomen atmosferske turbulencije. Slika 2 prikazuje rezultate mjerenja brzine vjetra u prirodi u smjeru glavnog strujanja na različitim visinama u odnosu na Zemljinu površinu, prema Dyrbye i Hansen [23].



Slika 2. Pulzacije brzine strujanja u atmosferskom graničnom sloju na različitim visinama od tla

Intenzitet atmosferske turbulencije jači je bliže tlu i opada s porastom visine. Više je pokretača (generatora) atmosferske turbulencije. Turbulencija vezana uz termalnu konvekciju u atmosferi nastaje istovremeno s mehaničkom turbulencijom, čiji uzrok leži u tangencijalnom naprezanju u struji fluida. U uvjetima visokih vrijednosti osrednjene brzine vjetra i malih temperaturnih gradijenata koji generiraju zanemarive uzgonske sile uslijed razlike gustoće efekte izmjene topline možemo zanemariti, tada govorimo o termički neutralno stratificiranom graničnom sloju.

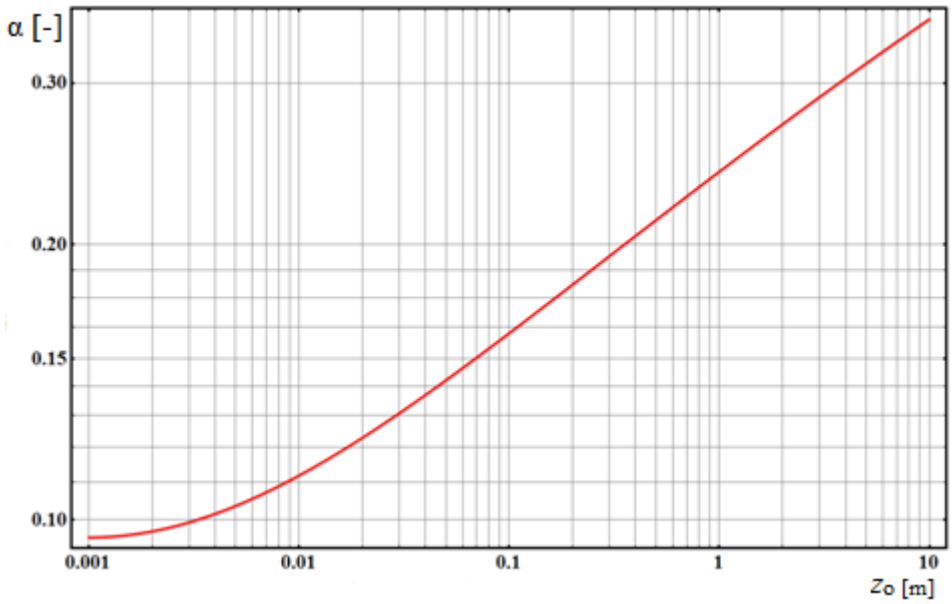
Strujanjem zraka iznad dovoljno duge ravne podloge (5 – 10 km), uz homogenu strukturu hrapavosti, uspostavlja se ravnotežni granični sloj. Vertikalna raspodjela osrednjene brzine u smjeru glavnog strujanja (*x* smjer) unutar graničnog sloja se definira zakonom potencije oblika

$$\frac{\bar{u}_z}{\bar{u}_{ref}} = \left(\frac{z-d}{z_{ref}-d}\right)^{\alpha} = \left(\frac{\tilde{z}}{\tilde{z}_{ref}}\right)^{\alpha} , \qquad (1)$$

gdje je $\bar{u}_z$ osrednjena brzina na visini *z*, $\bar{u}_{\mathrm{ref}}$ osrednjena brzina na referentnoj visini z_{ref}, *d* je visina istisnuća koja se uzima u obzir kod gusto raspoređenih elemenata hrapavosti, kao što su npr. gradovi i šume. Ovdje se zakon potencije primjenjuje tek u području iznad objekata smještenih na podlozi (iznad visine *d*).

Eksponent zakona potencije α ovisi o aerodinamičkoj duljini hrapavosti z_0 , računa se prema Counihan [22]:

$$\alpha = 0{,}0961\, log\, z_0 + 0{,}016(log\, z_0)^2 + 0{,}24\,. \tag{2}$$



Slika 3. Eksponent zakona potencije α u ovisnosti o aerodinamičkoj duljini hrapavosti z_o

Aerodinamička duljina hrapavosti z_0 je veličina koja opisuje hrapavost podloge, a određena je visinom, oblikom te gustoćom i načinom raspodjele elemenata podne hrapavosti. Tablica 1 prikazuje vrijednosti z_o ovisno o klasifikaciji hrapavosti terena prema Davenport [24] i Wieringa [25].

	z_o [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 (50*H*)
4.	0,1	Poljoprivredna područja s niskim usjevima i ponekim preprekama (farma, izolirana drveća, živice i sl.) Razmak između prepreka 20*H*
5.	0,25	Krajolik s brežuljcima ili visokim usjevima, prepreke kao npr. zidovi , ograde ili vinogradi. Razmak između prepreka 15*H*
6.	0,5	Poljoprivredna područja s gusto raspoređenim preprekama; niske šume, voćnjaci, predgrađa. Razmak između prepreka 10*H*
7.	1	Krajolik potpuno pokriven niskim objektima, međusobno slične visine, npr. šume, naselja s građevinama približno jednake veličine. Razmak između prepreka 1*H*
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

Tablica 1. Klasifikacija hrapavosti terena s odgovarajućim vrijednostima z_o

Vertikalna raspodjela osrednjene brzine u smjeru glavnog strujanja (*x* smjer) unutar graničnog sloja može se izraziti i logaritamskim zakonom. Do visine od približno 100 m, profil osrednjene brzine u smjeru glavnog strujanja može se također prema Thuillier i Lappe [26] definirati:

$$\frac{\bar{u}_z}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right), \tag{3}$$

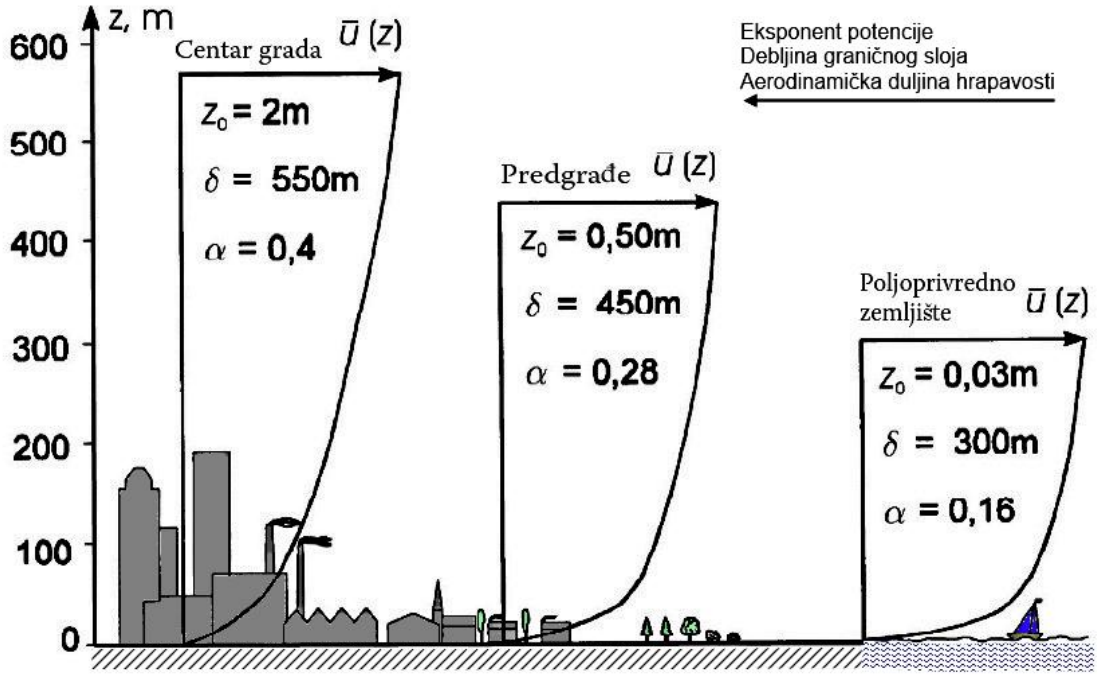
odnosno

$$\frac{\bar{u}_z}{u_{ref}} = \frac{ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)}{ln\left(\frac{z_{ref}-d}{z_0}\right)}, \tag{4}$$

za standardnu vrijednost von Kármánove konstante uzima se $\kappa = 0{,}4$.

Pri velikim vrijednostima duljine aerodinamičke hrapavosti $z_0 \geq 1$ m javljaju se veća odstupanja između osrednjenih vrijednosti brzine u uzdužnom smjeru dobivenih zakonom

potencije i logaritamskim zakonom. Na slici 4 prikazani su različiti profili osrednjenih vrijednosti brzine unutar atmosferskog graničnog sloja koji nastaju strujanjem zraka iznad različitih tipova terena, prema Pernpeintner [27]. Uz svaki profil naznačena je pripadajuća vrijednost aerodinamičke duljine hrapavosti z_0, debljine graničnog sloja i eksponenta zakona potencije α.



Slika 4. Profili osrednjene brzine u atmosferskom graničnom sloju

Vidljivo je da se povećanjem hrapavosti podloge, odnosno povišenjem građevinskih objekata ili prirodnih prepreka, smanjuje porast osrednjene vrijednosti brzine s visinom, a ukupna debljina graničnog sloja raste.

2.2. Atmosferska turbulencija

Analiza atmosferske turbulencije provodi se pomoću nekoliko parametara:

a) intenzitet turbulencije,

b) kinetička energija turbulencije,

c) Reynoldsovo naprezanje,

d) integralna duljinska mjera turbulencije,

e) spektar kinetičke energije turbulentnih pulzacija.

Parametri pod a), b) i c) bit će ovdje pobliže objašnjeni jer su dalje korišteni u ovom radu.

a) Intenzitet turbulencije

Intenzitet turbulencije je parametar koji se dobije normiranjem standardne devijacije pulzirajuće komponente strujanja osrednjenom brzinom strujanja. To je osnovni parametar kojim se opisuje atmosferska turbulencija.

$$I_u(z) = \frac{\sqrt{\overline{u'^2(z)}}}{\bar{u}_{\mathrm{ref}}} = \frac{\sigma_u}{\bar{u}_{\mathrm{ref}}}, \tag{5}$$

gdje je u' pulsirajuća komponenta strujanja u uzdužnom smjeru na visini z [m], a $\bar{u}_{\mathrm{ref}}$ osrednjena brzina strujanja na referentnoj visini z_{ref}.

Standardna devijacija σ_u za uzdužni smjer strujanja definirana je izrazom:

$$\sigma_u = \sqrt{\overline{u'^2(z)}}\ . \tag{6}$$

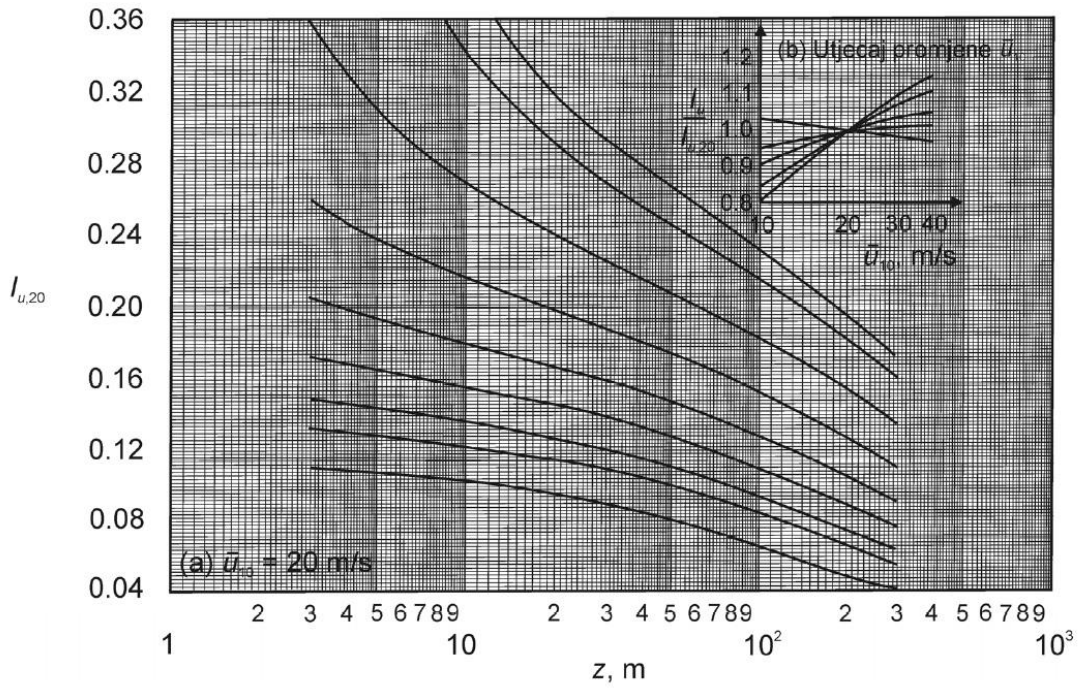
Isto kao i u izrazu (5) definira se intenzitet turbulencije za poprečni i vertikalni smjer:

$$I_v(z) = \frac{\sqrt{\overline{v'^2(z)}}}{\bar{u}_{\mathrm{ref}}}, \quad I_w(z) = \frac{\sqrt{\overline{w'^2(z)}}}{\bar{u}_{\mathrm{ref}}}. \tag{7) (8}$$

Prema Counihan [22] vrijede sljedeći odnosi između intenziteta turbulencije u blizini tla:

$$\frac{I_v}{I_u} = 0{,}75\ , \quad \frac{I_w}{I_u} = 0{,}50\ . \tag{9}$$

Na slici 5 prikazani su rezultati mjerenja iz prirode pri neutralnoj termičkoj stratifikaciji atmosfere, prema ESDU 85020 [28]. Intenziteti turbulencije za sva tri smjera su mjereni istovremeno. Intenzitet turbulencije $I_{u,20}$ određen je pri $\bar{u}_{10} = 20$ m/s na visini z = 10 m i normiran s osrednjenim vrijednostima brzine na visini mjernog mjesta $\bar{u}(z)$. Na maloj slici (b), prikazan je utjecaj vrijednosti brzine $\bar{u}_{10}$ na vrijednosti intenziteta turbulencije I_u.



Slika 5. Intenzitet turbulencije prema rezultatima mjerenja u prirodi

b) Kinetička energija turbulencije

Reynoldsovim osrednjavanjem turbulentno strujanje dijelimo na osrednjene veličine i pulzacijske veličine. Ukupna kinetička energija strujanja tako se sastoji od zbroja kinetičke energije osrednjenog strujanja ($\overline{E_{\mathrm{sr}}}$) i kinetičke energije turbulentnih pulzacija ($\overline{E}_{\mathrm{t}}$):

$$\overline{E_{\mathrm{k}}} = \overline{E_{\mathrm{sr}}} + \overline{E}_{\mathrm{t}} = \frac{1}{2}\left(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}\right) = \frac{1}{2}\left[(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2) + (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})\right]. \quad (10)$$

Dio ukupne kinetičke energije koji je posljedica doprinosa turbulentnih pulzacija nazivamo kinetičkom energijom turbulencije:

$$k = \frac{1}{2}\left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}\right) = \frac{1}{2}(\sigma_u{}^2 + \sigma_v{}^2 + \sigma_w{}^2). \quad (11)$$

Ovaj parametar je vrlo zastupljen u računalnoj dinamici fluida, gdje se rješavanjem diskretiziranih jednadžbi za kinetičku energiju turbulencije, te njezine produkcije i disipacije provodi modeliranje turbulencije bez da se vrtlozi rješavaju direktno, diskretiziranim Navier-Stokesovim jednadžbama.

Ako pretpostavimo izotropnu turbulenciju $I(z) = I_u(z) = I_v(z) = I_w(z)$ tada je veza između intenziteta turbulencije i kinetičke energije turbulencije dana izrazom:

$$k = \frac{3}{2}\left(\bar{u}_{\mathrm{ref}} I(z)\right). \tag{12}$$

b) Reynoldsovo naprezanje u struji fluida

Tangencijalna naprezanja jednaka su zbroju viskoznih i turbulentnih naprezanja:

$$\tau = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \overline{u'w'}\,, \tag{13}$$

gdje član $\tau = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$ predstavlja viskozna naprezanja, uslijed sile trenja koja nastaje u dodiru s podlogom, a član $-\overline{\rho u'w'}$ predstavlja turbulentna ili Reynoldsova naprezanja. Iznosi viskoznih naprezanja su maksimalni na podlozi, a naglo opadaju s udaljavanjem od podloge. Iznosi turbulentnih tangencijalnih naprezanja su na stijenci jednaka nuli i naglo rastu s udaljavanjem od podloge.

U području industrijske aerodinamike se uglavnom razmatraju turbulentna (Reynoldsova) tangencijalna naprezanja. Definiraju se korelacijama $\overline{u'v'}$, $\overline{v'w'}$ i $\overline{u'w'}$ i jednaka su nuli ukoliko je turbulencija izotropna, što je slučaj ukoliko su karakteristike strujanja neovisne o smjeru. Unutar atmosferskog graničnog sloja u prirodi strujanje je anizotropno, a u praktičnoj primjeni se iznosi korelacija $\overline{u'v'}$ i $\overline{v'w'}$ mogu zanemariti prema ESDU 85020 [28]. Prilikom modeliranja turbulencije *k-ε* modelima pretpostavlja se izotropno strujanje.

2.3. Disperzija štetnih tvari u atmosferskom graničnom sloju

Prilikom emisija štetnih tvari u atmosferu turbulentni vrtlozi u samoj struji onečišćivača uz pomoć djelovanja vjetra raspršuju štetne tvari, uz intenzivno miješanje s okolnim zrakom. U sredini struje emisija je koncentracija onečiščivaća mnogo veća nego na rubovima, postojanje ovog gradijenta koncentracije pokreće proces difuzije. Pritom se emitirane tvari, oslobođene u atmosferu, kreću nošene strujom vjetra. Kombinacija efekata difuzije i transporta naziva se disperzija. U vertikalnom smjeru disperzija je dominantno uvjetovana difuzijom, struja emisija dolazi u kontakt s atmosferskom turbulencijom koja je u nižim dijelovima atmosferskog graničnog sloja dominantna i čije djelovanje pripomaže disperziji. Iako difuzija

postoji, osim u vertikalnom smjeru, i uzdužno u smjeru strujanja vjetra, te poprečno na smjer strujanja vjera, u tim pravcima dominantan pokretač disperzije je konvekcija. Globalni i lokalni meteorološki faktori, prvenstveno dominantni smjer i intenzitet strujanja vjetra, faktori topologije terena te uvjeti hrapavosti uvelike utječu na disperziju štetnih tvari u okolici objekata, pogotovo u gradskom okruženju gdje je hrapavost terena očitovana u velikom broju objekata različitih visina koji generiraju turbulencije u struji vjetra. U atmosferskom graničnom sloju brzina vjetra raste udaljavanjem od podloge zbog smanjenja utjecaja trenja između podloge i struje. Na procese disperzije velik utjecaj može imati, osim mehanički generirane turbulencije, pod utjecajem trenja, i gibanje zraka čiji je pokretač temperaturni gradijent. Ako je temperatura čestice fluida različita od temperatura njoj susjedinih čestica djeluju uzgonske sile generirane razlikom gustoća, a smjer gibanja čestice ovisi o predznaku temperaturnog gradijenta. Razlikujemo stabilne, nestabilne i neutralne atmosferske uvjete ovisno o tome usporavaju li toplinski efekti česticu, potiču njeno kretanje ili nemaju efekta. Uvjeti nestabilne atmosfere su oni kod kojih toplinski efekti potiču vertikalno gibanje fluida, uvjeti stabilne atmosfere su oni kod kojih toplinski efekti usporavaju gibanje fluida, a kod uvjeta neutralne atmosfere gibanje čestica se niti ubrzava, niti usporava.

3. MATEMATIČKI MODEL

3.1. Osnovne jednadžbe modela

3.1.1. Jednadžbe strujanja

U ovom radu korištena je pretpostavka o zraku kao viskoznom, newtonovskom fluidu koji struji nestlačivo (Machov broj M < 0,3). Dinamika strujanja je za ovaj slučaj opisana zakonima očuvanja mase i količine gibanja (Navier-Stokesovim jednadžbama).

Jednadžba kontinuiteta:

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \ , \tag{14}$$

jednadžba količine gibanja:

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j v_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\right] \ , \tag{15}$$

gdje je ρ gustoća fluida, μ dinamička viskoznost, p statički tlak.

Sustav jednadžbi (14, 15) je sustav nelinearnih parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koji sadrži četiri jednadžbe s četiri nepoznata polja, za proizvoljan tok fluida nije moguće naći analitičko rješenje. Diskretiziran sustav jednadžbi rješava se numerički, iterativnim postupkom [29].

3.1.2. Jednadžba transporta čestica štetnih tvari

Eulerova jednadžba difuzije:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(D \frac{\partial c}{\partial x_j}\right), \tag{16}$$

gdje je c koncentracija zagađivača, D koeficijent molekularne difuzije (molekularna difuzivnost).

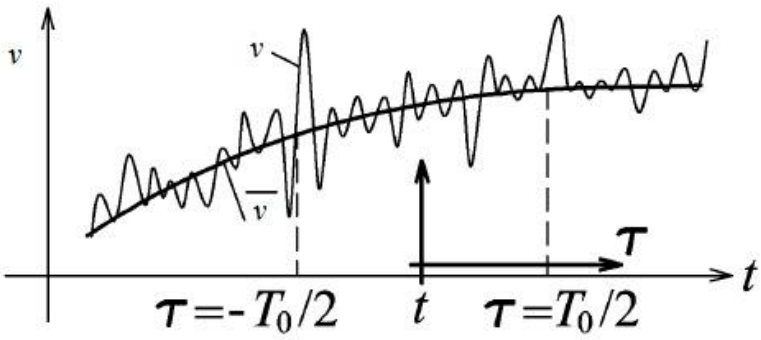
3.2. Turbulentno strujanje i modeliranje turbulencije

Laminarno strujanje fluida u prirodi i tehničkoj praksi je iznimno rijetko. Strujanje zraka u atmosferskom graničnom sloju uključujući i štetne tvari je gotovo uvijek u režimu turbulentnog strujanja stoga će biti opisan korišteni matematički model turbulencije. Turbulentno strujanje definira njegova stohastička priroda, to je strujanje kod kojeg sve veličine pokazuju kaotične promjene po prostornim i vremenskim koordinatama. Kriterij pojave turbulencije je Reynoldsov broj i njegov iznos je viši što je turbulencija izraženija. Turbulentno strujanje je stoga inherentno nestacionarno, međutim, moguće je razdvojiti fizikalne veličine na njihove statistički osrednjene vrijednosti i pulzirajuće komponente kao što pokazuje izraz (17) na primjeru brzine.

$$\boldsymbol{v_i} = \overline{\boldsymbol{v_i}} + \boldsymbol{v_i}' \tag{17}$$

$$\overline{v_i} = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} v(t-T)\, dT \tag{18}$$

Ovaj postupak vremenskog osrednjavanja se naziva Reynoldsovo osrednjavanje.



Slika 6. Reynoldsovo osrednjavanje na primjeru brzine *v*

3.2.1. Reynoldsove jednadžbe

Kada varijable u skupu Navier-Stokesovih jednadžbi (14,15) budu zamijenjene osrednjenim varijablama nastaje skup jednadžbi koje se nazivaju Reynoldsove jednadžbe (engl. Reynolds-Avereged-Navier-Stokes – RANS).

Jednadžba kontinuiteta:

$$\frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_j} = 0 \quad , \tag{19}$$

jednadžba količine gibanja:

$$\frac{\partial \rho \overline{v_i}}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho \overline{v_i}\,\overline{v_j}\right)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_i}\right) - \rho\overline{v_i' v_j'}\right] . \tag{20}$$

U jednadžbi (20) prikazane su veličine osrednjenog strujanja, ali pojavljuje se član $-\rho\overline{v_i' v_j'}$ koji sadrži pulzacijske veličine. Taj član je tenzor, označava turbulentnu difuziju količine gibanja i naziva se Reynoldsovim naprezanjem. S obzirom da je difuzija količine gibanja povezana s viskoznim naprezanjima, ovaj član se uzima kao dodatni oblik naprezanja koji doprinosi disipaciji količine gibanja.

$$-\rho\overline{v_i' v_j'} = \begin{vmatrix} -\rho\overline{v_1' v_1'} & -\rho\overline{v_1' v_2'} & -\rho\overline{v_1' v_3'} \\ & -\rho\overline{v_2' v_2'} & -\rho\overline{v_2' v_3'} \\ \text{simetrično} & & -\rho\overline{v_3' v_3'} \end{vmatrix} \tag{21}$$

S obzirom da je Reynoldsovim osrednjavanjem dobiven sustav s više nepoznanica nego je jednadžbi potrebno je modelirati tenzor Reynoldsovih naprezanja odgovarajućim izrazima koji se nazivaju modeli turbulencije, kako bi se dobio zatvoren sustav jednadžbi koji se može riješiti.

3.2.2. Modeliranje turbulencije

U praksi su često korišteni modeli turbulencije koji se nazivaju newtonovskim modelima turbulencije i temelje se na Boussinesqovoj hipotezi:

$$-\rho\overline{v_i'v_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial\overline{v_i}}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{v_j}}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho\bar{k}\delta_{ij}\ , \tag{22}$$

gdje je $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ koeficijent turbulentne viskoznosti, $k = \frac{\overline{v_i'v_i'}}{2}$ kinetička energija turbulencije, $\varepsilon = \nu\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}}$ disipacija kinetičke energije turbulencije.

Uvrštavanjem Bussinesqove hipoteze u Reynoldsove jednadžbe, od izraza (20) dobije se:

$$\frac{\partial\rho\overline{v_i}}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho\overline{v_i}\overline{v_j}\right)}{\partial x_j} = -\frac{\partial\left(\bar{p}+\frac{2}{3}\rho\bar{k}\right)}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\mu_t\right)\left(\frac{\partial\overline{v_i}}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{v_j}}{\partial x_i}\right)\right], \tag{23}$$

gdje se član $\bar{p}+\frac{2}{3}\rho\bar{k}$ naziva efektivni tlak, a zbroj turbulentne i dinamičke viskoznosti $\mu+\mu_t$ efektivna viskoznost. U jednadžbi (23) strujanje je opisano osrednjenim veličinama, a utjecaj turbulentnih pulzacija je sadržan kao jedan od pribrojnika u ova dva člana.

Ukupna kinetička energija turbulentnog strujanja sastoji se od kinetičke energije glavnog strujanja i kinetičke energije pulzacijskog dijela strujanja koja se naziva kinetičkom energijom turbulencije. Mjerenja su pokazala da pulzacije velikih valnih duljina imaju velike amplitude pulzacija brzine i posljedica su velikih vrtloga u strujanju, a pulzacije malih valnih duljina imaju male amplitude i posljedica su malih vrtloga. Kinetička energija turbulencije uglavnom je sadržana u pulzacijama velikih valnih duljina, a disipira se najvećim dijelom na nivou najmanjih pulzacija, malih geometrijskih razmjera. Pri tome postoji neprekidan tok energije u kojem se kinetička energija oduzima od glavnoga toka i predaje pulzacijama najvećih razmjera, zatim se kinetička energija pulzacija velikih valnih duljina predaje pulzacijama sve manjih valnih duljina, da bi se u pulzacijama najmanjih valnih duljina disipirala u toplinu. Turbulentno strujanje u kojem je brzina nastajanja kinetičke energije turbulencije (brzina oduzimanja energije od glavnog strujanja) jednaka brzini disipacije kinetičke energije turbulencije u toplinu naziva se ravnotežnim [30].

- *Standardni k-ε model*

Najraširenji model Reynoldsovog naprezanja (21) s dvije jednadžbe je poznat kao standardni *k-ε* model koji su izveli Jones i Launder [31] Kinetička energija turbulencije *k* se koristi u svim modelima turbulencije kao veličina kojom se modelira karakteristična brzina turbulentnih pulzacija. S obzirom da je za model turbulencije s dvije jednadžbe potrebno definirati još jednu veličinu, kao druga veličina se odabire disipacija kinetičke energije turbulencije *ε*.

Jednadžbe modela:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - \rho\varepsilon \quad , \tag{24}$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad , \tag{25}$$

gdje je $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, koeficijent turbulentne viskoznosti, a, $G_\mathrm{k} = -\rho\overline{v_i' v_j'}\frac{\partial v_i}{\partial x_j}$ predstavlja generiranje kinetičke energije turbulencije koja je proporcionalna gradijentima osrednjene brzine.

- *Realizable k-ε model*

Kako bi se poboljšali rezultati standardnog *k-ε* modela za uvjete strujanja određene velikim zakretanjima toka popraćenim značajnim pojavama vrtložnosti, napravljene su modifikacije. Prema Shih i dr. [32] predložen je ostvarivi (eng. Realizable - rke) *k-ε* model kod kojeg je modificirana metoda izračunavanja turbulentne viskoznosti, turbulentni Prandtlov broj utječe na difuziju *k* i *ε*, te su promijenjeni članovi koji prate generiranje i rasipanje *ε* u transportnoj jednadžbi.

Jednadžbe modela:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - \rho\varepsilon \quad , \tag{26}$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_1 S\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{v\varepsilon}} \quad , \tag{27}$$

gdje je $C_1 = \max\left[0{,}43, \frac{\eta}{\eta+5}\right]$; $\eta = S\frac{k}{\varepsilon}$; $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$; $\mu_\mathrm{t} = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $C_2 = 1{,}9$; $\sigma_\mathrm{k} = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1{,}2$.

3.2.3. Jednadžba transporta štetnih tvari u turbulentnom strujanju

Maseni udio zagađivača se Reynoldsovim osrednjavanjem, kao i ostatak veličina razdvoji na osrednjenu komponentu $\overline{w_i}$ i pulzacijsku komponentu w_i', transportna jednadžba (16) tada postaje:

$$\rho \mathrm{v_j} \frac{\partial \mathrm{w_i}}{\partial \mathrm{x_j}} = \rho \mathrm{D_i} \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\overline{w_i' v_j'}\right) \ , \tag{28}$$

gdje je D_i koeficijent molekularne difuzije za zagađivač *i* u mješavini plinova. Kao posljedica turbulentnog strujanja pojavljuje se član $-\overline{w_i' v_j'} = \frac{\mu_t}{Sc_t}\frac{\partial w_i}{\partial x_j}$ gdje se pojavljuje turbulentni Schmidtov broj, bezdimenzijski parametar definiran kao omjer turbulentne viskoznosti $\boldsymbol{\mu_\mathrm{t}}$ i koeficijenta turbulentne difuzije D_t :

$$Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t} \tag{29}$$

U turbulentnom strujanju s visokim vrijednostima *Re* broja vrijedi $D_\mathrm{t} >> D_i$ tako da se zanemarivanjem D_i iz (28) dobije:

$$v_j \frac{\partial w_i}{\partial x_j} = D_t \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_j \partial x_j} \ . \tag{30}$$

3.3. Strujanje u blizini čvrste stijenke

Modeli turbulencije *k-ε* su primjenjivi za potpuno turbulentna strujanja, karakterizirana visokim *Re* brojem, kod kojih je koeficijent turbulentne viskoznosti puno veći od koeficijenta molekularne viskoznosti. U području u blizini čvrste stijenke to više nije slučaj. Brzina fluida na čvrstoj stijenci je nula (pretpostavka je da se fluid lijepi za stijenku) i postupno raste u graničnom sloju do brzine glavnog strujanja. U ovom području gradijenti su veliki i bila bi potrebna izrazito fina diskretizacija kako bi se ono modeliralo, što bi bilo u velikom broju slučajeva neprihvatljivo sa stanovišta računalnih resursa. Kako bi se premostilo ovo područje između stijenke i strujanja u kojem vrijede modeli turbulencije razvijene su zidne funkcije. To su algebarski izrazi dobiveni iz eksperimentalnih podataka koji daju zadovoljavajuću točnost bez posebnog modeliranja toka s niskim *Re* brojem.

U neposrednoj blizini stijenke, strujanje je paralelno sa stijenkom, a komponenta brzine okomito na stijenku je zanemarivo mala. Ako komponentu brzine glavnog strujanja paralelno sa stijenkom označimo sa u , a koordinatu okomito na stijenku sa y , onda zanemarivanjem članova u jednadžbi količine gibanja (za smjer strujanja) čiji je utjecaj mail slijedi:

$$\frac{\partial}{\partial y}\left[\left(\mu+\mu_t\right)\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right]=\frac{\partial \tau}{\partial y}=0\,, \tag{31}$$

što pokazuje da se ukupno tangencijalno naprezanje ne mijenja u smjeru okomito na stijenku kroz granični sloj i jednako je naprezanju na stijenci.

U neposrednoj blizini stijenke gdje su turbulentne pulzacije prigušene i turbulentna viskoznost mala, dominira molekularna viskoznost (područje viskoznog podsloja), pa se turbulentna viskoznost može zanemariti, te se iz jednadžbe (31) dobije da je u tom području profil brzine linearan. Opisan je izrazom:

$$\bar{u}=\frac{\tau}{\mu}y \tag{32}$$

ili kako je to uobičajeno prikazati u bezdimenzijskom obliku:

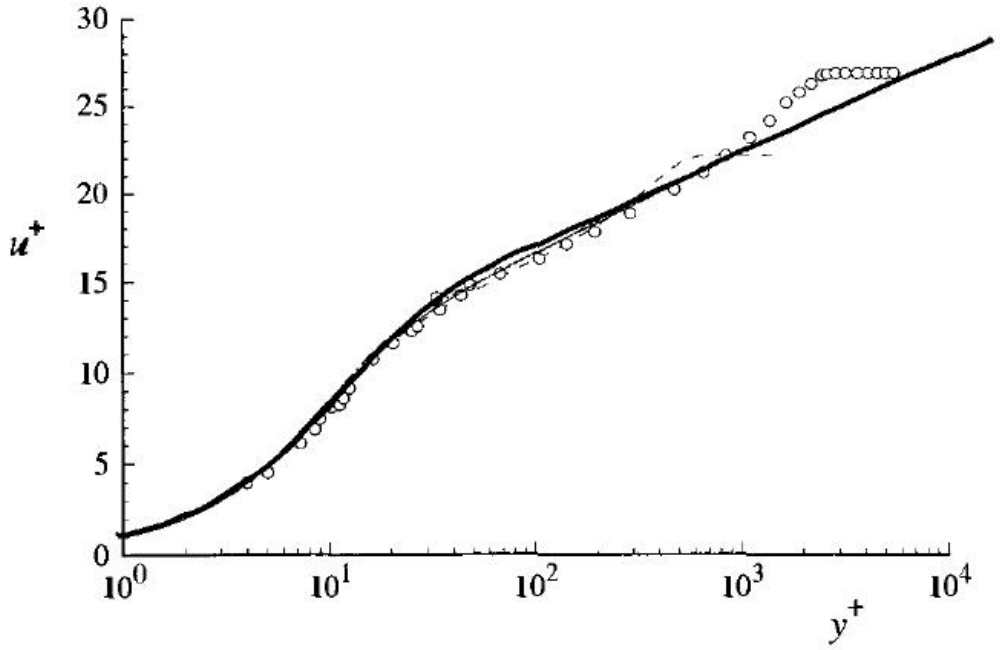
$$u^+=y^+\quad, \tag{33}$$

gdje je $u^+=\frac{\bar{u}}{u_\tau}$; $y^+=\rho u_\tau y/\mu$; $u_\tau=\sqrt{\tau_w/\rho}$.

Iznad viskoznog podsloja nalazi se prijelazni podsloj unutar kojega je utjecaj molekularne i turbulentne viskoznosti istog reda veličine, u kojem *Re* također ima niske vrijednosti za uobičajene modele turbulencije, a iznad prijelaznog podsloja dolazi inercijski podsloj u kojem dominira turbulentna viskoznost i u kojem vrijedi odabrani *k*-ε model. U inercijskom podsloju vrijedi logaritamski profil brzine:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} ln\, y^+ + B = \frac{1}{\kappa} ln\,(Ey^+)\,, \tag{34}$$

gdje je κ von Kármánova konstanta, a *B* odnosno *E* konstanta integracije. Vrijednosti ovih konstanti dobivenih mjerenjem u graničnom sloju uz ravnu ploču i mjerenjem u cijevima se neznatno razlikuju, a uz navedeni model turbulencije najčešće se koriste vrijednosti κ = 0,4187 i *E* = 9,739. Treba naglasiti da je izraz (34) dobiven uz pretpostavku zanemarivog uzdužnog gradijenta tlaka. Pri optjecanju jako zakrivljenih površina može se pojaviti značajni gradijent tlaka i tada bi izraz trebalo modificirati. Slika 7 prikazuje rezultate mjerenja bezdimenzijske brzine u^+ u funkciji bezdimenzijske udaljenosti od stijenke y^+ za izobraženo strujanje uz ravnu ploču pri različitim vrijednostima Reynoldsova broja. Područje inercijskog podsloja u kojem se mjerenja dobro poklapaju s logaritmičkim profilom brzine proteže se za Reynoldsove brojeve od $y^+ \approx 30$ do $y^+ \approx 1000$ [30].



Slika 7. Profil osrednjene brzine u graničnom sloju uz ravnu ploču

Slika 7 prikazuje rezultate eksperimenta prema Klebanoff [33] za *Re* = 8000, isprekidana crta predstavlja rezultate direktne numeričke simulacije (DNS) graničnog sloja prema Spalart [34] za *Re* = 1410, crta-točka linija predstavlja DNS strujanja u kanalu prema Kim i dr. [35] za *Re* = 13750, a puna crta predstavlja van Driestov zakon zida. Pri numeričkom proračunu turbulentnog strujanja u kojem će rubni uvjeti na čvrstoj stijenci biti zadani korištenjem zidne funkcije traži se da prvi čvor do stijenke bude u području $y^+ \approx 30$ do $y^+ \approx 300$.

Prema Launder i Spalding [36] u prvom čvoru do čvrste stijenke veličine strujanja računaju se slijedećim izrazima:

$$u^+ = \frac{\bar{u}_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{\tau_w/\rho}, \tag{35}$$

$$y^+ = \frac{\rho \bar{u}_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} y_p}{\mu}, \tag{36}$$

$$\tau_w = \frac{\rho \bar{u}_p C_\mu^{1/4} k_p^{1/2}}{u^+}, \tag{37}$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k_p^{3/2}}{\kappa y_p}, \tag{38}$$

$$G_k \approx \tau_w \frac{d\bar{u}_p}{y_p}, \tag{39}$$

gdje su s *p* označene veličine u prvom čvoru do čvrste stijenke.

U proučavanju atmosferskog graničnog sloja aerodinamička duljina hrapavosti z_o se koristi umjesto hidrodinamičke visine hrapavosti k_s koja je uobičajena kod opisivanja hrapavosti cjevovoda i strojarskih konstrukcija, dobivena je eksperimentalno temeljem proučavanja pješčane hrapavosti i predstavlja visine zrnaca pijeska na stijenci cijevi. Pošto su elementi hrapavosti kod proučavanja atmosferskog graničnog sloja zgrade, drveće i sl. čija je visina bolje izražena u metrima ili desecima metara, uvedena je za to prikladnija veličina, aerodinamička duljina hrapavosti z_0. Zidne funkcije opisane u 3.3 izvedene su za k_s i

programski paketi za simulacije nemaju mogućnost definiranja parametara u z_o što prema Blocken i dr. [37] dovodi do degradacije rezultata . Utjecaj je vidljiv na vertikalnim profilima veličina strujanja u 5.1.

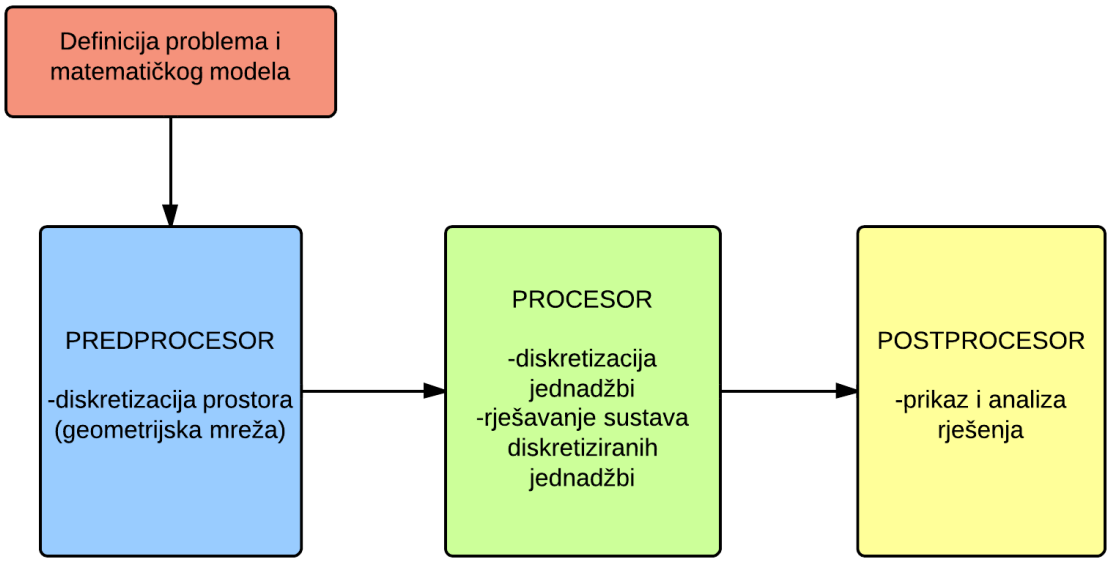
3.4. Postupak provođenja računalne simulacije

Postupak računalne simulacije uključuje nekoliko koraka:

a) predprocesor,

b) procesor,

c) postprocesor.



Slika 8. Postupak provođenja računalnih simulacija

a) Predprocesor

Uključuje definiranje geometrije promatrane domene proračuna. Sukladno izabranoj geometriji u koju su uključeni svi detalji objekta za koje se pretpostavlja da će imati značajni utjecaj na rezultate proračuna se izradi proračunska mreža. Mreža se sastoji od međusobnim granicama odvojenih, nepreklapajućih elemenata koji predstavljaju kontrolne volumene fluida. Veličinom i oblikom kontrolnih volumena uvelike određujemo točnost rješenja, stoga se posebna pažnja pridaje generiranju proračunske mreže. Predprocesor još uključuje i definiranje rubnih uvjeta domene proračuna.

b) Procesor

Procesor je namijenjen numeričkom rješavanju sustava diskretiziranih jednadžbi. Diskretizacija jednadžbi provodi se nekom od numeričkih shema. Rezultat diskretizacije parcijalne diferencijalne jednadžbe na zadanoj geometrijskoj mreži je sustav algebarskih jednadžbi. Sustav se rješava iterativno nekim od rješavača linearnih algebarskih jednadžbi.

c) Postprocesor

U postprocesoru se rezultati proračuna oblikuju u željeni grafički prikaz, što uključuje dijagrame, slike vektorskih polja ili iscrtavanje kontura strujnica, praćenje trajektorija čestica, generiranje 2D ili 3D prikaza rezultata, izračunavanje integralnih vrijednosti veličina na zadanim površinama, linijama i sl.

4. RAČUNALNI MODEL DISPERZIJE ŠTETNIH TVARI

U ovom poglavlju opisana je provedba računalnih simulacija za slučajeve disperzije plinova iz dimnjaka zgrade smještene u gradskom okruženju na koju nastrujava vjetar čiji parametri strujanja odgovaraju termički neutralno stratificiranom atmosferskom graničnom sloju. Za potrebe validacije rezultata računalnih simulacija prvi slučaj (4.1.) će simulirati eksperimente iz prirode i zračnog tunela prema. provedenim ispitivanjima disperzije plina sumporovog heksaflourida (SF_6) emitiranog iz dimnjaka zgrade ravnog krova, visine 12,5 m (Stathopoulos i dr. [6]). Na krovu stvarnih zgrada nalaze se, osim dimnjaka i drugi objekti koji mogu bitno utjecati na strukturu strujanja vjetra. Kako bi se taj utjecaj uzeo u obzir, određeni detalji na krovu su modelirani u punoj veličini.

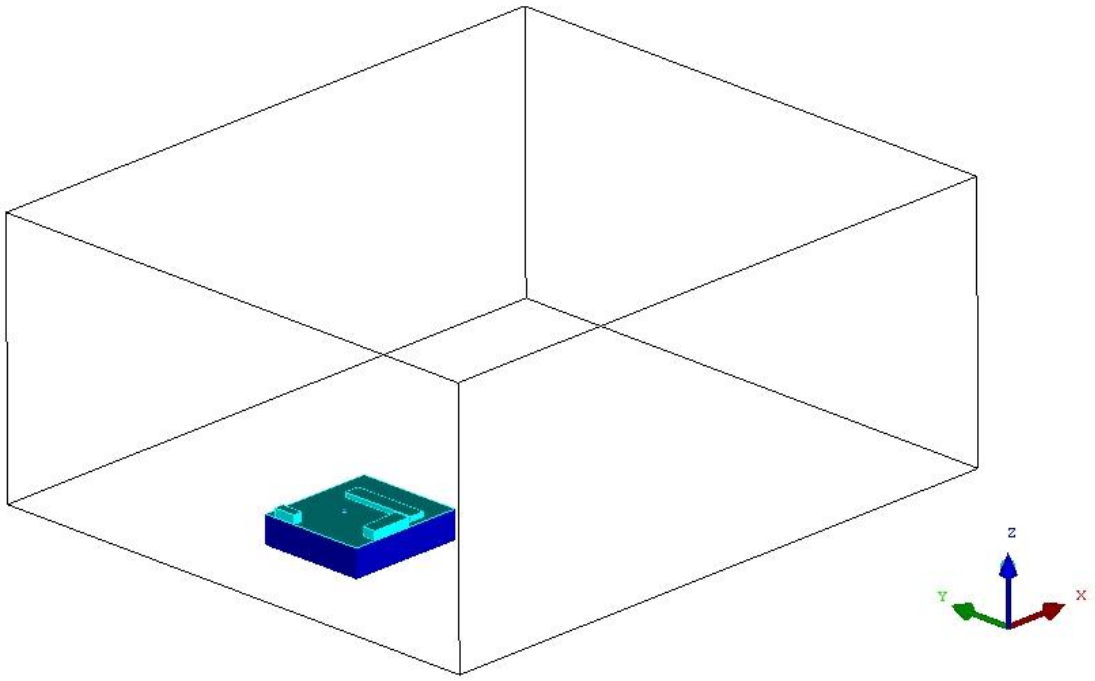
Budući da je slučaj odabrane zgrade svojim dimenzijama i parametrima čest i uobičajen za građevine različite namjene kakve se nalaze u gradskim područjima, a oblikom ne predstavlja jedinstvenu pojavu, može se uzeti kao generički i u nastavku ispitati kako bi određene promjene u neposrednoj blizini zgrade utjecale na raspodjelu koncentracija plinova te pokušati na temelju toga donijeti opće zaključke o širenju štetnih plinova u urbanim okruženjima.

4.1. Izolirana zgrada s dimnjakom na krovu

4.1.1. Računalna domena i geometrija zgrade

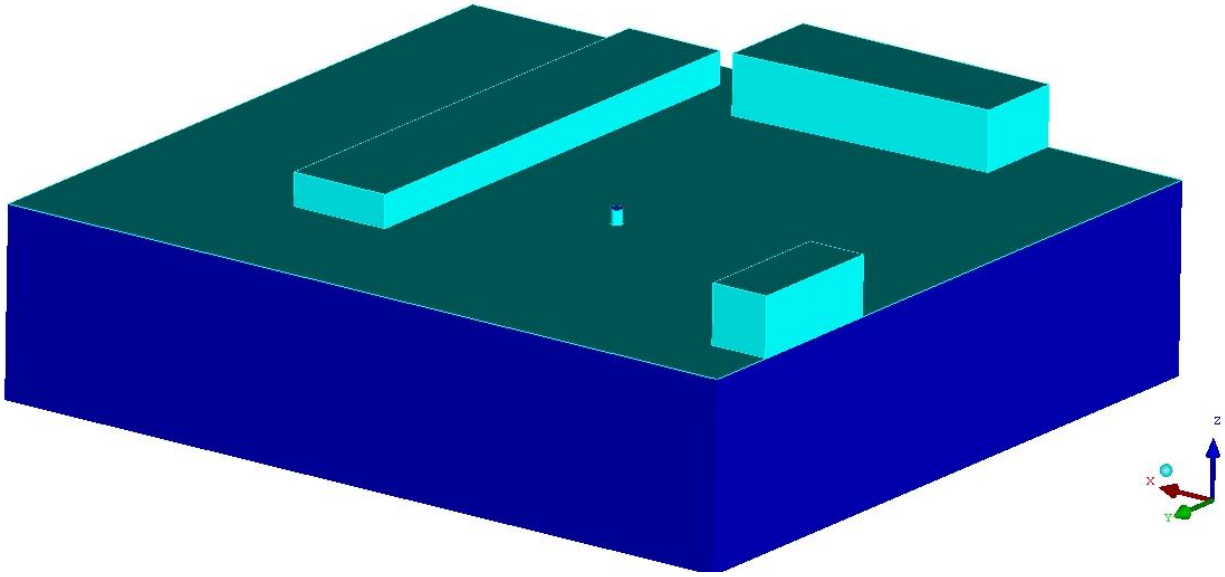
Odluka o dimenzijama računalne domene donesena je prema preporukama COST 732, Franke i dr. [38], a koje se odnose na dovoljno daleko postavljene granice računalne domene tako da su gradijenti strujanja na granicama vrlo mali i mogu se zanemariti. Na taj se način izbjegava da parametri bitni za strujanje oko zgrade ne ostaju izvan domene, već se zanemaruje samo neporemećeno strujanje dovoljno daleko od područja interesa. Kao referentna veličina uzima se visina zgrade *H* koja iznosi 12,5 m. Duljina zgrade (paralelno sa strujanjem) je 53 m, a širina (okomito na strujanje) je 48 m. Duljina domene u *x* smjeru iza zgrade iznosi 15,2 *H*, visina iznosi 9,6 *H*, a odmak od svake bočne stranice zgrade iznosi 7,52 *H*. Od ulaza u domenu do zida zgrade duljina je 3,2 *H* što je značajno manje nego što je preporučeno u COST 732. Razlog ovakvog odabira je u pokušaju ograničavanja degradacije ulaznih profila veličina strujanja. Prema Blocken i dr. [37] smanjenje puta koji fluid prolazi od ulaska u domenu do modela čija se aerodinamika promatra jedan je od načina ograničavanja neželjenih

promjena veličina strujanja zbog nekompatibilnosti zidnih funkcija uobičajeno korištenih u programskim paketima računalne dinamike fluida (3.3) s modelom atmosferskog graničnog sloja.



Slika 9. Računalna domena i geometrijski model ispitivane zgrade

Ukupne dimenzije domene su L_d x B_d x H_d = 280 x 240 x 120 m^3, gdje dimenzija L (duljina) odgovara osi x, dimenzija B (širina) osi y, a dimenzija H (visina) osi z.



Slika 10. Trodimenzijski model zgrade s dimnjakom na krovu

Iz slike se vidi da je zgrada modelirana tako da su krovne strukture većih dimenzija uključene u geometrijski model. Radi se o tri strukture čije su dimenzije dane tablicom.

	L[m]	*B*[m]	*H*[m]
I.	4	10	4
II.	18,4	5,2 – 7,2	4
III.	8	34,6	2,2

Tablica 2. Dimenzije krovnih struktura

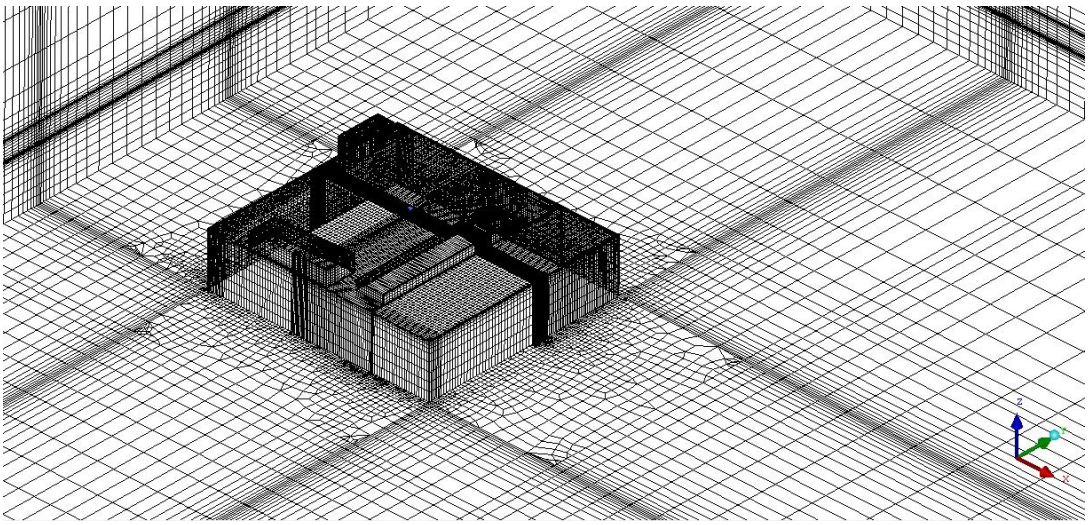
Dimenzija *L* (duljina) odgovara osi *x*, dimenzija *B* (širina) osi *y*, a dimenzija *H* (visina) osi *z*. Visina i promjer dimnjaka uzeti su prema [6] i iznose *H* = 1 m i *d* = 0,4 m.

Faktor zagušenja (engl. blockage) se računa sukladno izrazu:

$$B = \frac{A_{\text{objekta}}}{A_{\text{domene}}} \tag{40}$$

gdje je A_{objekta} nastrujna površina ispitivanog tijela oko kojeg fluid struji, a A_{domene} je površina domene na ulazu fluida u računalnu domenu. Za slučaj izolirane zgrade B iznosi 2%.

4.1.2. Geometrijska mreža



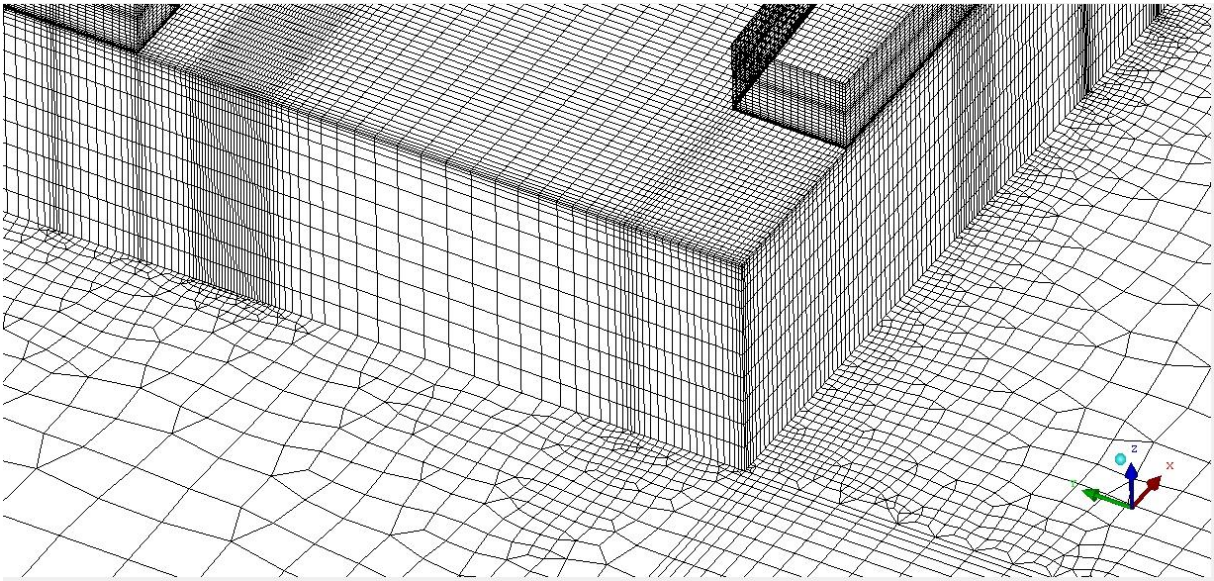
Slika 11. Geometrijska mreža za slučaj izolirane zgrade

Prostor računalne domene je diskretiziran na kontrolne volumene. Kako bi se postigla prihvatljiva konvergencija iterativnog postupka korištenjem shema diferencija drugog reda u izradi proračunske mreže korišteni su isključivo heksaedarski volumeni ili iznimno prizme, prema Chavez i dr. [19]. Niti jedan tetraedar ili piramidalni element nije prisutan u mreži. U blizini zidova, dimnjaka i općenito u neposrednoj blizini krova mreža je napravljena gušćom jer se na tom području očekuju veći gradijenti, a i kako bi se točnost zadovoljila upravo na prostoru od interesa, u blizini izvora emisije. Najvećim dijelom domene proteže se strukturirana mreža, čiji su elementi pravokutnog presjeka (engl. mapped), dok je u zoni oko dimnjaka korištena nestrukturirana mreža (engl. free) kako bi se premostio prijelaz između okruglog presjeka dimnjaka i ostatka pravokutne mreže. Na donjoj površini koja predstavlja tlo također je korištena nestrukturirana mreža, u ovom slučaju kako bi se spriječila propagacija izrazito guste mreže sa zgrade po cijeloj domeni. Na taj način se izbjegava nepotrebno progušćenje u području daleko od zgrade i štedi na računalnom vremenu jer se umanjuje ukupni broj kontrolnih volumena.

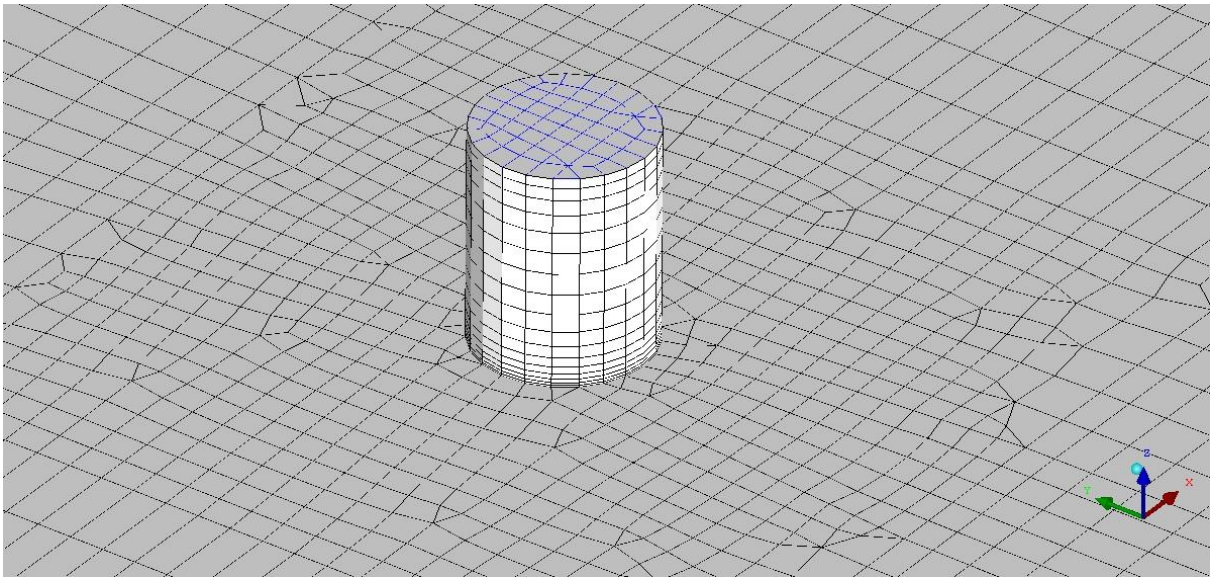
Strujanje uz čvrste stijenke modelirano je takozvanim zidnim funkcijama (3.3) koje zahtijevaju bezdimenzijsku visinu prvog čvora mreže y^+ između 30 i 1000. U području površine krova taj je uvjet zadovoljen, dok je visina prvog reda volumena na površini tla napravljena izrazito visokom (1-2 m) kao dio jedne od mjera suzbijanja neželjenih gradijenata koji narušavaju ulazne profile veličina. Ova mjera predložena je u Blocken i dr [37]. Kad su

visine elemenata na tlu zadane ovako visokima, omogućeno je podešavanje podne hrapavosti na vrijednosti bliže potrebnima za održavanje ulaznih profila. Više detalja dano je kod opisa rubnih uvjeta u 4.1.3.

Testirane su tri mreže, s 2 608 352 volumena, s 1 035 893 volumena i treća s 654 498 volumena. Odabrana je srednje gusta mreža s 1 035 893 volumena.



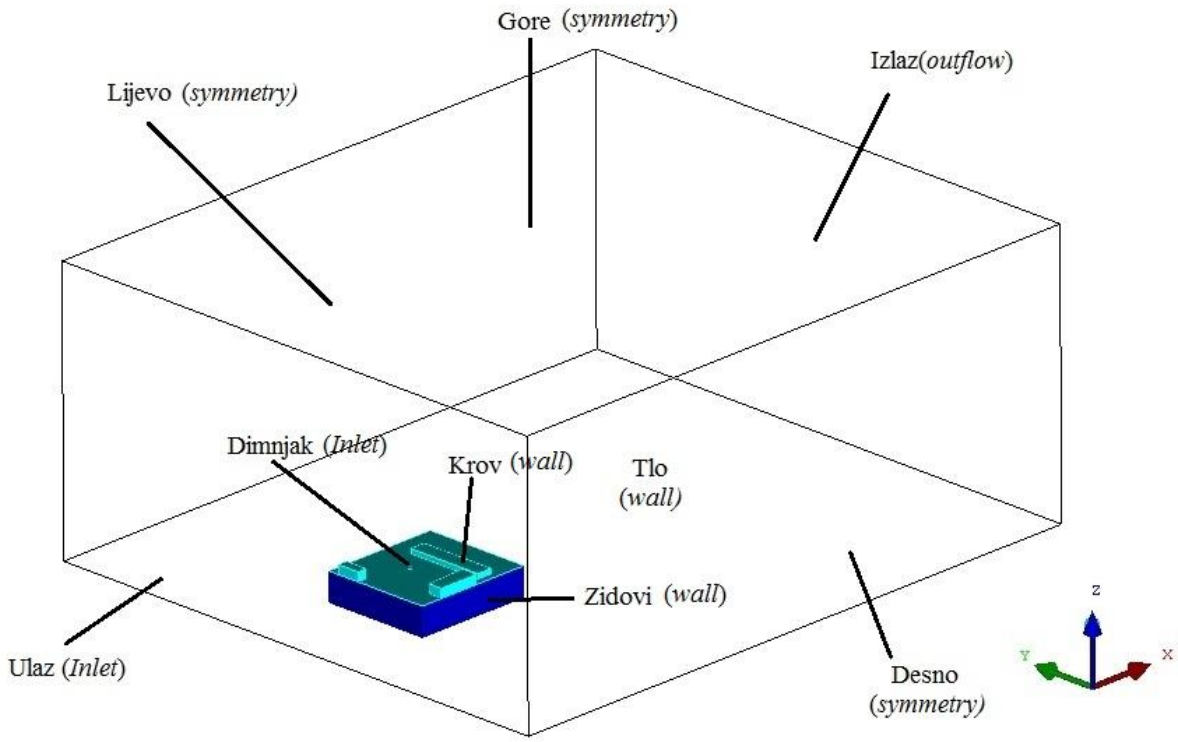
Slika 12. Detalji geometrijske mreže na zgradi i na površini podloge



Slika 13. Detalji geometrijske mreže oko dimnjaka

4.1.3. Rubni uvjeti

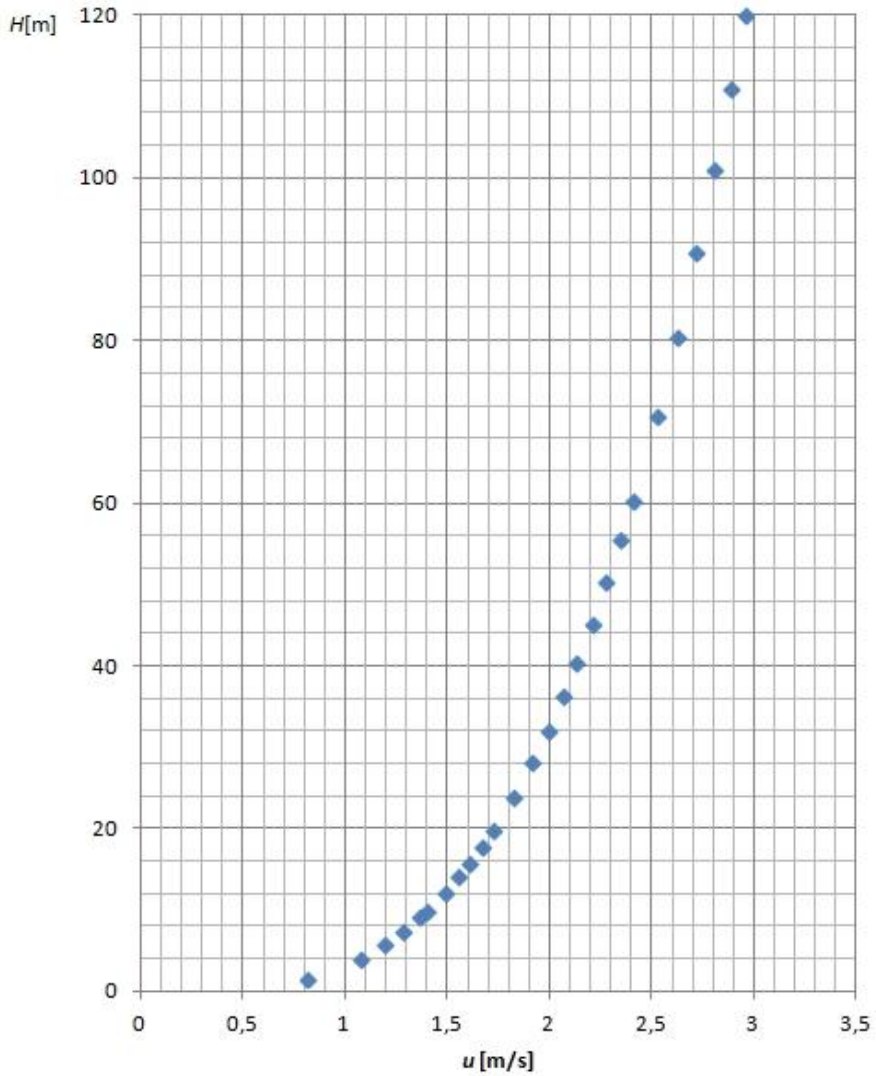
Na granicama domene, označenima na slici 14 zadani su sljedeći rubni uvjeti:



Slika 14. Rubni uvjeti na granicama domene

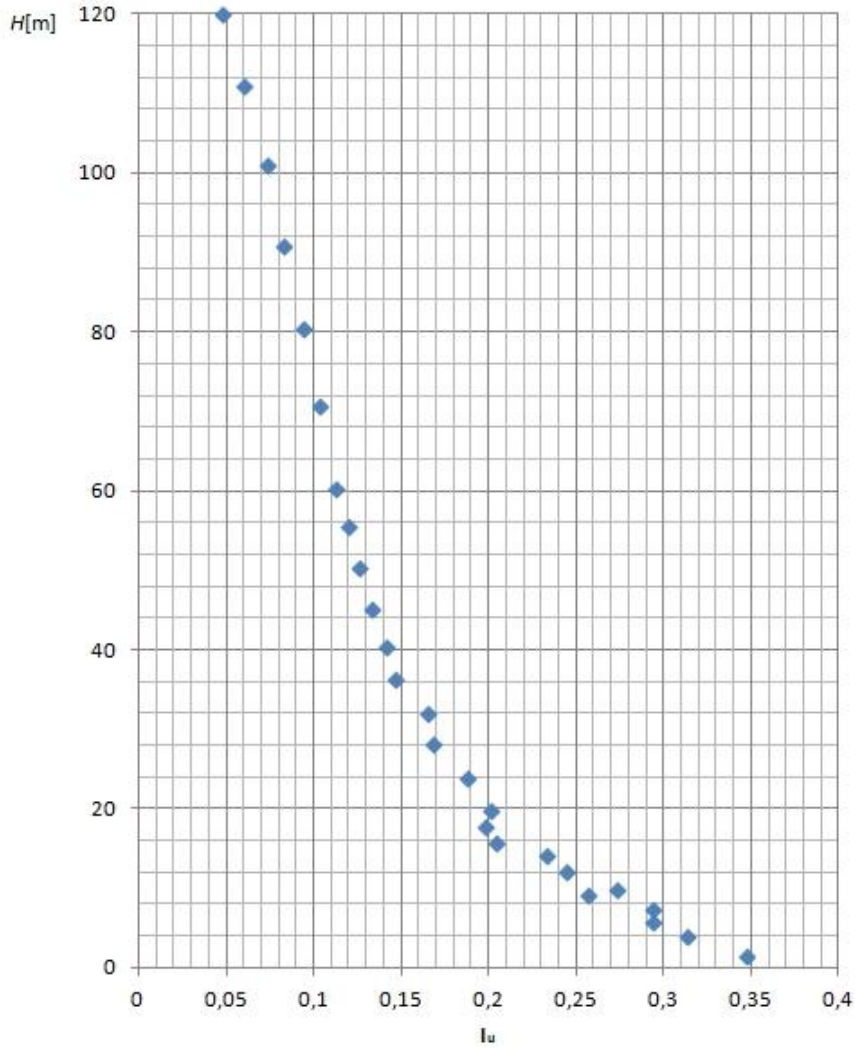
a) Ulaz

Granični uvjet na ulasku fluida u domenu proračuna predstavlja neporemećenu struju zraka koja odgovara karakteristikama strujanja u atmosferskom graničnom sloju. Prema eksperimentalnim podacima iz Stathopoulos i dr. [6] profil osrednjene brzine određen je zakonom potencije, prema tipu terena koji odgovara urbanim područjima. Eksponent α = 0,3, aerodinamička duljina hrapavosti z_o = 0,66 m, brzina vjetra na referentnoj visini H = 12,5 m je u_{ref} = 1,5 m/s. Slika 15 pokazuje profil brzine na ulazu u domenu.



Slika 15. Profil osrednjene vrijednosti brzine *u*

Profil kinetičke energije turbulencije na ulazu u domenu određen je iz mjernih podataka za intenzitet turbulencije I_u dobivenih ispitivanjima u zračnom tunelu i prikazanih na slici 16.



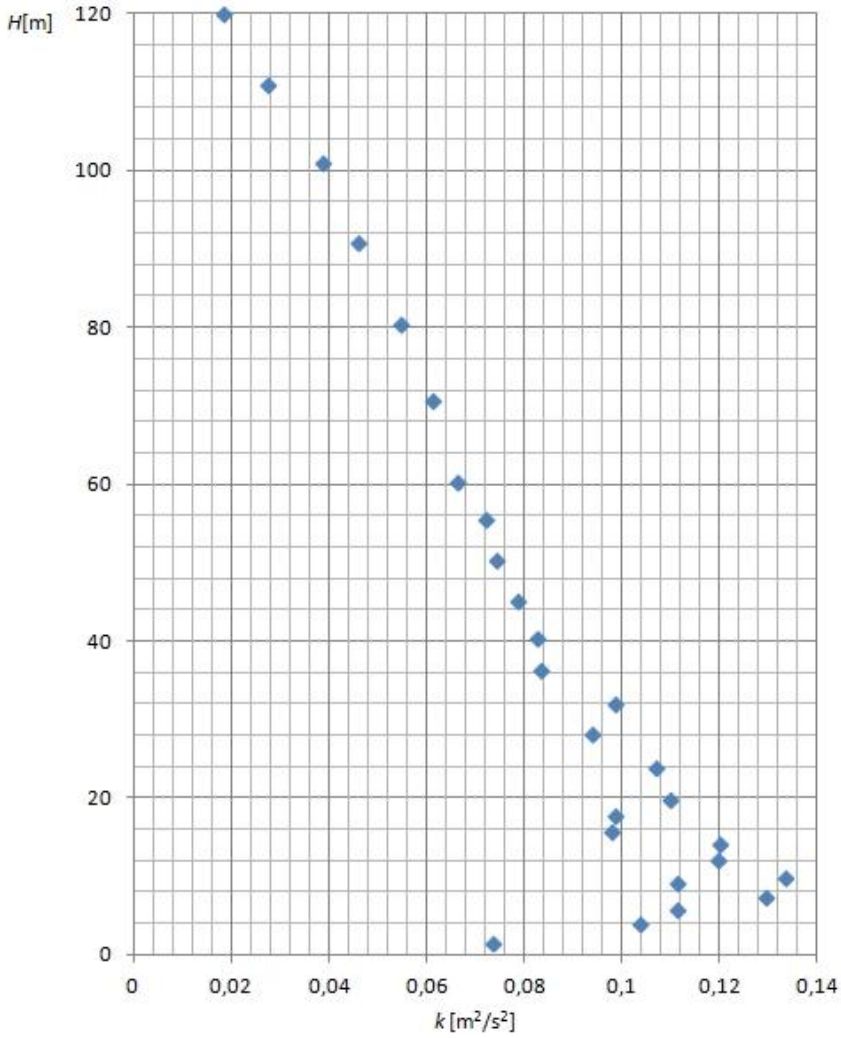
Slika 16. Profil intenziteta turbulencije I_u

Izračunavanje kinetičke energije turbulencije provedeno je prema Ramponi i Blocken [39] korištenjem izraza iz 2.2 b). Rezultat je prikazan na slici 17.

Profil disipacije kinetičke energije turbulencije izračunat je prema Richards i Hoxey [40] izrazom:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\boldsymbol{u_\tau^3}}{\boldsymbol{\kappa z}} \tag{41}$$

gdje je u_τ brzina trenja i računa se izrazom $u_\tau = \frac{\kappa U(\delta)}{ln\left(\frac{\delta}{z_0}\right)}$, κ je von Kármánova konstanta i iznosi 0,42, a *z* je visina u metrima. Iznos brzine trenja u ovom slučaju je u_τ = 0,2 m/s.



Slika 17. Profil kinetičke energije turbulencije *k*

b) Tlo

Donja površina domene koja predstavlja tlo je modelirana kao čvrsta hrapava podloga (engl. wall) vrijednost čije aerodinamičke duljine hrapavosti bi trebala odgovarati vrijednosti z_o = 0,66 m. Međutim većina komercijalnih programskih paketa za računalnu dinamiku fluida ne omogućava zadavanje vrijednosti aerodinamičke duljine hrapavosti, već se hrapavost krutih površina zadaje kao k_s visina pješčane hrapavosti. Stoga Blocken [37] predlaže izraz koji povezuje ove dvije veličine:

$$k_s = \frac{9{,}783 z_o}{C_s} \tag{42}$$

C_s je konstanta u korištenom računalnom paketu koju se može podešavati u rasponu 0-1, međutim vrijednost k_s softverski je ograničena na polovicu visine prvog volumena proračunske mreže što znači da bi za modeliranje željene vrijednosti z_o = 0,66 m k_s trebala biti neizvedivo velika. Zbog ove nemogućnosti zadavanja parametara atmosferskog graničnog sloja prema teoriji atmosferskog graničnog sloja prikazanoj u 2.1 i provedbe računalne simulacije prema tim parametrima profili veličina strujanja zadani na ulazu neće ostati nepromijenjeni prolaskom kroz računalnu domenu. Pojava nefizikalnih promjena veličina strujanja generira određeno odstupanje u usporedbi s rezultatima ispitivanja u zračnim tunelima.

c) Zidovi i krov

Modelirani su kao čvrsta glatka (k_s =0) stijenka (engl. wall) što znači uvjet lijepljenja fluida na površinu (engl. no-slip wall), odnosno osrednjene brzine strujanja jednake su nuli.

d) Otvor dimnjaka

Otvor dimnjaka (d = 0,4 m) je površina kroz koju u domenu ulazi određena količina mješavine zraka i plinova emisije. Plin koji je korišten prilikom ispitivanja u prirodi, a također i prilikom ispitivanja u zračnom tunelu prema Stathopoulos i dr. [6] SF_6. Ovaj plin se koristi iz razloga što je koncentracije SF_6 lako izmjeriti, čak i ako su vrlo niske. U računalnoj simulaciji korišten je isti plin, molarni udio u mješavini na izlazu iz dinjaka je podešen na 10 ppm.

Količina emitirane mješavine izražava se u bezdimenzijskoj veličini M (engl. momentum ratio) koja predstavlja omjer vertikalne komponente brzine istjecanja iz dimnjaka i horizontalne brzine vjetra na visini dimnjaka.

$$M = \frac{W_e}{U_d} \tag{43}$$

e) Bočne stranice i vrh računalne domene

Granični uvjet na bočnim stranicama i vrhu domene postavljen je tako da su svi normalni gradijenti i normalna brzina jednaki nuli, što znači da kroz te stranice nema nikakvog protoka fizikalnih veličina.

4.1.4. Odabir modela turbulencije i parametara simulacije

Temeljem pregleda dostupne literature vezane uz modele turbulencije, za potrebe ovog rada odabran je Realisable k-ε model opisan u 3.2.2. Presudan parametar kod simulacija transporta tvari u turbulentnom strujanju kod RANS modela je turbulentni Schmitov broj. Korišteni algoritam za povezivanje polja tlaka i brzine je SIMPLE. Sheme drugog reda točnosti korištene su za sve varijable. Konvergencija iterativnog proračuna je postignuta kad reziduali količine gibanja u x,y i z smjeru te k, ε i koncentracije SF_6 dosegnu 10^{-6}, a rezidual jednadžbe kontinuiteta iznosi 10^{-4}.

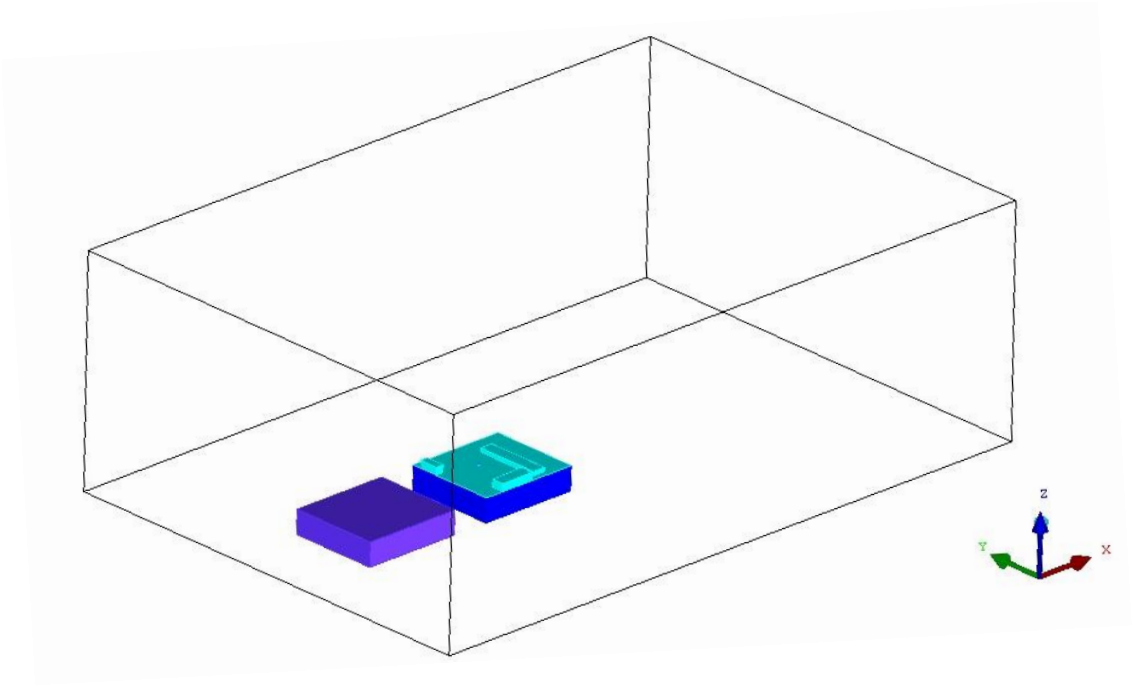
4.2. Susjedna zgrada postavljena ispred zgrade s dimnjakom na krovu

U gradskim područjima zgrade obično stoje vrlo blizu jedna drugoj, na udaljenosti manjoj ili jednakoj njihovoj visini. Uključivanjem još jedne građevine u simulaciju pokušava se obuhvatiti dio kompleksnosti utjecaja okoline na disperzije pojedinog izvora emisija. U 4.2. modeliran je slučaj identične grade iz 4.1. s tim da joj je pritom dodana susjedna zgrada, postavljena uzvodno s obzirom na smjer strujanja vjetra. Promatrane su dvije varijante ovakvog razmještaja, u prvom slučaju susjedna zgrada je jednake visine (H), a u drugom dvostruko viša ($2H$) od zgrade s dimnjakom.

4.2.1. Računalna domena

S obzirom da je u odnosu na slučaj 4.1. nova građevina dodana između ulaza u domenu i zgrade s dimnjakom, domena je u uzdužnom smjeru odgovarajuće produljena. Duljina i širina dodane zgrade je zbog jednostavnosti ista kao i kod zgrade s dimnjakom, odnosno 53 i 48 m. Razmak između dviju zgrada je 20 m. Od ulaza u domenu do zida uzvodne zgrade duljina je $3{,}2H$. Simulirane su dvije varijante uzvodne zgrade, jedna visine H ili 12,5 m i druga dvostruko viša $2H$ ili 25 m. Dimenzije krova i dimnjaka su opisane u 4.1.1.

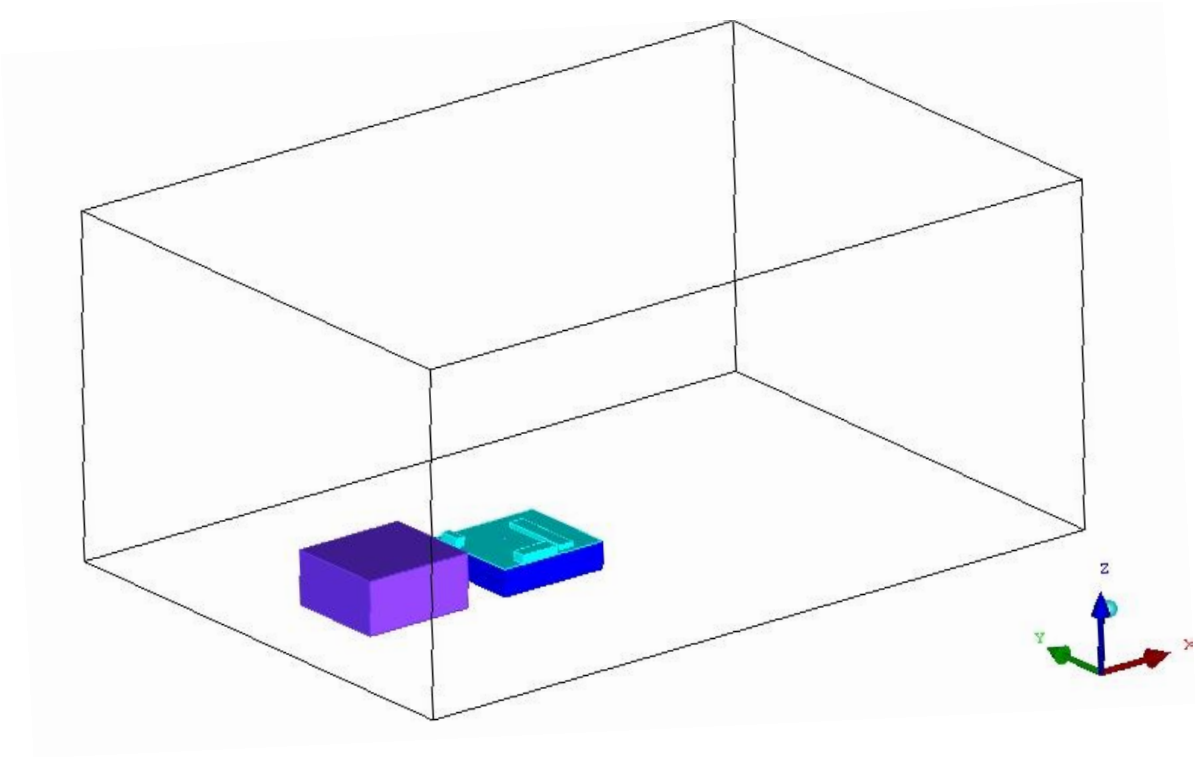
a) Susjedna zgrada visine H



Slika 18. Računalna domena i geometrijski model za slučaj uzvodne zgrade visine *H*

Visina domene iznosi 9,6*H* kao i u 4.1. Ukupne dimenzije domene su *L* x *B* x *H* = 353 x 240 x 120 m^3, gdje dimenzija *L* (duljina) odgovara osi *x*, dimenzija *B* (širina) osi *y*, a dimenzija *H* (visina) osi *z*. Faktor zagušenja (engl. blockage) je 2%.

b) Susjedna zgrada visine 2H

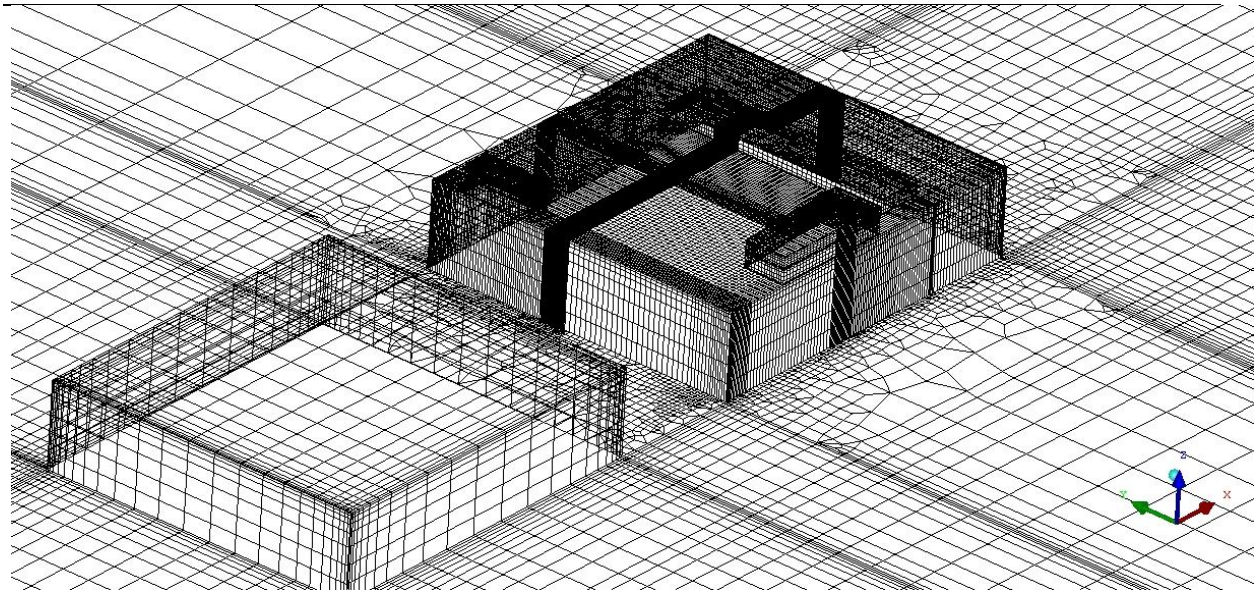


Slika 19. Računalna domena i geometrijski model za slučaj uzvodne zgrade visine 2*H*

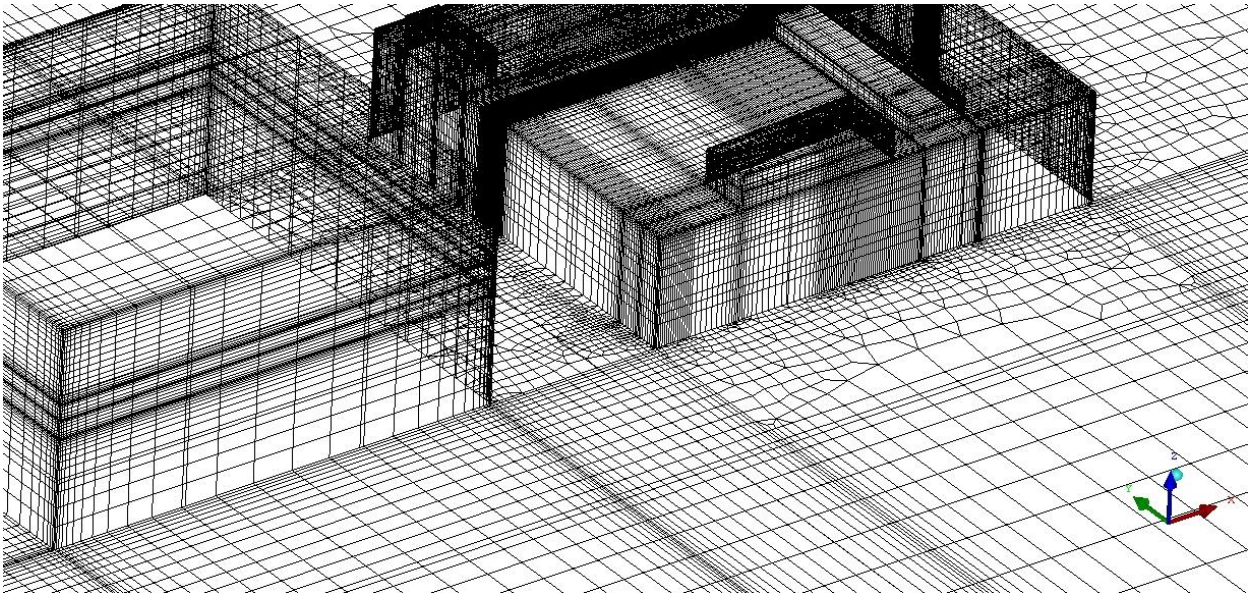
Visina domene je povećana sukladno dodavanju više zgrade u računalnu domenu te ona sada iznosi 12,8*H*. Ukupne dimenzije domene su *L* x *B* x *H* = 353 x 240 x 160 m^3, gdje dimenzija *L* (duljina) odgovara osi *x*, dimenzija *B* (širina) osi *y*, a dimenzija *H* (visina) osi *z*. Faktor zagušenja (engl. blockage) je 3%.

4.2.2. Geometrijska mreža

Mreža je izrađena na način opisan u 4.1.2. S obzirom da je dodana još jedna građevina, oko njenih se rubova vodilo računa o adekvatnom progušćenju geometrijske mreže. Za slučaj a) odabrana mreža se sastoji od 1 457 250 elemenata a za slučaj b) broj elemenata je 2 018 198.



Slika 20. Geometrijska mreža, slučaj uzvodne zgrade visine *H*



Slika 21. Geometrijska mreža, slučaj uzvodne zgrade visine 2*H*

4.2.3. Rubni uvjeti, parametri simulacije

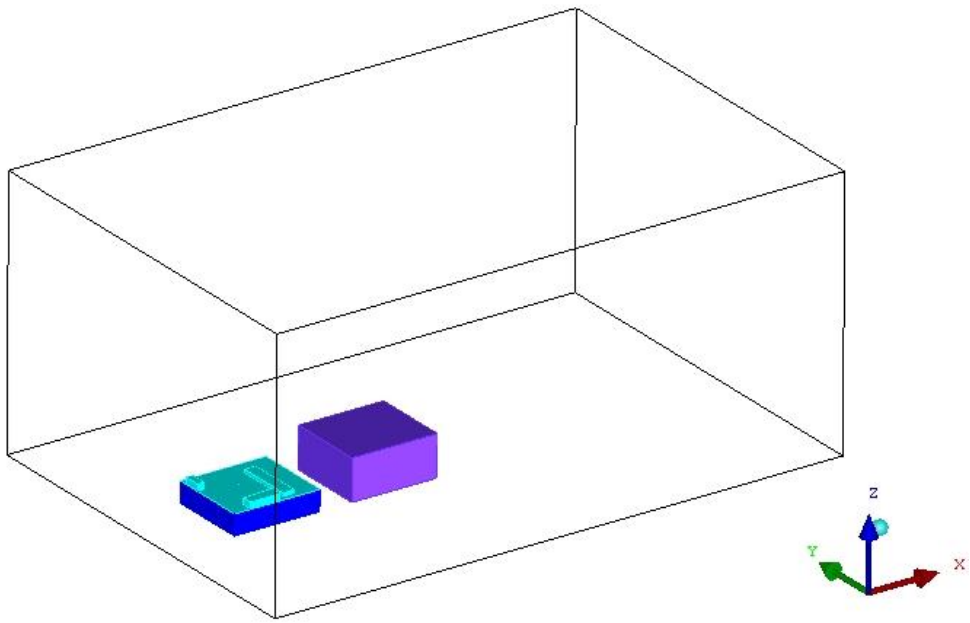
Rubni uvjeti te parametri proračuna identični su kao što je opisano u 4.1.3 - 4.4. Kod definiranja graničnih uvjeta uzeto je u obzir povišenje domene za slučaj b). Zidovi obje zgrade su modelirani kao čvrsta glatka stijenka.

4.3. Susjedna zgrada postavljena iza zgrade s dimnjakom na krovu

U ovom slučaju susjedna se građevina postavlja niz vjetar od zgrade s dimnjakom. Pokušava se ocijeniti ima li ova konfiguracija utjecaja na disperziju oko krova zgrade na kojoj je dimnjak, kao i koliki je utjecaj disperzije na nizvodnu zgradu, za koji se očekuje da će biti značajan.

4.3.1. Domena proračuna

Građevina dvostruko veće visine 2*H* postavljena je iza zgrade s dimnjakom, njezina duljina i širina su zbog jednostavnosti ista kao i kod zgrade s dimnjakom, odnosno 53 m i 48 m, dok joj je visina 25 m. Razmak između dviju zgrada je 20 m. Od ulaza u domenu do zida uzvodne zgrade duljina je 3,2 *H*.

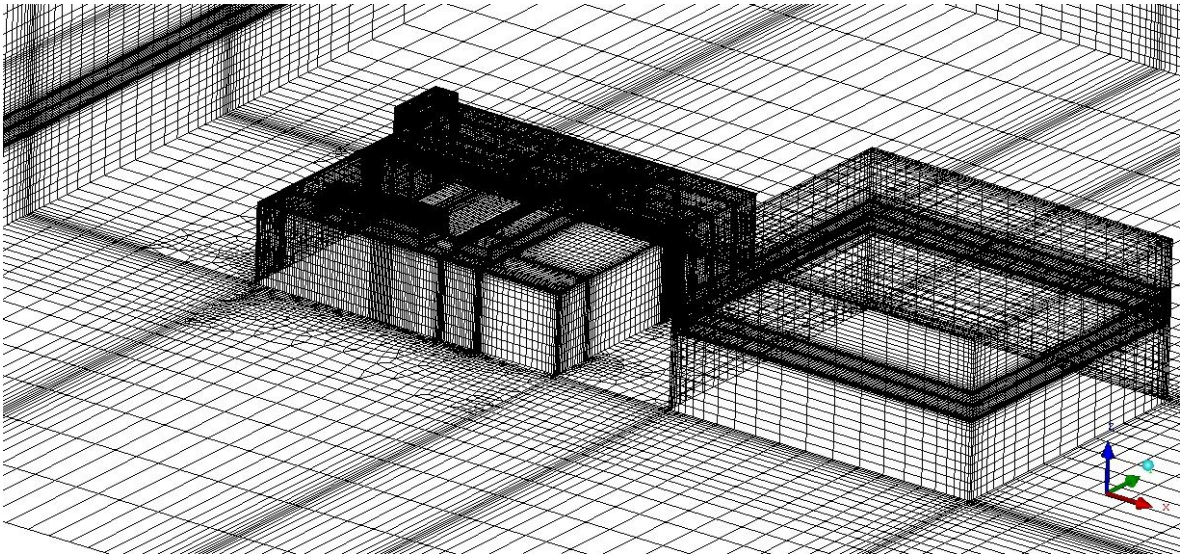


Slika 22. Računalna domena i geometrijski model za slučaj susjedne zgrade postavljene niz vjetar

Visina domene iznosi 12,8 *H*. Ukupne dimenzije domene su *L* x *B* x *H* = 353 x 240 x 160 m^3, gdje dimenzija *L* (duljina) odgovara osi *x*, dimenzija *B* (širina) osi *y*, a dimenzija *H*(visina) osi z. Faktor zagušenja (engl. blockage) je 3%.

4.3.2. *Geometrijska mreža*

Mreža je izrađena na način opisan u 4.1.2. S obzirom da je dodana još jedna građevina, oko njenih se rubova vodilo računa o adekvatnom progušćenju geometrijske mreže. Broj konačnih volumena je 1 578 715.



Slika 23. Mreža za slučaj susjedne zgrade postavljene nizvodno

4.3.3. *Rubni uvjeti, parametri simulacije*

Rubni uvjeti te parametri proračuna identični su kao što je opisano u 4.1.3 - 4.4 pa se ovdje neće ponavljati. Zidovi susjedne zgrade su modelirani kao čvrsta glatka stijenka.

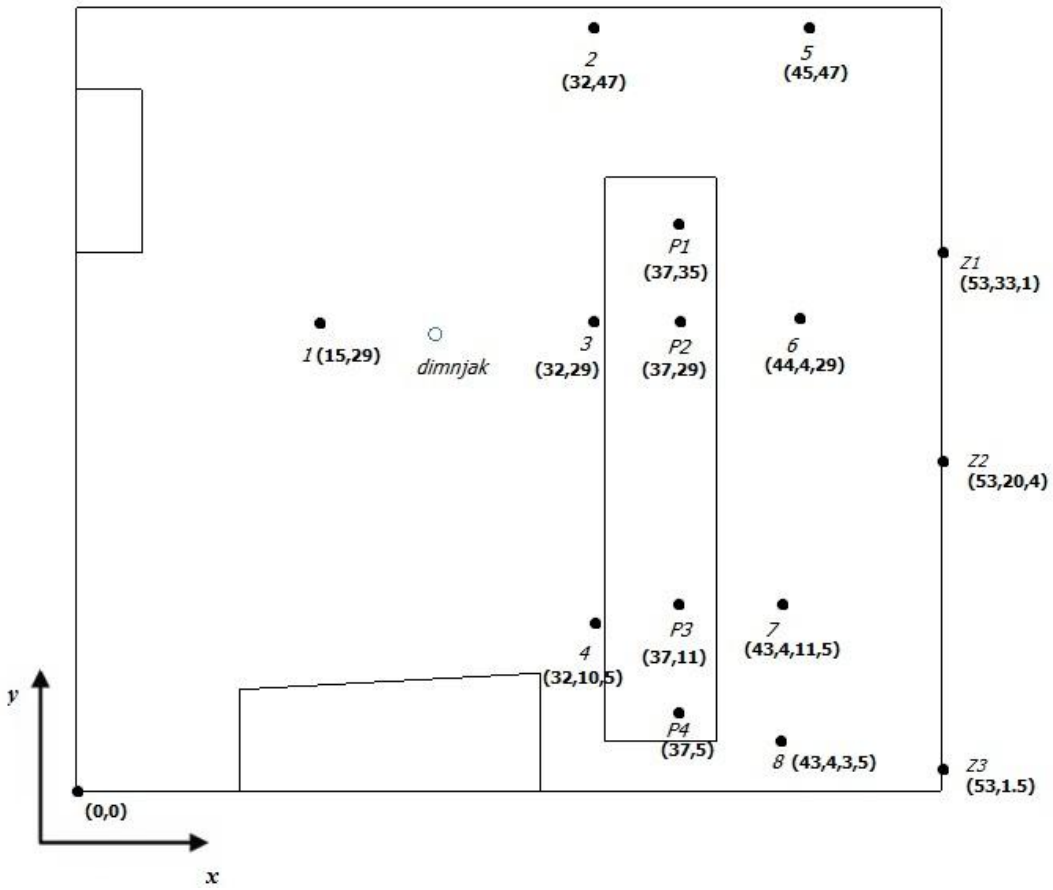
4.4. Definicija bezdimenzijske koncentracije plinova i mjernih točaka

Koncentracije su izražene u bezdimenzijskoj veličini *K* koja se računa prema izrazu:

$$K_i = \frac{w_i L^2 u_{ref}}{A_d v_d w_{id}} \tag{44}$$

gdje je w_i maseni udio plina *i*, *L* karakteristična duljina, u ovom slučaju to će biti visina zgrade H_b , u_ref brzina vjetra na referentnoj visini, A_d površina dimnjaka, v_d brzina toka emisija na izlazu iz dimnjaka, w_{id} maseni udio plina *i*.

Koncentracija je mjerena na krovu zgrade s dimnjakom i na zidu u zavjetrini u 16 točaka koje su prikazane na slici 24. U zagradama su prikazane koordinate (*x*,*y*) prema koordinatnom sustavu definiranom u donjem lijevom kutu površine, tri mjerne točke Z1, Z2 i Z3 nalaze se na stražnjem zidu zgrade na visini 10,2 m.

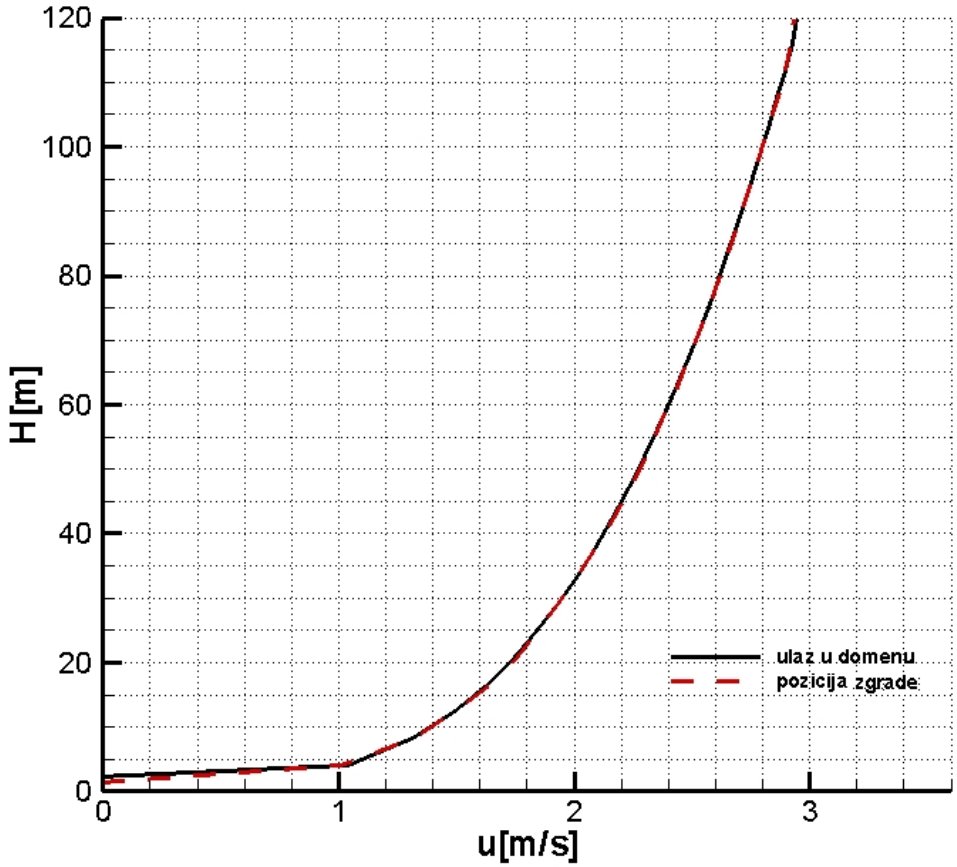


Slika 24. Mjerne lokacije na krovu i stražnjem zidu

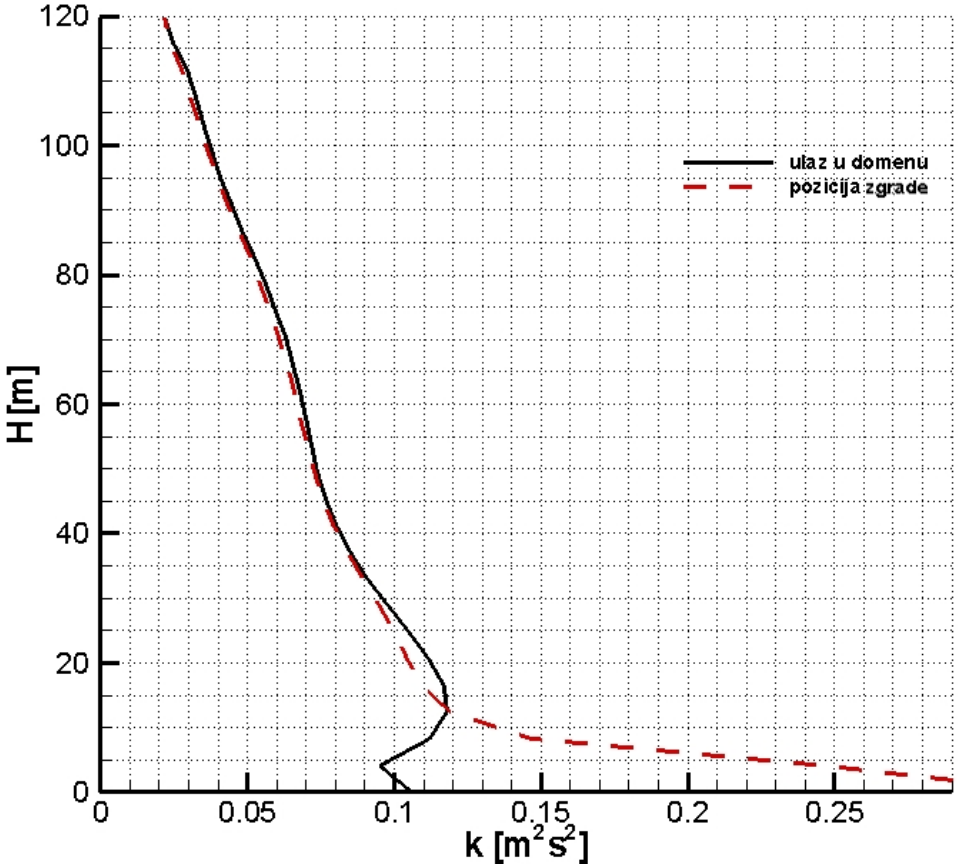
5. REZULTATI I ANALIZA RAČUNALNIH SIMULACIJA

5.1. Vertikalni profili bitnih parametara strujanja

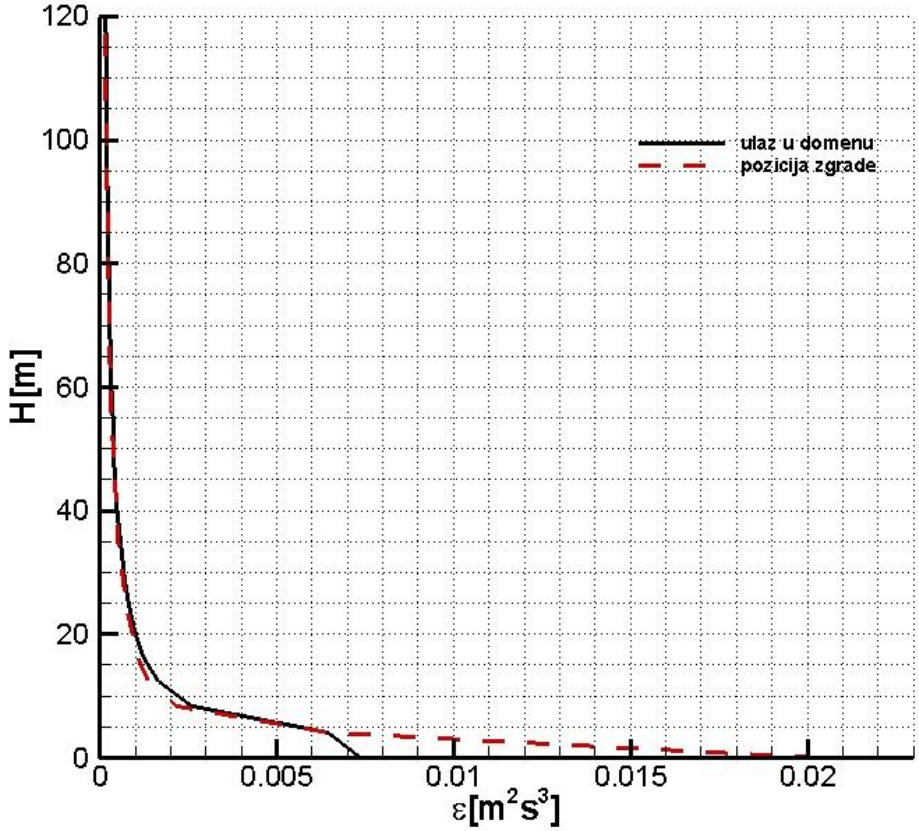
Prije provedbe simulacija na željenom modelu zgrade provodi se simulacija s istim graničnim uvjetima, ali na praznoj domeni, kako bi se ocijenilo u kojoj mjeri se profili zadani na ulazu mijenjaju prolaskom kroz domenu. Slike 25 - 27 daju prikaz profila po visini za odabrane tri karakteristične veličine: osrednjenu brzinu strujanja vjetra, kinetičku energiju turbulencije i disipaciju kinetičke energije turbulencije. Prikazani su na istom dijagramu profil na ulazu i profil na mjestu gdje se nalazi zgrada. Do promjena od ulaza do pozicije zgrade dolazi zbog utjecaja hrapavosti i neusklađenosti modela s rubnim uvjetima atmosferskog graničnog sloja kako je opisano u 4.1.3.



Slika 25. Profil osrednjene brzine *u* na ulazu i na poziciji zgrade



Slika 26. Profil kinetičke energije turbulencije *k* na ulazu i na poziciji zgrade



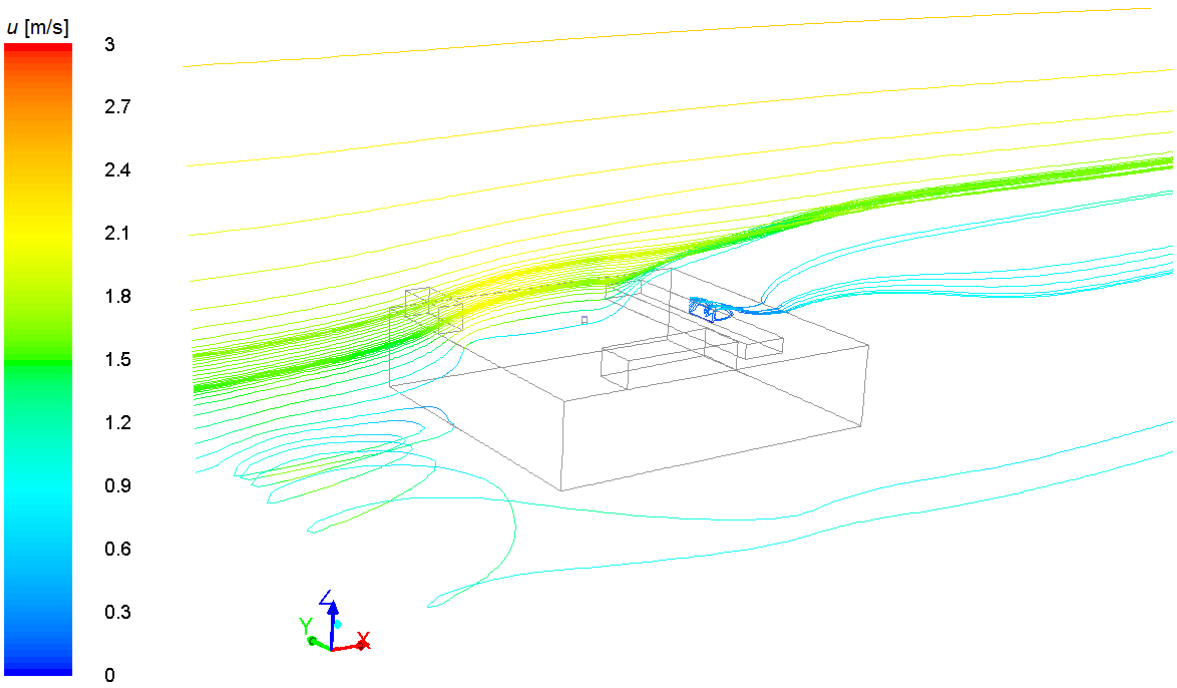
Slika 27. Profil disipacije kinetičke energije turbulencije *ε* na ulazu i na poziciji zgrade

Rezultati pokazuju da se profil osrednjene brzine mijenja vrlo malo od ulaza do pozicije zgrade. Kinetička energija turbulencije, kako je bilo i očekivano pokazuje izrazit porast blizu tla i naročito je sklona deformaciji. Disipacija kinetičke energije turbulencije također pokazuje porast u blizini čvrste stijenke zbog utjecaja hrapavosti, ali dalje od podloge ne pokazuje bitne promjene u odnosu na ulazi profil.

5.2. Izolirana zgrada s dimnjakom na krovu

5.2.1. Karakteristike strujanja

Struktura strujanja vjetra određena je aerodinamikom objekta oko kojeg fluid struji. U slučaju tupog tijela kao što je zgrada karakteristična je pojava vrtloga ispred nastrujnog zida zgrade (Slika 28), na naletnom bridu krova, te na stražnjoj stijenci objekta gledajući u glavnom smjeru strujanja. Vrtlozi nastaju i na stražnjim stranama krovnih konstrukcija, što će također utjecati na rezultate disperzije.

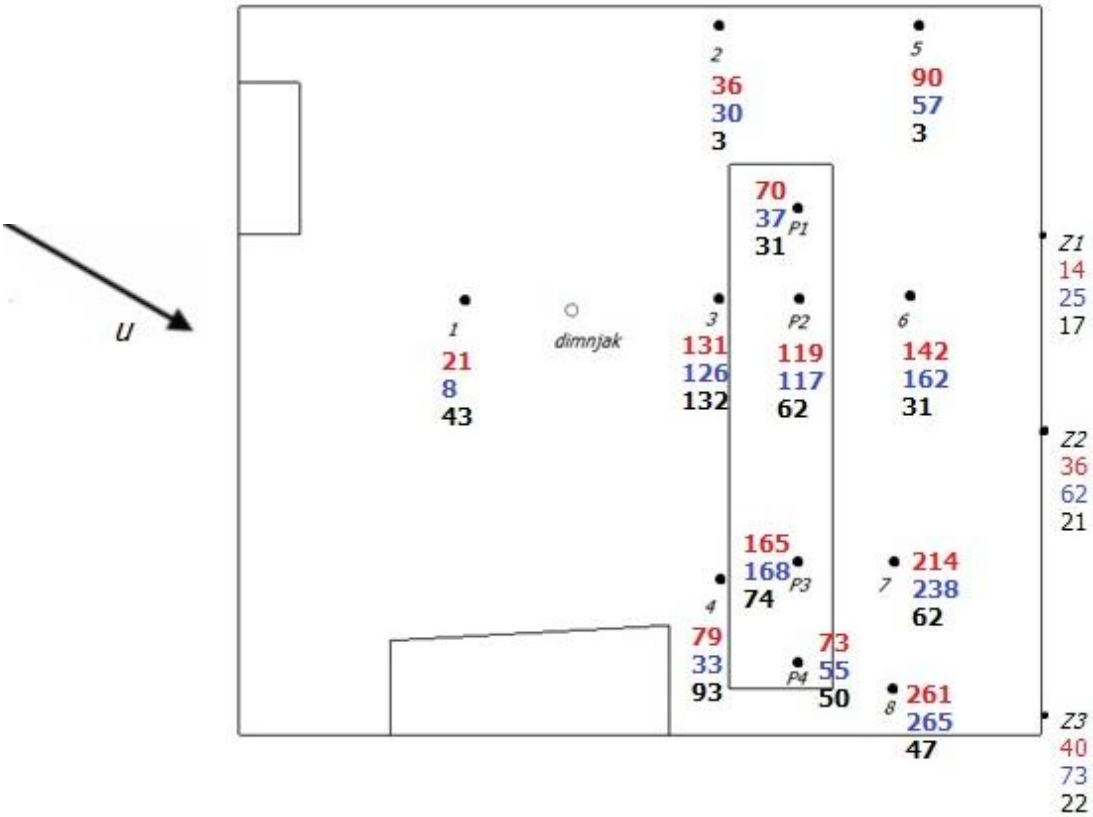


Slika 28. Trajektorije čestica nošenih strujanjem vjetra oko izolirane zgrade

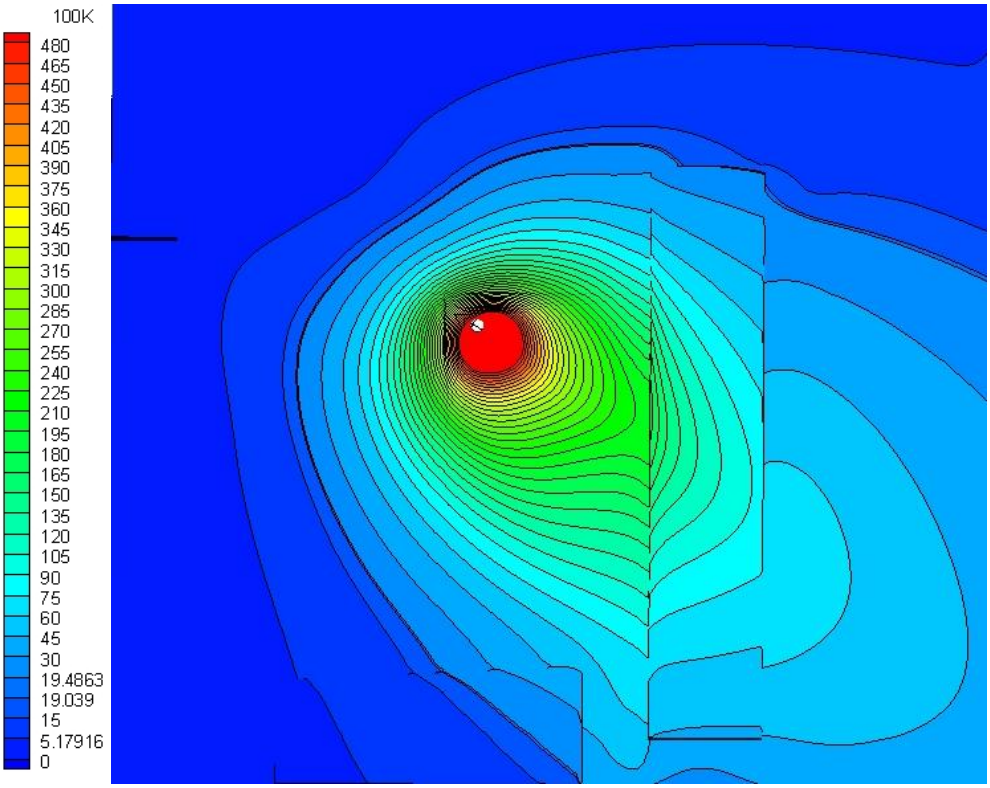
5.2.2. Polja koncentracije emisije u okolišu zgrade

Rezultati su izraženi u obliku bezdimnezijske koncentracije K definirane u 4.4. Usporedba s izmjerenim podacima iz Stathopoulos i dr. [6] napravljena je za slučaj strujanja vjetra pod napadnim kutom od 30° i pri M = 10,7.

Na slici 29 usporedno su prikazani rezultati numeričke simulacije (crno), rezultati eksperimenata u zračnom tunelu (plavo) i mjerenja u prirodi (crveno). Mjerne lokacije na slici 29 prethodno su specificirane na slici 24.



Slika 29. Usporedba rezultata mjerenja i numeričkog proračuna bezdimenzijske koncentracije za strujanje pod napadnim kutom od 30°



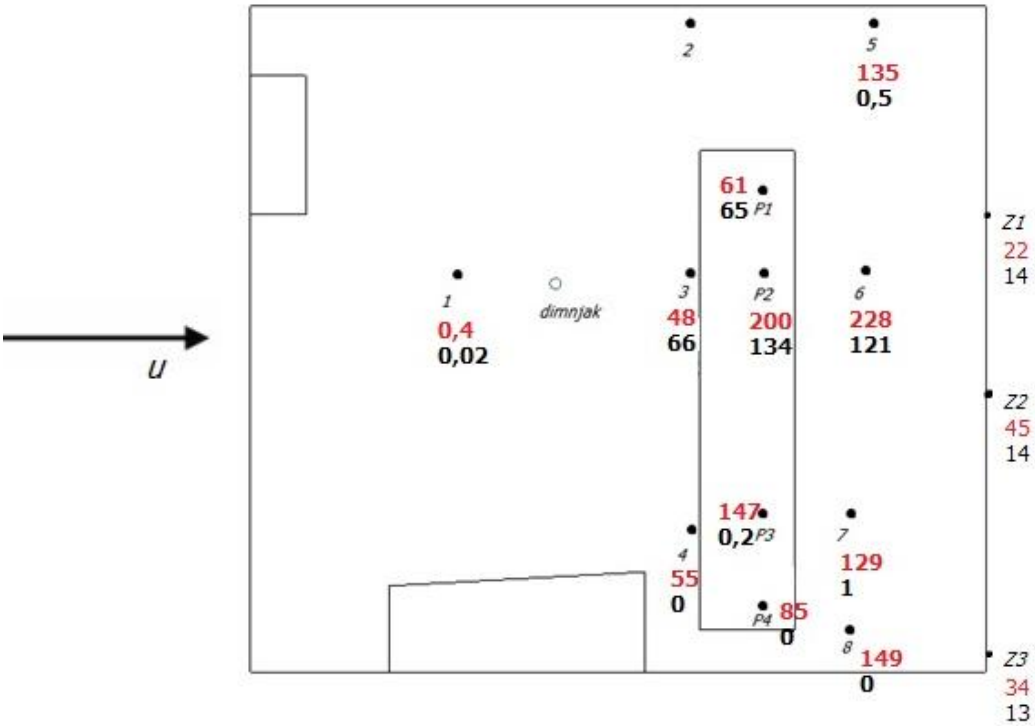
Slika 30. Polje bezdimenzijske koncentracije na površini krova u *x* - *y* ravnini za strujanje pod napadnim kutom od 30°

Usporedba rezultata pokazuje da računalni model podcjenjuje širenje emisija plinova u poprečnom smjeru (točke 2 i 5), dok su predviđanja koncentracija u smjeru strujanja korektna, kako uzvodno, tako i nizvodno (točke 1, 3, 4, P1-P5). Može se primijetiti da model ne uspijeva adekvatno predvidjeti zadržavanje emisija u recirkulacijskoj zoni iza prepreke na krovu, gdje simulacije predviđaju tri puta nižu koncentraciju od izmjerenih podataka (točke 6-8). Ovakvi rezultati odgovaraju rezultatima iz sličnih simulacija u prijašnjim radovima [17], [18], [20] gdje je također primijećeno nedovoljno širenje u poprečnom smjeru, dok je po liniji u pravcu strujanja, iza izvora, podudarnost s eksperimentima najveća. Koncentracije na zidu u recirkulacijskoj zoni zgrade (Z1-Z3) približno odgovaraju eksperimentima.

Prema Stathopoulos [7] i Blocken i dr. [17] glavno ograničenje RANS modela u računanju turbulentnog transporta zagađivača je kvazistacionarno modeliranje izrazito nestaconarne prirode turbulentnog toka prilikom opstrujavanja tupog tijela, gdje dominiraju intermitentno nastajanje i odvajanja vrtloga. Smatra se da pulzacije u smjeru vjetra izrazito bitne za širenje

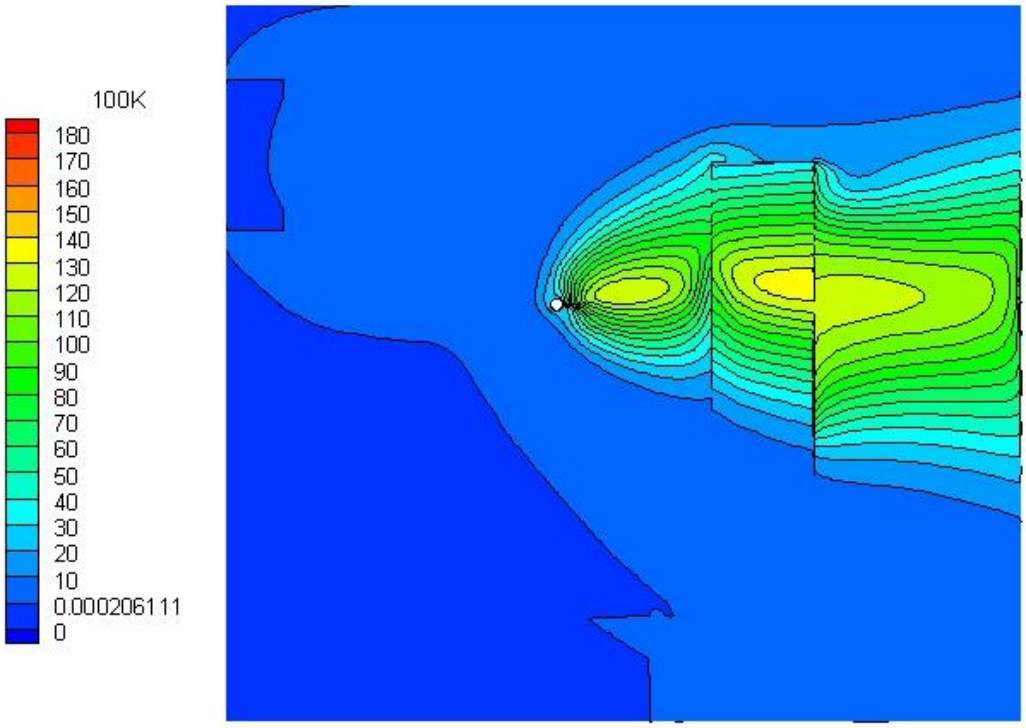
emisija u poprečnom smjeru, a kod RANS modela one nisu eksplicitno modelirane. Smatra se i da pretpostavka izotropne turbulencije u neposrednoj blizini zgrade i u recirkulacijskim zonama više nije u potpunosti opravdana.

Slika 31 pokazuje usporedbu rezultata računalnih simulacija i mjerenja za strujanje vjetra okomito na zid i M = 8,7. Usporedno su prikazani rezultati numeričke simulacije (crno), i mjerenja u prirodi (crveno). Mjerne lokacije na slici prethodno su specificirane na slici 24.

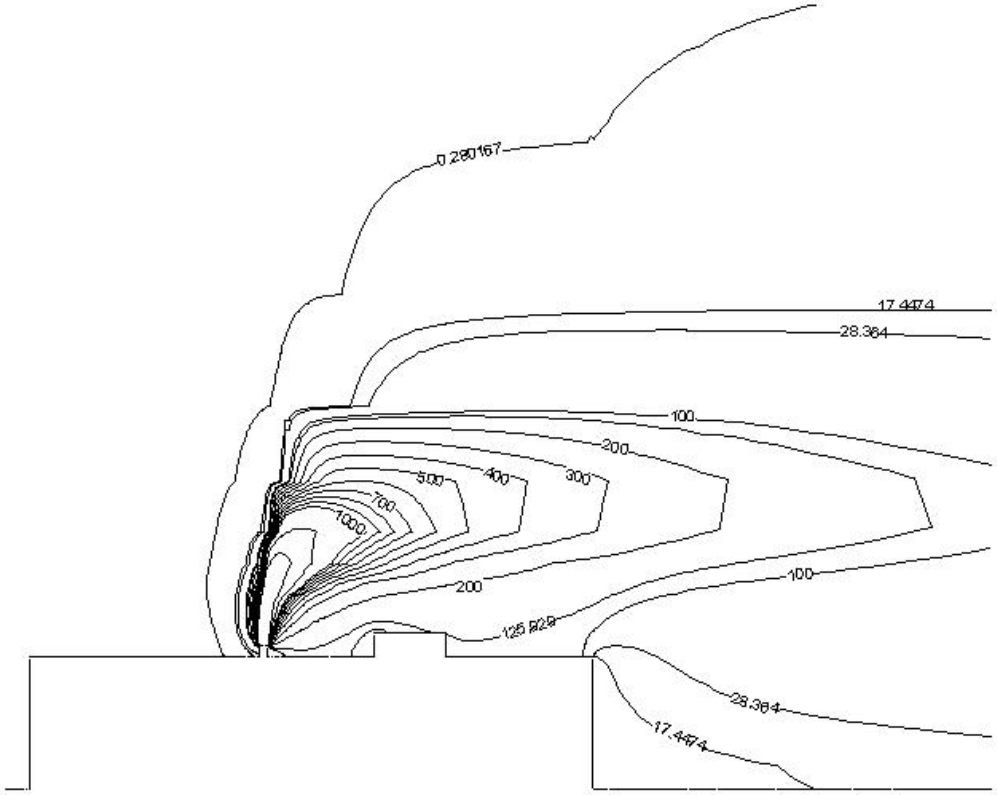


Slika 31. Usporedba rezultata mjerenja i računalne simulacije bezdimenzijske koncentracije za strujanje okomito na zid

I ovdje simulacije potvrđuju zapažanja iz prethodnog slučaja da je poprečna disperzija podcijenjena, dok su rezultati u smjeru vjetra i na okomitom zidu u zavjetrini zgrade bolji.



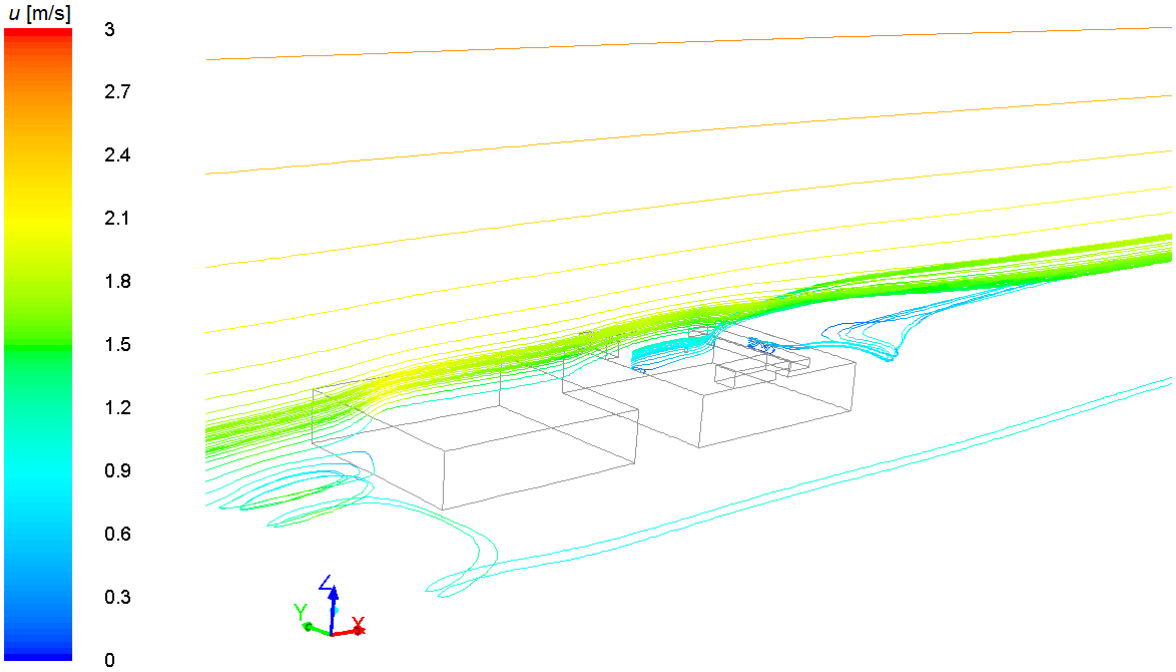
Slika 32. Polje bezdimenzijske koncentracije na površini krova u *x* - *y* ravnini za smjer strujanja vjetra okomito na zid



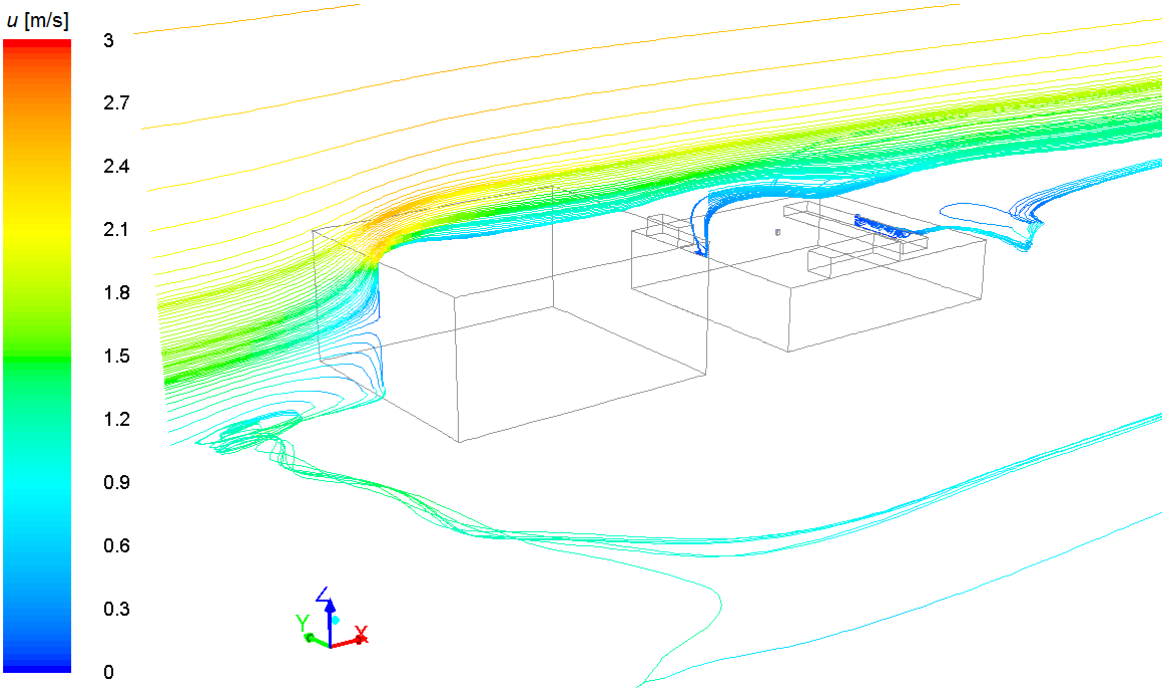
Slika 33. Polje bezdimenzijske koncentracije u vertikalnoj ravnini (*x* - *z*) za smjer strujanja vjetra okomito na zid

5.3. Susjedna zgrada postavljena ispred zgrade s dimnjakom na krovu

5.3.1. Karakteristike strujanja



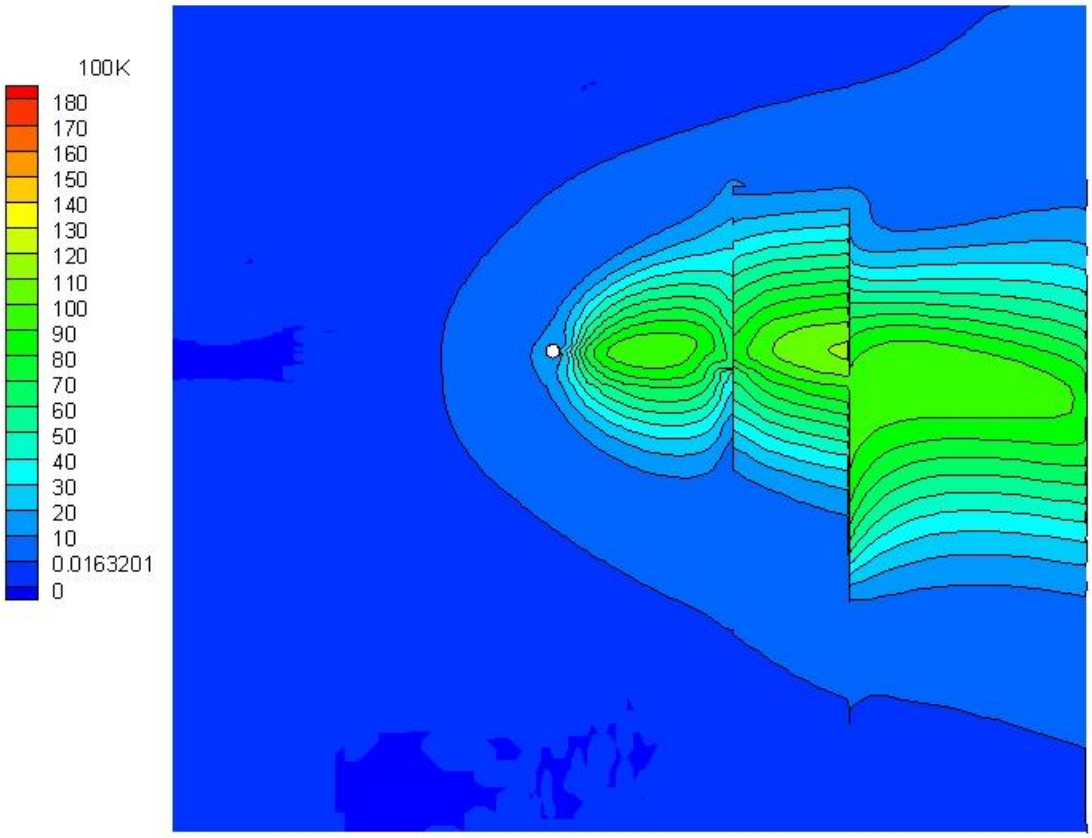
Slika 34. Trajektorije čestica nošenih strujanjem vjetra kad je visina uzvodne zgrade *H*



Slika 35. Trajektorije čestica nošenih strujanjem vjetra kad je visina uzvodne zgrade 2*H*

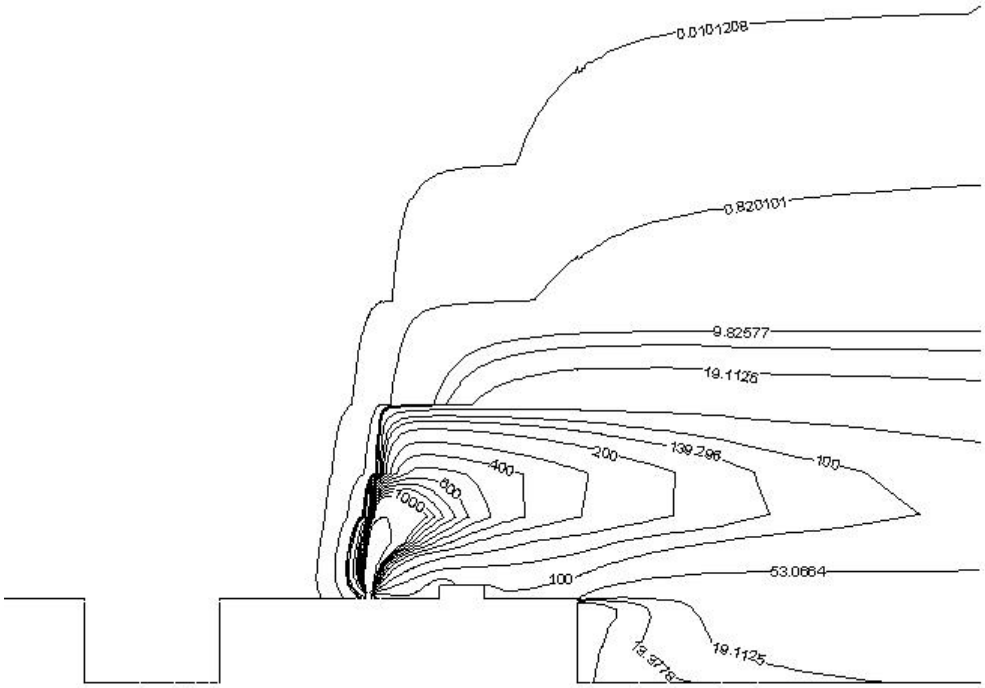
5.3.2. Polja koncentracije emisije u okolišu zgrade

a) Susjedna zgrada visine *H*



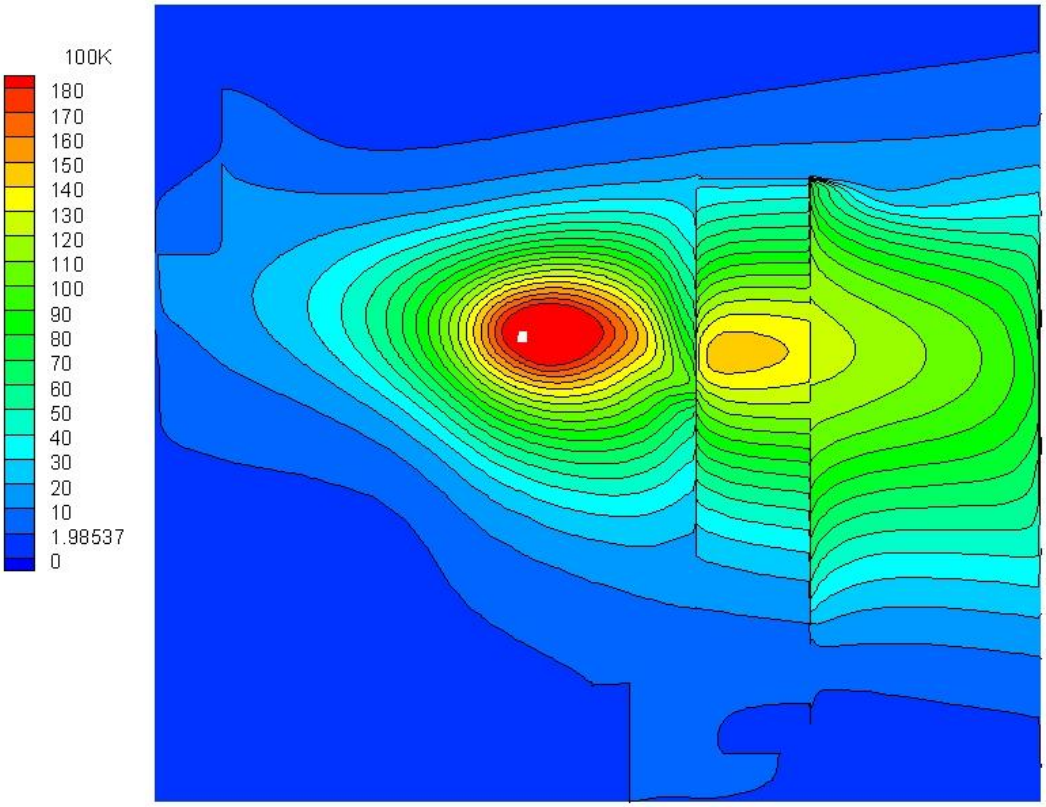
Slika 36. Polje bezdimenzijske koncentracije na krovu u *x* - *y* ravnini, slučaj uzvodne zgrade visine *H*

Usporedbom slike 36 s rezultatima za izoliranu zgradu može se zaključiti da su vrijednosti koncentracije emisije neznatno niže za slučaj da je zgrada visine *H* smještena uzvodno od zgrade s dimnjakom. Na slici 34 koja pokazuje sliku strujanja za taj slučaj primjećuje se skretanje struje vjetra pod utjecajem uzvodne zgrade, tako da je strujanje nastoji zaobići u visinu. Međutim, to nema veći utjecaj na brzine strujanja na mjestu dimnjaka. Vertikalna distribucija emisije prikazana na slici 37 pokazuje da model ne predviđa zadržavanje emisija u recirkulacijskoj zoni između dviju zgrada, te je utjecaj emisije na susjednu zgradu zanemariv.



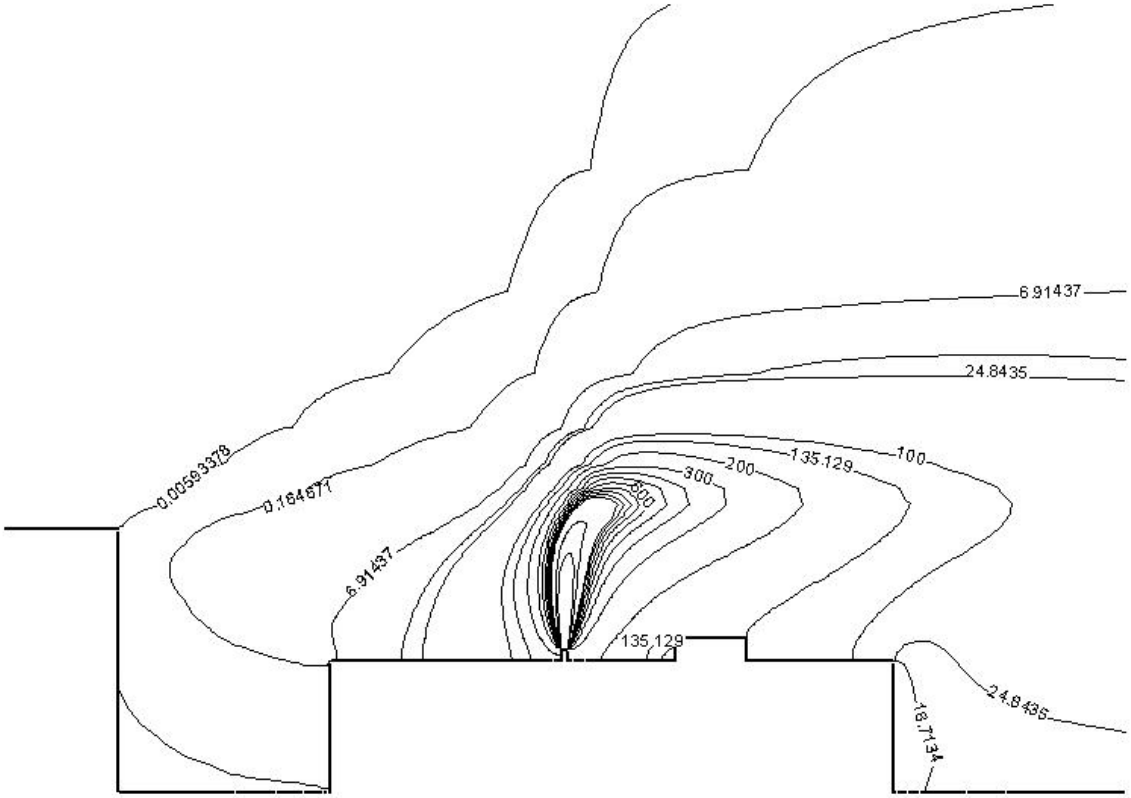
Slika 37. Polje koncentracije u vertikalnoj ravnini (*x*-*z*), slučaj uzvodne zgrade visine *H*

b) Susjedna zgrada visine 2*H*



Slika 38. Polje bezdimenzijske koncentracije na krovu u *x* - *y* ravnini, uzvodna zgrade visine 2*H*

U slučaju da je uzvodno postavljena zgrada dvostruko viša, izvor emisije se nalazi u njezinoj recirkulacijskoj zoni kako je prikazano na slika 35. Brzine strujanja u okolini dimnjaka tada su mnogo niže, što značajno utječe na disperziju: Slika 38 pokazuje rezultate polja koncentracije na kojem je vidljiv smanjen transport emisija u smjeru strujanja. Međutim, model ne predviđa povratno strujanje u recirkulacijskoj zoni koje bi prenijelo emisije k uzvodnoj zgradi što je vidljivo na zanemarivim koncentracijama u njezinoj blizini.

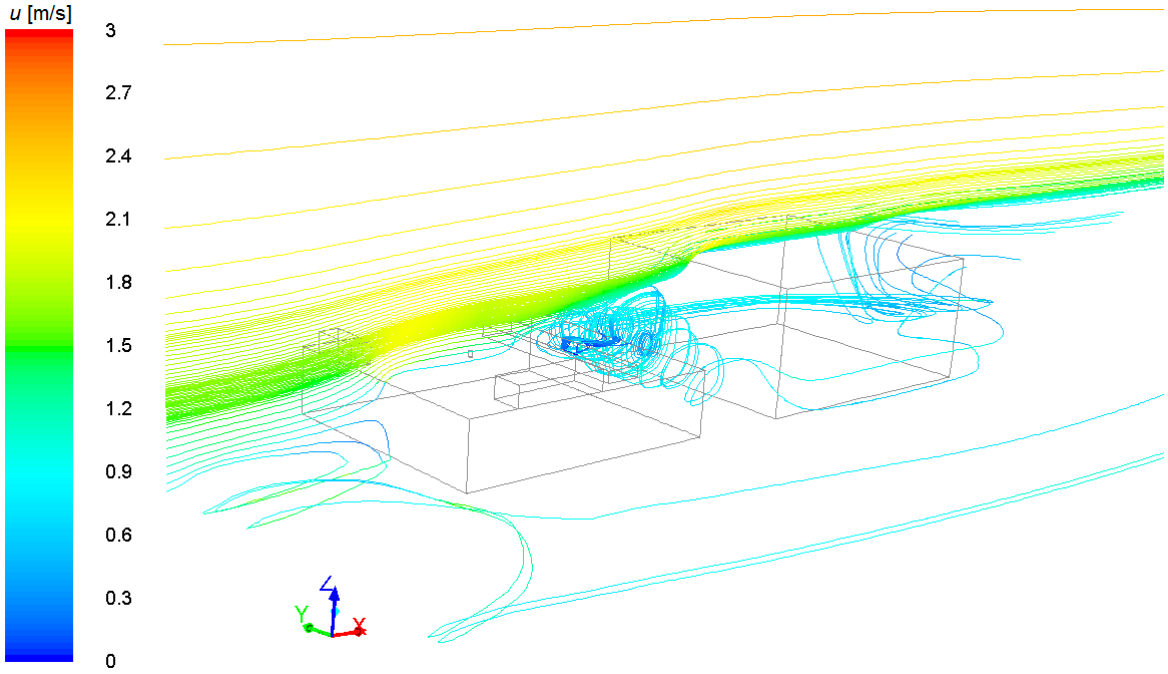


Slika 39. Polje koncentracije u vertikalnoj ravnini (*x* - *z*), slučaj uzvodne zgrade visine 2*H*

5.4. Susjedna zgrada postavljena iza zgrade s dimnjakom na krovu

5.4.1. Karakteristike strujanja

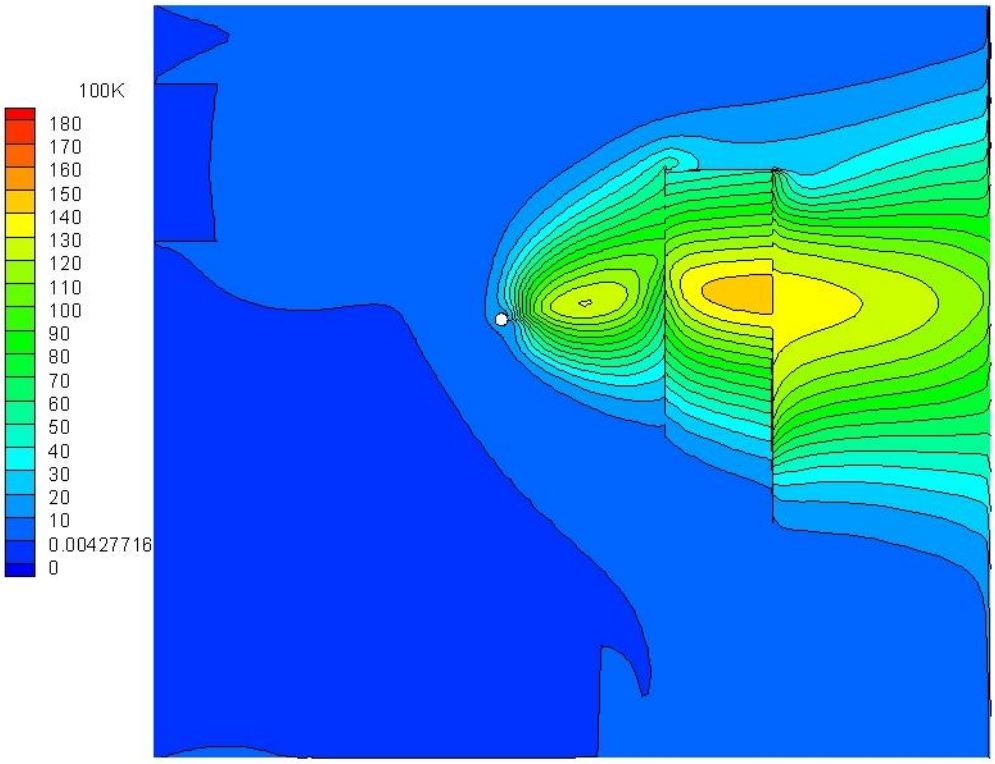
Simulacija u ovom slučaju predviđa stvaranje vrtloga uslijed djelovanja zgrade postavljene iza zgrade s dimnjakom koja blokira protok zraka. Nastali vrtlog najizraženiji je u prostoru između dviju zgrada.



Slika 40. Trajektorije čestica nošenih strujanjem vjetra, slučaj susjedne zgrade postavljene nizvodno

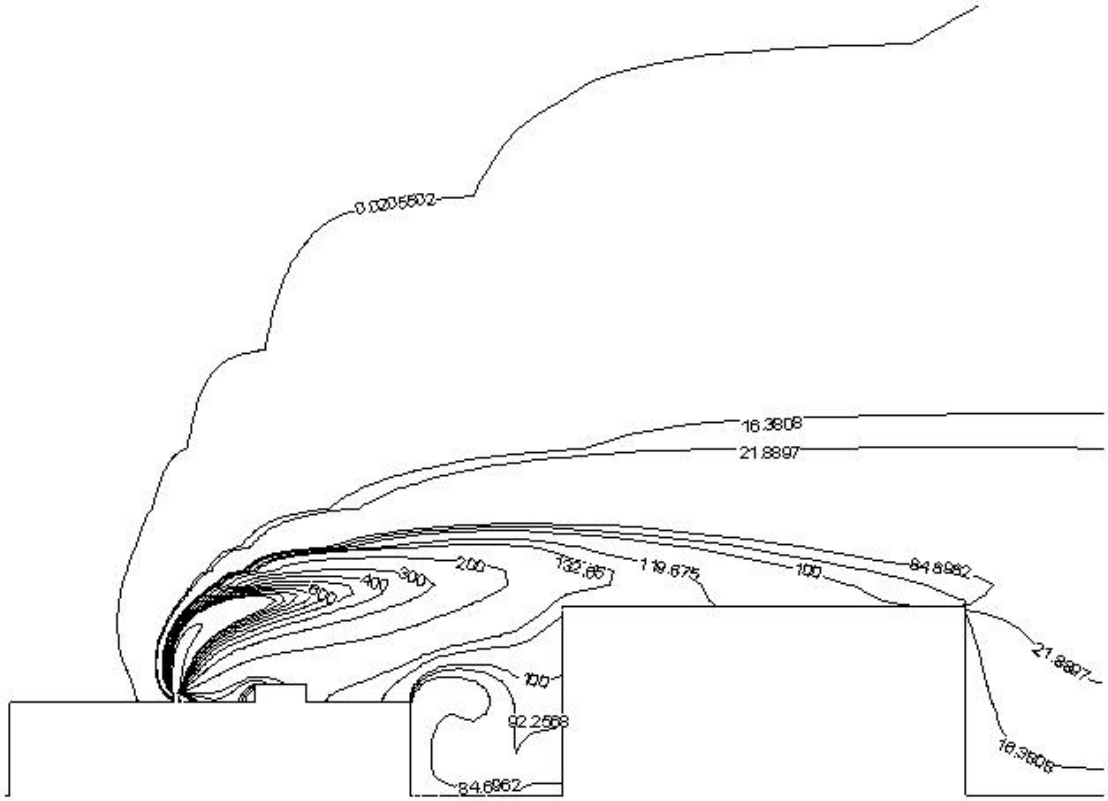
Utjecaj nizvodne zgrade na polje koncentracije na krovu zgrade s dimnjakom pokazuje usporedba slike 41. s rezultatima iz 5.2. Može se uočiti da su predviđene koncentracije u ovom slučaju nešto više, s obzirom da nizvodna zgrada predstavlja prepreku transportu emisije u smjeru strujanja.

5.4.2. Polje koncentracije emisije u okolišu zgrade



Slika 41. Polje bezdimenzijske koncentracije na krovu u *x* - *y* ravnini, slučaj susjedne zgrade postavljene nizvodno

Vertikalna raspodjela koncentracije na slici 42 ukazuje na dvije pojave. Prva je visoka koncentracija emisije u području između dviju zgrada gdje je model predvidio vrtložna strujanja koja zadržavaju plinove emisije i onemogućavaju njihov transport i raspršenje Druga je pojava zadržavanja visoke koncentracije emisije, po površinama nizvodne zgrade: I krov i bočna stranica okrenuta smjeru strujanja bilježe relativno visoke koncentracije emisije.



Slika 42. Polje koncentracije u vertikalnoj ravnini (*x*-*z*), slučaj susjedne zgrade postavljene nizvodno

6. ZAKLJUČAK

U radu je postavljen model disperzije štetnih tvari emitiranih iz dimnjaka zgrade smještene u urbanom okruženju, pri čemu je simulirano strujanje vjetra u termički neutralno stratificiranom atmosferskom graničnom sloju. Računalne simulacije su provedene uz korištenje osrednjenih Navier-Stokesovih jednadžbi i k-ε modela turbulencije. Rezultati računalnih simulacija validirani su rezultatima eksperimenata u zračnom tunelu i u prirodi. Nakon validacije računalnog modela u konfiguraciji s jednom izoliranom zgradom provedene su dodatne simulacije s ciljem ispitivanja utjecaja okolnih objekata na disperziju. Usporedba rezultata računalnih simulacija s rezultatima mjerenja u prirodi i u zračnom tunelu pokazuje da su računalnim simulacijama uspješno modelirane koncentracije emisije u smjeru glavnog strujanja, dok su rezultati postignuti u poprečnom smjeru niži od eksperimentalnih rezultata. Primijećena je nemogućnost modela da u potpunosti održi vertikalni profil kinetičke energije turbulencije zadan na ulazu duž računalne domene. Ulazni profili brzine i disipacije kinetičke energije simulirani bez primjetnih deformacija. Nastajanje recirkulacijske zone na krovu zgrade iza brida na koji nastrujava vjetar, kao i iza svake od prepreka na krovu je u većoj mjeri uspješno modelirano. Zabilježena odstupanja u odnosu na eksperimente mogu se pripisati poteškoćama korištenog računalnog modela u proračunima unutar zone recirkulacije strujanja, a što je zabilježeno i u prethodnim sličnim radovima. Navedene poteškoće proizlaze iz kvazistacionarnog modeliranja nestacionarnog turbulentnog strujanja, karakteriziranog odvajanjem vrtloga na oštrim naletnim bridovima krova. Isto tako, pretpostavka izotropne turbulencije u neposrednoj blizini zgrade i u recirkulacijskim zonama više nije u potpunosti primjenjiva, te je potrebno egzaktno modeliranje parametara turbulencije. Moguća poboljšanja se očekivano mogu ostvariti simulacijama velikih vrtloga (engl. Large Eddy Simulation - LES). Prilikom korištenja RANS metode ostaje neriješeno pitanje sustavnog određivanja turbulentnog Schmidtovog broja, koji je nepoznat prije izvođenja simulacije, a bitno utječe na turbulentni transport čestica. Korištenjem LES metode se izbjegava i ovaj problem. Postignuti rezultati ukazuju na činjenicu da konfiguracija objekata u neposrednoj blizini izvora emisije štetnih plinova u bitnome određuje koncentraciju tih plinova u urbanim područjima.

LITERATURA

[1] Meroney, R.N.: Wind Tunnel and Numerical Simulation of Pollution Dispersion: a Hybrid Approach, Croucher Advanced Study Institute on Wind Tunnel Modeling, Hong Kong University od science and technology, 2004

[2] Kampa, M.; Castanas, E.: Human health effects of air pollution, Environmental Pollution, 2008, 151, 362-367.

[3] Monks, P.S.; Granier, C.; Fuzzi, S.; Stohl, A.; Williams, M.L., et al.: Atmospheric composition change – global and regional air quality, Atmospheric Environment 2009, 43, 5268-5350.

[4] Anderson, H.R.: Air pollution and mortality: A history, Atmospheric Environment 2009,43, 142-152.

[5] Costigliola, V.: 10th EMS Annual Meeting, 10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM) Abstracts, Zürich, Switzerland, 2010.

[6] Stathopoulos, T.; Lazure, L.; Saathoff, P.; Gupta, A.: The effect of stack height, stack location and rooftop structures on air intake contamination: A laboratory and full-scale study, Report R-392, IRSST, Quebec, 2004.

[7] Stathopoulos, T.; Hajra, B.; Bahloul. A.: Analytical Evaluation of Dispersion of Exhaust from Rooftop Stacks on Buildings, Report R-576, IRSST, Quebec, 2008.

[8] Li, W.; Meroney, R.M.: Gas dispersion near a cubical model building – Part I. Mean concentration measurements, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 12, 15-33.

[9] Turner, D.B.; Workbook of atmospheric dispersion estimates, Environmental Protection Agency, Environmental Health Series, Air Pollution, 1970.

[10] Wilson, D.J.; Lamb, B.; Dispersion of exhaust gases from roof level stacks and vents on a laboratory building, Atmospheric Environment, 1994, 28, 3099-3111.

[11] Juretić F., Kozmar, H.: Computational modeling of the neutrally stratified atmospheric boundary layer flow using the standard k-ε turbulence model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 115, 112-120.

[12] Juretić F., Kozmar, H.: Computational modeling of the atmospheric boundary layer using various two-equation turbulence models, prihvaćen za objavljivanje.

[13] Barić E., Džijan I., Kozmar H.: Utjecaj hrapavosti terena na dimenzije recirkulacijske zone vjetra nizvodno od zgrade, Strojarstvo, 2012, 54, 273-282.

[14] Barić E., Džijan I., Kozmar H.: Numerical simulation of wind characteristics in the wake of a rectangular building submitted to realistic boundary layer conditions, Transactions of Famena, 2010.,

[15] Gousseau, P.; Blocken, B.; van Heijst, G.: CFD simulation of pollutant dispersion around isolated buildings: on the role of convective and turbulent mass fluxes in the prediction accuracy, Journal of Hazardous Materials, 2011, 194, 422-434.

[16] Tominaga, Y.; Stathopoulos, T.: Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: Comparison of various types of k-ε models, Atmospheric Environment, 2009, 43, 3200-3210.

[17] Blocken, B.; Stathopoulos, T.; Saathoff, P.; Wang, X.,: Numerical evaluation of pollutant dispersion in the built environment: comparisons between models and experiments, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96, 1817- 1831.

[18] Chavez, M.; Hajra, B.; Stathopoulos, T.; Bahloul, A.: Near-field pollutant dispersion in the built environment by CFD and wind tunnel simulations, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99 (4), 330-339.

[19] M. Chavez a, T. Stathopoulos a, A. Bahloul b: CFD modelling of flow and dispersion in the built environment: different RANS models and a first attempt to use URANS, The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7) Shanghai, China, 2012.

[20] Gousseau P.; Blocken B.; Stathopoulos, T.; van Heijst G.: CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: a case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal, Atmospheric Environment, 2011, 45: 428-438

[21] Simiu E., Scanlan R. H.: Wind effects on structures, John Wiley & Sons, 1996.

[22] Counihan J.: Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from preriod 1880-1972, Atmospheric Enviroment, 1975, 9, S. 871-905,

[23] Dyrbye C., Hansen S.: Wind loads on structures, John Wiley & Sons, 1997.

[24] Davenport, Alan G. "The relationship of wind structure to wind loading." (1966).

[25] Wieringa, Jon.: "Updating the Davenport roughness classification." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41, 357-368.

[26] 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,

[27] Pernpeintner A.: Predavanja iz predmeta „Aerodynamik der Bauwerke“, Lehrstuhl für Fluidmechanik, Fakultät für Maschinenwesen, TU-München, 1998.

[28] ESDU: Characteristics of wind speed in the lower layers of the atmosphere near the ground: strong winds (neutral atmosphere), Engineering Sciences Data Unit, 85020, 1985.

[29] Ferziger, H., Perić, M.: Computational methods for fluid dynamics. Vol. 3, Springer, Berlin, 2002.

[30] Džijan, I: Računalna dinamika fluida, interna skripta, 2010.

[31] Jones W., Launder B.: The Prediction of Laminarisation with a two-equation model of Turbulence, AIAA Journal, 1973, 14, 119-132.

[32] Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J.: A new *k-e* eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows, Computers and Fluids, 1995, 24, 227-238.

[33] Klebanoff, P.S.: Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient, National Advisory Committee for Aeronautics, 1955.

[34] Spalart, P.R.: Direct simulation of a turbulent boundary layer up to Rθ= 1410, Journal of Fluid Mechanics, 1988, 187, 61-98.

[35] Kim, J., Moin, P., Moser, R.: Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, Journal of Fluid Mechanics, 1987, 177, 133-166.

[36] Launder, B., Spalding, D.: The numerical computation of turbulent flows, Computer methods in applied mechanics and engineering, 1974, 3, 269-289.

[37] Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J.: CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems, Atmospheric environment, 2007, 41, 238-252.

[38] COST Action 732.: Quality assurance and improvement of microscale meteorological models, 2007.

[39] Ramponi, R., Blocken, B.: CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: impact of computational parameters, Building and Environment, 2012, 53, 34-48.

[40] Richards, P. J., Hoxey, R. P. : Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-ϵ turbulence model, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1993, 46, 145-153.

PRILOZI

I. CD-R disc