

# Računalni model strujanja zraka ispod izdignute zgrade

---

Čajić, Petar

Master's thesis / Diplomski rad

2019

*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:235:824596>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-12**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Petar Čajić**

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Hrvoje Kozmar  
Dr. sc. Franjo Juretić

Student:

Petar Čajić

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Hrvoju Kozmaru na ukazanom strpljenju i savjetima tijekom izrade ovog rada. Vrijedne upute i pomoć u radu Mihaela Cindorija, mag. ing. mech. su uvelike pridonijeli kvaliteti rada, na čemu se zahvaljujem. Posebno hvala mentoru dr. sc. Franji Juretiću koji je bitno unaprijedio rad s obzirom na CF-MESH+® računalni programski paket kojeg razvija. Hrvatskoj zakladi za znanost hvala na potpori istraživačkog projekta HRZZ-IP-2016-06-2017 (WESLO), u okviru kojeg je izrađen ovaj diplomski rad.

Petar Čajić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Petar Čajić** Mat. br.: **0035194628**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Računalni model strujanja zraka ispod izdignute zgrade**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Computational model of airflows underneath a lift-up building**

Opis zadatka:

Izdignute zgrade se često grade u gusto naseljenim višemilijunskim gradovima s ciljem povećanja cirkulacije i poboljšanja kvalitete zraka. Pritom karakteristike strujanja zraka ispod izdignutih zgrada mogu značajno utjecati na osjećaj ugone i sigurnost pješaka u tom prostoru, npr. da struja zraka nije prejaka i da strujanje ne uzrokuje nestabilnost pješaka. Slijedom navedenog je potrebno detaljno ispitati karakteristike strujanja zraka ispod izdignutih zgrada za različite utjecajne parametre.

U diplomskom radu je potrebno, uz pomoć programskog paketa za računalnu dinamiku fluida, simulirati opstrujavanje visoke izdignute zgrade smještene u urbanom okruženju. Pritom je potrebno uvjete nastrojavanja vjetra prilagoditi karakteristikama strujanja zraka u atmosferskom graničnom sloju, uključujući uvjete atmosferske turbulencije, za različite tipove i kutove nastrojavanja vjetra. Također je potrebno ispitati utjecaj ključnih parametara arhitekture visoke izdignute zgrade na karakteristike strujanja zraka ispod zgrade, i to a) visine i širine zgrade, b) visine, širine i dubine prostora ispod zgrade kroz koji prostrujava zrak. U radu je potrebno koristiti model stacionarnog trodimenzijskog turbulentnog strujanja nestlačivog fluida. Rezultate računalnih simulacija potrebno je usporediti s vrijednostima danim u dostupnoj literaturi.

Rad treba sadržavati:

1. Uvod s općenitim opisom teme, pregledom relevantne literature i ciljevima ovog rada.
2. Opis strujanja vjetra u atmosferskom graničnom sloju i ispitivane zgrade.
3. Matematičku osnovu modeliranja turbulencije.
4. Opis računalnog modela strujanja zraka ispod izdignute zgrade.
5. Prikaz i analizu rezultata računalnih simulacija.
6. Zaključak.

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

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predviđeni datum obrane:  
26. rujna 2019. 28. studenoga 2019. 2. – 6. prosinca 2019.

Zadatak zadali:

Prof. dr. sc. Hrvoje Kozmar

Dr. sc. Franjo Juretić

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

# SADRŽAJ

<b>SADRŽAJ</b> .....	<b>I</b>
<b>POPIS SLIKA</b> .....	<b>III</b>
<b>POPIS TABLICA</b> .....	<b>IV</b>
<b>POPIS OZNAKA</b> .....	<b>V</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>IX</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>X</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. Opis problematike .....	1
1.2. Pregled literature .....	1
1.3. Cilj rada.....	4
<b>2. KARAKTERISTIKE ATMOSFERSKOG GRANIČNOG SLOJA</b> .....	<b>5</b>
2.1. Atmosfersko strujanje .....	5
2.2. Atmosferski granični sloj .....	5
2.2.1. Struktura atmosferskog graničnog sloja.....	6
2.2.2. Struktura strujanja u atmosferskom graničnom sloju .....	8
2.2.3. Empirijske relacije za modeliranje atmosferskog graničnog sloja.....	9
<b>3. MATEMATIČKI MODEL</b> .....	<b>11</b>
3.1. Osnovne jednačbe mehanike kontinuuma .....	11
3.1.1. Vremenski osrednjene Navier-Stokesove (RANS) jednačbe.....	12
3.1.2. Modeliranje turbulencije .....	13
3.1.3. Modeliranje turbulencije u blizini zida .....	14
3.2. Diskretizacija matematičkog modela .....	18
3.2.1. Diskretizacija prostornih članova.....	21
3.2.2. Diskretizacija nestacionarnog (vremenskog) člana.....	23
3.3. Algoritam rješavanja sustava Navier-Stokesovih jednačbi.....	24
3.3.1. Diskretizirani sustav Navier-Stokesovih jednačbi .....	24
3.3.2. SIMPLE algoritam .....	25
<b>4. RAČUNALNI MODEL</b> .....	<b>26</b>
4.1. Domena strujanja .....	26
4.2. Generiranje mreže konačnih volumena .....	29
4.3. Ulazni profili fizikalnih veličina .....	31
4.3.1. Ulazni profil prema Richardsu i Hoxeyu .....	31
4.3.2. Ulazni profili prema Richardsu i Norrisu .....	34
4.4. Provjera homogenosti atmosferskog graničnog sloja u 2D domeni .....	35
4.5. Rubni uvjeti.....	39
4.6. Korištene sheme diskretizacije .....	41
4.7. Ispitivanje osjetljivosti rješenja na rezoluciju mreže konačnih volumena.....	41
<b>5. REZULTATI I DISKUSIJA</b> .....	<b>44</b>
5.1. Rezultati polja koeficijenta ugone $K$ za ulazni profil prema Richardsu i Hoxeyu.....	46
5.2. Rezultati polja koeficijenta ugone $K$ za ulazni profil prema Richardsu i Norrisu .....	54

---

5.3. Analiza rezultata .....	61
5.3.1. Utjecaj dimenzija zgrade.....	62
5.3.2. Utjecaj oblika nosivog dijela zgrade (jezgre zgrade).....	63
5.3.3. Utjecaj kuta nastrojavanja $\gamma$ .....	63
5.3.4. Utjecaj zadanih ulaznih profila .....	63
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>65</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>67</b>
<b>PRILOZI.....</b>	<b>70</b>

## POPIS SLIKA

Slika 1	Prikaz izdignutog područja (jezgre) zgrade [18].....	3
Slika 2	Podjela atmosferskog graničnog sloja [25].....	6
Slika 3	Prikaz aerodinamičke duljine hrapavosti $z_0$ [28].....	7
Slika 4	Formiranje atmosferskog graničnog sloja pri strujanju zraka iznad površine s gusto raspoređenim objektima površinske hrapavosti [28].....	8
Slika 5	Prikaz mjerenih i osrednjenih brzina na tri različite visine $z$ unutar atmosferskog graničnog sloja [26] .....	9
Slika 6	Profili homogenog atmosferskog graničnog sloja dobiveni zakonom potencije za strujanje nad tri različita tipa terena [29] .....	10
Slika 7	Shematski prikaz bezdimenzijske brzine u ovisnosti o bezdimenzijskoj udaljenosti od zida [34].....	16
Slika 8	Prikaz proizvoljnog konačnog volumena [24] .....	19
Slika 9	Prikaz primjene linearne interpolacije za određivanje vrijednosti $\Phi$ na plohama kontrolnog volumena [27].....	21
Slika 10	Prikaz korištene računalne domene s rubovima.....	26
Slika 11	Kotirane dimenzije zgrade sa shematskim tlocrtnim prikazom korištenih oblika jezgri zgrade .....	27
Slika 12	Prikaz napadnog kuta zgrade .....	28
Slika 13	Prikaz presjeka korištene mreže konačnih volumena .....	30
Slika 14	Usporedba ulaznih profila osrednjene brzine prema Richardsu i Hoxeyu [21]..	33
Slika 15	Usporedba ulaznih profila osrednjene brzine.....	35
Slika 16	Prikaz 2D mreže konačnih volumena korištene za ispitivanje homogenosti.....	36
Slika 17	Usporedba profila brzine u 2D domeni s ulaznim profilom prema Richardsu i Hoxeyu .....	36
Slika 18	Usporedba profila kinetičke energije turbulencije u 2D domeni s ulaznim profilom prema Richardsu i Hoxeyu.....	37
Slika 19	Usporedba profila disipacije kinetičke energije turbulencije u 2D domeni s ulaznim profilom prema Richardsu i Hoxeyu.....	37
Slika 20	Usporedba profila brzine u 2D domeni s ulaznim profilom prema Richardsu i Norrisu[22].....	38
Slika 21	Usporedba profila kinetičke energije turbulencije u 2D domeni s ulaznim profilom prema Richardsu i Norrisu .....	38
Slika 22	Usporedba profila disipacije kinetičke energije turbulencije u 2D domeni s ulaznim profilom prema Richardsu i Norrisu [22].....	39
Slika 23	Odnos koeficijenta ugone srednje i grube mreže. ....	42
Slika 24	Odnos koeficijenta ugone između srednje i fine mreže. ....	42
Slika 25	Shematski prikaz konfiguracije zgrade (plava boja - stambeni dio zgrade, crvena boja - nosivi dio ili jezgra zgrade) .....	45
Slika 26	Prikaz polja koeficijenta ugone $K$ za ulazni profil prema Richardsu i Hoxeyu ..	46
Slika 27	Prikaz polja koeficijenta ugone $K$ za ulazni profil prema Richardsu i Norrisu	54



**POPIS TABLICA**

Tablica 1	Vrijednosti aerodinamičke duljine hrapavosti $z_0$ za različite tipove terena [28]... 7
Tablica 2	Standardni koeficijenti $k$ - $\varepsilon$ modela turbulencije ..... 14
Tablica 3	Dimenzije korištenih konfiguracija zgrada [20] ..... 28
Tablica 4	Veličine potrebne za izračunavanje ulaznih profila prema Richardsu i Hoxeyu 33
Tablica 5	Koeficijenti potrebni za izračunavanje ulaznih profila prema Richardsu i Norrisu [22] ..... 34
Tablica 6	Tablični prikaz korištenih rubnih uvjeta za Richards i Hoxey ulazne profile .... 40
Tablica 7	Tablični prikaz korištenih rubnih uvjeta za Richards i Norris ulazne profile ..... 40
Tablica 8	Korištene sheme diskretizacije..... 41
Tablica 9	Vrijednosti referentnih vrijednosti koeficijenta ugone $K$ prema [20] ..... 44
Tablica 10	Usporedba maksimalnih vrijednosti koeficijenata ugone $K_{\max}$ s dostupnim maksimalnim vrijednostima izmjerenim u zračnom tunelu [20] ..... 61

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\mathbf{a}$	-	Općeniti vektor
$\mathbf{a}_N$	-	Vrijednost koeficijenta u centru N konačnog volumena
$\mathbf{a}_P$	-	Vrijednost koeficijenta u centru P konačnog volumena
$\mathbf{A}$	-	Općeniti tenzor
$B$	-	Empirijska konstanta zidne funkcije
$\mathbf{c}$	-	općeniti vektor
$C_1$	-	Konstanta modela turbulencije
$C_2$	-	Konstanta modela turbulencije
$C_d$	-	Korekcijski faktor
$C_\mu$	-	Konstanta modela turbulencije
$d$	m	Debljina istisnuća atmosferskog graničnog sloja
$\mathbf{d}_f$	m	Vektor koji spaja centre susjednih volumena
$\mathbf{d}_N$	m	Vektor udaljenosti između centara susjednih volumena
$E$	-	Parametar hrapavosti podloge
$F$	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	Protok kroz površinu
$\mathbf{I}$	-	Jedinični tenzor
$\mathbf{n}$	-	Vektor normale
$k$	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$	Kinetička energija turbulencije
$K$	-	Koeficijent ugone pješaka
$p$	Pa	Skalarno polje tlaka
$\bar{p}$	Pa	Polje osrednjene vrijednosti tlaka
$p'$	Pa	Polje fluktuacijske vrijednosti tlaka
$p_{\text{eff}}$	Pa	Efektivni tlak
$p^{\text{new}}$	Pa	Tlak u novom vremenskom koraku
$p^{\text{old}}$	Pa	Tlak u starom vremenskom koraku
$P$	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$	Izvorski član modela turbulencije

$P_p$	Pa	Vrijednost izvorskog člana u centru ćelije uz zid
$\mathbf{r}_p$	m	Vektor položaja težišta konačnog volumena
$S_\phi$	-	Općeniti izvorski član
$s_f$	m <sup>2</sup>	Površinski vektor definiran u centru stranice
$S_p$	-	Vrijednost izvorskog člana u centru konačnog volumena
$t$	s	Vrijeme
$u$	m/s	brzina strujanja
$\bar{u}$	m/s	osrednjena brzina
$u'$	m/s	Fluktuacijski dio brzine
$\overline{u'v'}$	$\frac{m^2}{s^2}$	Komponenta Reynoldsovog tenzora naprezanja
$u^+$	-	Bezdimenzijska brzina
$\bar{u}_{ref}$	m/s	Vrijednost osrednjene brzine na referentnoj visini
$\bar{u}_\tau$	m/s	Brzina trenja
$\mathbf{U}$	m/s	Vektor polja brzine
$\bar{\mathbf{U}}$	m/s	Vektor polja osrednjene brzine
$\bar{\mathbf{U}}_p^0$	m/s	Polje brzine prethodne iteracije
$\mathbf{U}'$	m/s	Vektor polja fluktuacijske brzine
$\mathbf{U}_f$	m/s	Vektor brzine na stranici konačnog volumena
$\overline{\mathbf{U}'\mathbf{U}'}$	$\frac{m^2}{s^2}$	Reynoldsov tenzor naprezanja
$v$	m/s	Brzina strujanja u lateralnom smjeru
$\bar{v}$	m/s	Osrednjena brzina strujanja u lateralnom smjeru
$v'$	m/s	Fluktuacijski dio brzine u lateralnom smjeru
$V_p$	m <sup>3</sup>	Volumen konačnog volumena
$\mathbf{x}$	m	Vektor položaja
$y$	m	Koordinata
$y^+$	-	Bezdimenzijska udaljenost od zida
$y_p$	m	Udaljenost centra prve ćelije od zida

$y_p^+$	-	Bezdimenzijska udaljenost centra prve ćelije od zida
$z$	m	Koordinata
$z_0$	m	Aerodinamička duljina hrapavosti
$z_{ref}$	m	Referentna visina

## Grčka slova

Oznaka	Jedinica	Opis
$\alpha$	-	EkspONENT zakona potencije
$\alpha_p$	-	Podrelaksacijski faktor za tlak
$\alpha_u$	-	Podrelaksacijski faktor za brzinu
$\Gamma_\phi$	$\frac{m^2}{s}$	Koeficijent difuzije
$\kappa$	-	Von Kármánova konstanta
$\delta$	m	Debljina graničnog sloja
$\varepsilon$	$\frac{m^2}{s^3}$	Disipacija turbulentne kinetičke energije
$\varepsilon_p$	$\frac{m^2}{s^3}$	Vrijednost $\varepsilon$ u centru volumena do zida
$\gamma$	-	Kut nastrojavanja
$\mu$	Pa·s	Dinamička viskoznost
$\nu$	$\frac{m^2}{s}$	Kinematička viskoznost
$\nu_T$	$\frac{m^2}{s}$	Turbulentna kinematička viskoznost
$\rho$	$\frac{kg}{m^3}$	Gustoća fluida
$\sigma$	$\frac{kg}{ms^2}$	Tenzor naprezanja
$\sigma_k$	-	Konstanta modela turbulencije
$\sigma_\varepsilon$	-	Konstanta modela turbulencije
$\tau$	$\frac{kg}{ms^2}$	Smično naprezanje
$\tau_0$	$\frac{kg}{ms^2}$	Smično naprezanje na površini

---

$\tau_w$	$\frac{\text{kg}}{\text{ms}^2}$	Smično naprezanje na zidu
$\Phi$	–	Općenito skalarno polje
$\Phi_f$	–	Vrijednost polja $\Phi$ u centru stranice konačnog volumena
$\Phi_N$	–	Vrijednost polja $\Phi$ u centru susjednog konačnog volumena
$\Phi_P$	–	Vrijednost polja $\Phi$ u centru konačnog volumena
$\Phi^n$	–	Vrijednost polja $\Phi$ u novom vremenskom koraku
$\Phi^o$	–	Vrijednost polja $\Phi$ u prošlom vremenskom koraku
$\omega$	rad/s	Kutna brzina rotacije Zemlje

## SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada je određivanje utjecaja niza parametara na strujanje zraka oko zgrade s izdignutim stambenim dijelom. Rad se temelji na simulacijama provedenim u računalnoj mehanici fluida. Za izradu računalne mreže je korišten komercijalni programski paket CF-MESH+®, a za proračune je korišten programski paket otvorenog koda OpenFOAM®. U radu je korišten model stacionarnog trodimenzijskog turbulentnog strujanja nestlačivog fluida opisan osrednjenim Navier-Stokesovim jednadžbama i  $k-\varepsilon$  modelom turbulencije, dok je strujanje uz zid modelirano zidnim funkcijama. Strujanje vjetra je modelirano koristeći dva tipa homogenog atmosferskog graničnog sloja pogonjenog smičnim naprežanjem i gradijentom tlaka. U radu je ispitan utjecaj parametara dimenzija i oblika izdignute zgrade na brzinu strujanja vjetra i koeficijent ugone na visinama koje odgovaraju visini pješaka u okolini zgrade. Analizirano je ukupno trideset različitih konfiguracija izdignute zgrade gdje su se mijenjale dimenzije zgrade, oblik nosivog dijela zgrade, kutovi nastrojavanja vjetra na zgradu te modeli homogenog atmosferskog graničnog sloja koji nastrojava na zgradu. Dobiveni rezultati koeficijenta ugone u okolini zgrade uspoređeni su s rezultatima dostupnim u literaturi te je postignuta vrlo dobra podudarnost (relativno odstupanje manje od 6%). Rezultati analize ukazuju na činjenicu da visina zgrade te kut nastrojavanja imaju dominantan utjecaj na strujanje zraka u blizini zgrade u odnosu na vrstu homogenog atmosferskog graničnog sloja koji nastrojava na zgradu i oblik nosivog dijela zgrade.

Ključne riječi: Zgrada s izdignutim stambenim dijelom, atmosferski granični sloj, koeficijent ugone, računalna dinamika fluida.

## SUMMARY

The scope of this work is to determine the parameters that influence the airflows around lift-up buildings. The study is based on the Computational Fluid Mechanics (CFD) simulations. The CF-MESH+® commercial software package was used to create the volume meshes and OpenFOAM® was used to perform the CFD calculations. The stationary 3D turbulent flow model of a non-compressible fluid described by the averaged Navier-Stokes equations and the  $k-\varepsilon$  turbulence model were used, whereas the flow near the wall was modeled by using the wall functions. The wind flow was modeled as the atmospheric boundary layer (ABL) for two types of boundary conditions. The effect of a number of parameters on wind characteristics at the pedestrian height of 2 m was analyzed. In particular, thirty simulations were performed to analyze the effects of the building dimensions and shape and the flow incidence angle for two sets of boundary conditions at the inlet of the computational domain. The results were compared with the results that are available in the literature and a very good match was obtained with the discrepancies less than 6%. It was observed that the building height and the flow incidence angle dominate the wind characteristics at 2 m height around the lift-up building compared to the effects of the inlet boundary conditions and the shape of the lowest portion (core) of the building.

Keywords: Lift-up building, atmospheric boundary layer, wind comfort, Computational Fluid Dynamics.

## 1. UVOD

### 1.1. Opis problematike

U gusto naseljenim suvremenim gradovima se javljaju problemi vezani za kvalitetu zraka uslijed intenzivne urbanizacije. Naime, prilikom izgradnje nove zgrade, na tom se mjestu mijenjaju brzina i smjer strujanja vjetra, koncentracija štetnih čestica u zraku, način padanja kiše, zračenje te osunčana površina grada. Koliko će se neki od spomenutih parametara promijeniti ovisit će o obliku, veličini i orijentaciji novoizgrađene zgrade. Promjene utjecajnih parametara mikroklimе grada mogu prouzročiti povećanu brzinu strujanja vjetra oko zgrada, a što posljedično može uzrokovati osjećaj nelagode, povećanje zagađenja zraka, pojavu manje osunčanih zona, blokirani pogled te pojačanu buku. S ciljem poboljšanja rješavanja navedenih problema sve se češće izgrađuju zgrade s izdignutim stambenom dijelom (engl. *lift-up buildings*), npr. Slika 1 iz Hong Konga.

Brzina strujanja vjetra na visini koja odgovara prosječnoj visini pješaka (engl. *pedestrian level wind*) uvjetovana je složenim strujanjem zraka oko zgrade. Stoga strujanja takvog tipa često zahtijevaju pažljivu aerodinamičku analizu. Donedavno su se aerodinamička ispitivanja uglavnom provodila eksperimentalnim modeliranjem strujanja atmosferskog graničnog sloja oko modela zgrada u zračnim tunelima. Uslijed ubrzanog razvoja računalnih metoda, sve se češće koriste računalni modeli strujanja atmosferskog graničnog sloja uz pomoć računalne dinamike fluida (engl. *CFD*). Pritom se često koriste komercijalni programski paketi za računalnu dinamiku fluida, ali i programski paketi otvorenog koda poput OpenFOAM®-a.

### 1.2. Pregled literature

Ispitivanje sigurnosti i osjećaja ugone pješaka uslijed strujanja vjetra (engl. *pedestrian wind comfort*) u urbanim okruženjima bili su predmet mnogih istraživanja u proteklih tridesetak godina. Pritom su se uglavnom koristile eksperimentalne i računalne metode čiji je glavni cilj što točnije reproducirati karakteristike turbulentnog strujanja koje se javlja u stvarnim atmosferskim uvjetima. Eksperimentalne metode ispitivanja u zračnom tunelu su se intenzivno počele koristiti u drugoj polovici 20. stoljeća ([1]-[8]). Krajem 20. stoljeća sve se više počinju koristiti metode računalnog modeliranja strujanja vjetra u urbanom okruženju. U [9] je u preglednom članku pokazano kako je strujanje vjetra u razinama kretanja pješaka jedno od područja u računalnom vjetroinženjerstvu (engl.



*Computational Wind Engineering - CWE*) gdje računalne metode mogu vrlo dobro procijeniti stvarne vrijednosti mjerene u prirodi i zračnom tunelu. Iako se računalno modeliranje turbulencije u atmosferskom graničnom sloju korištenjem modela turbulencije temeljenog na simulaciji velikih vrtloga (engl. *large eddy simulation* - LES) pokazalo vrlo pouzdanim pri modeliranju strujanja vjetra na visinama koje odgovaraju visinama pješaka, još se uvijek najčešće koriste modeli turbulencije koji se temelje na vremenski osrednjenim Navier-Stokesovim jednažbama (eng. *Reynolds-averaged Navier-Stokes equations* - RANS). U [9] je provedena usporedna analiza te je zaključeno kako je razlog tome činjenica da je najbitniji faktor kod ispitivanja sigurnosti i osjećaja ugrade pješaka maksimalna brzina strujanja vjetra. Iako RANS modeli turbulencije često rezultiraju lošim procjenama strujanja u recirkulacijskim zonama koje se javljaju kao posljedica opstrujavanja zgrada (LES modeli turbulencije su za rješavanje takvih problema puno bolji), RANS modeli mogu vrlo dobro mogu procijeniti mjesto i iznos maksimalnih vrijednosti strujanja te su stoga rijetki radovi koji koriste LES modele turbulencije za rješavanje problema osjećaja ugrade pješaka pri strujanju vjetra, [10].

U [11] je u preglednom članku dan detaljan opis problematike eksperimentalnog i računalnog modeliranja utjecaja strujanja vjetra na pješake na temelju četiri stvarna primjera iz prakse. U [12] je korištenjem računalne dinamike fluida i RANS modela turbulencije ispitan utjecaj visine zgrade i poroznih zona na osjećaj ugrade pješaka uslijed strujanja vjetra, dok je u [13] koristeći RANS modele turbulencije ispitan utjecaj modifikacije terena u okruženju zgrade na osjećaj ugrade pješaka. U [14] su provedena detaljna mjerenja strujanja vjetra unutar kampusa sveučilišta u Eindhovenu, te su dobiveni rezultati mjerenja uspoređeni s rezultatima računalnih simulacija dobivenim koristeći RANS model turbulencije. U [15] je na temelju istih rezultata ukazano na važnost standardizacije kriterija određivanja osjećaja ugrade pješaka uslijed strujanja vjetra. U [16] su prikazani rezultati računalne analize strujanja vjetra oko nogometnog stadiona u Amsterdamu, za situaciju prije i nakon izgradnje novih visokih zgrada u okolici. Dobiveni rezultati računalnih proračuna su ukazali na slabosti postojećih normi za procjenu strujanja vjetra na visinama koje odgovaraju visinama pješaka, kao i na važnost korištenja računalne dinamike fluida u procesima planiranja dodatne urbanizacije.

U velikim se gradovima sve intenzivnije grade izdignute zgrade kako bi se povećala cirkulacija zraka, a time i kvaliteta zraka. No, međutim takva izdignuta izvedba zgrade za

posljedicu može imati pojavu lokalnog ubrzavanja strujanja zraka u području u kojem se kreću pješaci što znatno može utjecati na sigurnost i osjećaj ugone pješaka ([17] i [18]). U [19] su računalno i eksperimentalno modelirali četiri različite konfiguracije izdignutih zgrada, te je pokazano kako dizajn zgrade s izdignutom jezgrom (nosivim dijelom zgrade) može značajno poboljšati sigurnost i osjećaj ugone pješaka u okolini zgrada. Također je pokazano kako zone većih brzina strujanja zraka jako zavise o kutu nastrujavanja vjetra na zgradu. U [20] je provedena detaljna analiza strujanja vjetra oko izdignutih zgrada u zračnom tunelu. Studija je napravljena za različite kutove nastrujavanja vjetra, različite oblike i visine jezgri, te dimenzije zgrade. Dobiveni rezultati ukazuju na značajan utjecaj visine zgrade na brzine strujanja zraka u blizini tla, tj. u području u kojem se nalaze i kreću pješaci. Također je pokazano kako visina izdignuća i širina jezgre imaju glavni utjecaj na generiranje zona s nižim brzinama strujanja zraka. Slika 1 prikazuje primjer jedne zgrade sa izdignutom jezgrom u Hong Kongu.



**Slika 1 Prikaz izdignutog područja (jezgre) zgrade [18]**

Kako bi se računalno modelirale karakteristike strujanja vjetra u nižim slojevima atmosfere (koji odgovaraju visinama kretanja pješaka) koristeći RANS modele turbulencije potrebno je što realnije reproducirati stvarno atmosfersko strujanje, te je stoga nužno pravilno modelirati karakteristike homogenog atmosferskog graničnog sloja (brzinu strujanja i turbulenciju). U jednom od prvih radova na tu temu, [21], izvedeni su ulazni profili za osrednjenu brzinu, kinetičku energiju turbulencije i disipaciju kinetičke energije turbulencije koji u kombinaciji sa smičnim naprezanjem zadanim na gornjem rubu računalne domene i zidnom funkcijom koja u obzir uzima hrapavost zidne stijenke

osiguravaju homogeno strujanje atmosferskog graničnog sloja. Takva konfiguracija računalnog modela rezultira konstantnom raspodjelom kinetičke energije turbulencije i smičnog naprezanja po visini računalne domene, kao i nultim gradijentom tlaka u domeni. Takvo atmosfersko strujanje se stoga naziva atmosferski granični sloj pogonjen smičnim naprezanjem (engl. *shear stress-driven atmospheric boundary layer*). U [22] je predložena mogućnost generiranja homogenog atmosferskog graničnog sloja pogonjenog gradijentom tlaka (engl. *pressure-driven atmospheric boundary layer*). To se može ostvariti zadavanjem predloženih ulaznih profila osrednjene brzine, kinetičke energije turbulencije i disipacije kinetičke energije turbulencije koji će uz zadani Neumannov rubni uvjet turbulencije na gornjoj površini računalne domene osigurati homogenost strujanja u računalnoj domeni. Za razliku od računalne konfiguracije predložene u [21], dobiveni profili kinetičke energije turbulencije i smičnog naprezanja opadaju s porastom visine. U [23] i [24] je pokazano kako se homogeni atmosferski granični sloj može generirati korištenjem dodane masene sile ugrađene u jednadžbu količine gibanja. Takav atmosferski granični sloj se naziva homogeni atmosferski granični sloj pogonjen masenom silom (engl. *body force-driven atmospheric boundary layer*). Prednost takvog pristupa je mogućnost eksplicitnog generiranja sile otpora strujanju (smičnog naprezanja), što je posebno važno za pravilno modeliranje homogenog atmosferskog graničnog sloja.

### 1.3. Cilj rada

Cilj rada je računalno modeliranje strujanja vjetra (homogenog atmosferskog graničnog sloja) oko zgrade s izdignutim stambenim dijelom zgrade, pri čemu je koeficijent ugode glavni parametar karakterizacije strujanja oko zgrade. U radu se analizira utjecaj načina generiranja homogenog atmosferskog graničnog sloja na koeficijent ugode u području oko jezgre izdignute zgrade. Pritom se ispituju dva tipa ulaznih profila, tj. ulazni profili za homogeni atmosferski granični sloj pogonjen smičnim naprezanjem, ([21]) i homogeni atmosferski granični sloj pogonjen gradijentom tlaka ([22]). Utjecaj tih ulaznih profila se analizira na petnaest različitih konfiguracija zgrade [20] koje uključuju različite dimenzije zgrade (visinu, širinu i dubinu), oblike nosivog dijela zgrade (jezgre), te kutove nastrujavanja vjetra na zgradu. Računalna analiza strujanja provedena je u programskom paketu otvorenog koda OpenFOAM® (distribucija foam-extend 3.2).

## 2. KARAKTERISTIKE ATMOSFERSKOG GRANIČNOG SLOJA

### 2.1. Atmosfersko strujanje

Strujanje zraka u atmosferi naziva se vjetar. Uzrok strujanja zraka su razlike tlaka u atmosferi te Coriolisove sile uslijed Zemljine rotacije, a sama pojava strujanja zraka utječe na raspodjelu zraka u atmosferi. Kako su strujanje zraka i raspodjela tlaka u atmosferi ovisni jedno o drugom, spomenute pojave ne mogu se promatrati odvojeno.

Strujanje u atmosferi je skup različitih primjera turbulentnog strujanja koji su međusobno neovisni u vremenu i prostoru. Takva strujanja mogu biti kratkotrajne turbulencije (vrtlozi veličine nekoliko metara) i trajanja par minuta pa do velikih oluja i strujanja u višim slojevima atmosfere koja se mogu prostirati čitavom površinom planete, a mogu trajati i do nekoliko dana [25].

U svrhu procjene strujanja u atmosferskom graničnom sloju, koriste se brzina i smjer vjetera na visini od oko  $z = 1$  km jer se pri visinama tog reda veličine može zanemariti utjecaj površine planete. Tada se strujanje zraka, ukoliko nema lokalne pojave visokog ili niskog tlaka, može smatrati jednodimenzijskim, a ovisi isključivo o horizontalnom gradijentu tlaka i utjecaju Coriolisove sile.

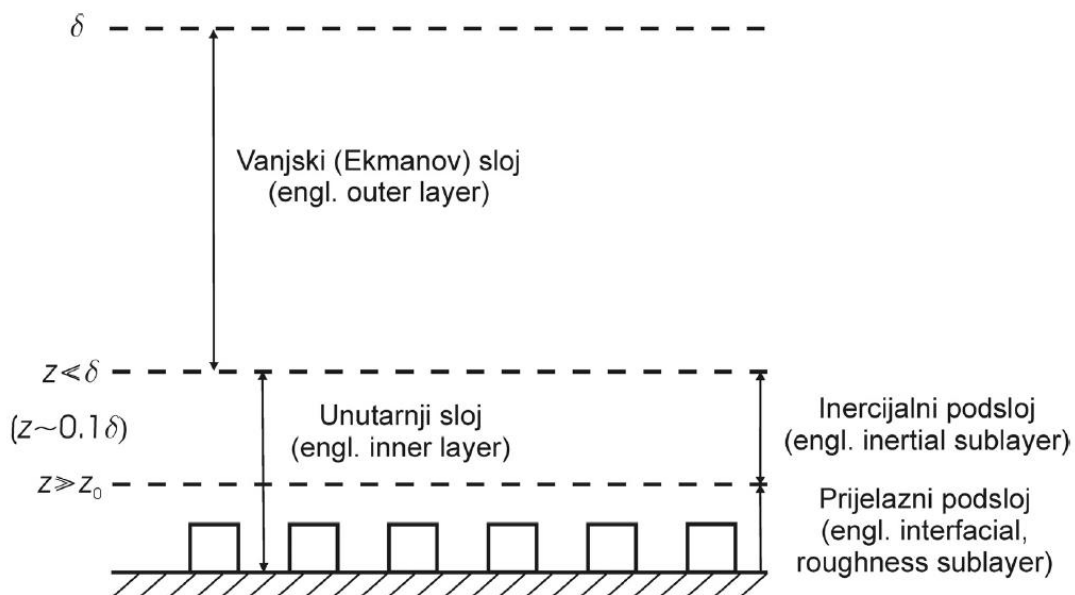
### 2.2. Atmosferski granični sloj

Atmosferski granični sloj je najniži sloj Zemljine atmosfere čija su svojstva u direktnoj interakciji s površinom Zemlje. Često se iz navedenog razloga atmosferski granični sloj u literaturi definira i kao sloj zraka u blizini površine unutar kojeg efekti na površini (trenje, izmjena topline) uzrokuju promjenu količine gibanja, energije i mase turbulentnim strujanjem reda veličine debljine graničnog sloja ili manje, a traju kraće od jednog dana [26].

U ovom radu promatrat će se homogeni atmosferski granični sloj gdje će sve fizikalne i turbulentne veličine biti neovisne o vremenu i uniformne u smjeru strujanja. Homogeni atmosferski granični sloj je teorijski granični sloj koji se javlja pri strujanju iznad beskonačno duge i ravne površine. Pretpostavkom homogenosti u horizontalnom smjeru pretpostavlja se i uvjet stacionarnosti strujanja čime su sve veličine neovisne o vremenu što znatno pojednostavljuje matematički model.

### 2.2.1. Struktura atmosferskog graničnog sloja

Atmosferski sloj se dijeli na prizemni (unutarnji, engl. *inner layer*) i vanjski ili Ekmanov sloj (engl. *outer layer*), a unutarnji se dalje dijeli na inercijalni podsloj (engl. *inertial sublayer*) te prijelazni podsloj (engl. *interfacial or roughness sublayer*). Svaki od navedenih slojeva ima drukčije turbulentne karakteristike strujanja. Na strujanje u unutarnjem sloju najznačajnije utječe površina Zemlje, a Coriolisova sila zanemarivog je utjecaja. Strujanje u vanjskom sloju bitno se razlikuje od onog u unutarnjem sloju jer je pod dominantnim utjecajem Coriolisove sile. U ovom radu će se računalno modelirati unutarnji dio atmosferskog graničnog sloja kod kojeg je dominantan utjecaj površine, a utjecaj ostalih sila se zanemaruje.



Slika 2 Podjela atmosferskog graničnog sloja [25]

Strujanje u unutarnjem sloju proteže se do približno  $z = 100$  m, što iznosi 10 do 15 % debljine atmosferskog graničnog sloja. U inercijalnom podsloju je brzina promjene mase, količine gibanja i energije najviše uzrokovana turbulentnim naprežanjem, a utjecaj molekularne difuzije se može zanemariti. U prijelaznom podsloju brzina promjene mase, količine gibanja i energije najviše ovisi o molekularnoj difuziji, a hrapavost površine zapravo je uzrok turbulentnog strujanja opisanih karakteristika. Prijelazni podsloj se proteže do visine malo više od visine objekata koji su smješteni u području strujanja.

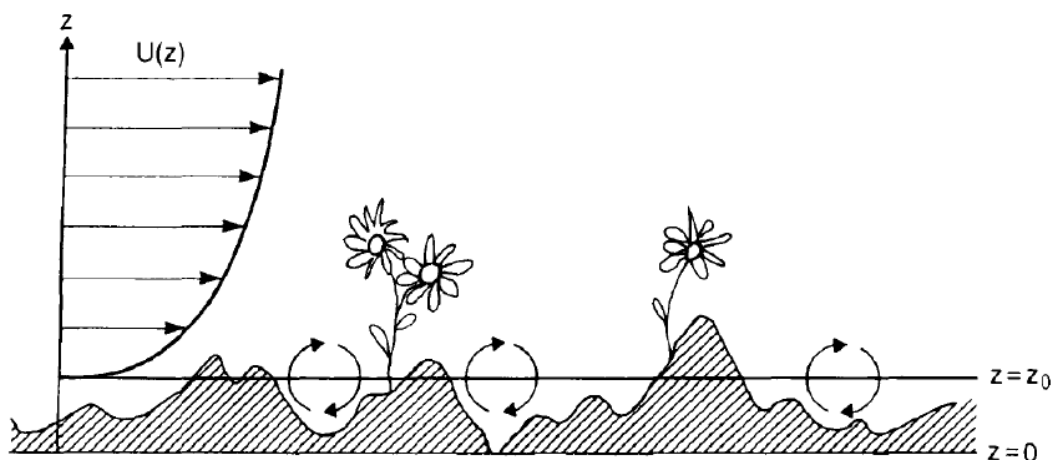
Prosječna debljina atmosferskog graničnog sloja  $\delta$  je približno jednaka  $\delta = 600$  m za svaki tip terena. Postoje još dvije važne veličine koje opisuju atmosferski granični sloj, a to su visina iznad podloge  $z$  i aerodinamička duljina hrapavosti  $z_0$ . Podjelu atmosferskog graničnog sloja prikazuje Slika 2.

### Aerodinamička duljina hrapavosti $z_0$

Aerodinamička duljina hrapavosti  $z_0$  se može definirati kao visina iznad površine gdje je srednja brzina strujanja jednaka nuli ( $z = 0$ ,  $u(z) = 0$ ). Može se definirati i kao veličina vrtloga koji su formirani zbog interakcije između površine i zraka koji struji iznad nje (Slika 3). Tablica 1 prikazuje različite vrijednosti aerodinamičke duljine hrapavosti  $z_0$  koje su dobivene mjerenjima.

**Tablica 1** Vrijednosti aerodinamičke duljine hrapavosti  $z_0$  za različite tipove terena [28]

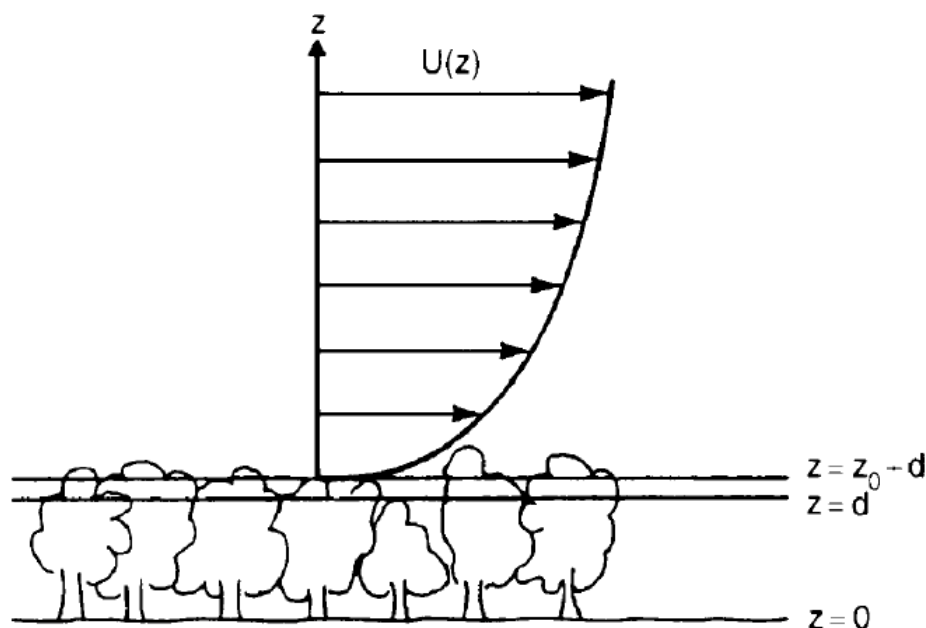
$z_0$ (m)	Tip terena
$10^{-5}$	Glatke ledene površine
$10^{-4}$	Otvoreno mirno more
$10^{-3}$	Priobalna područja
0,01	Otvorena polja s rijetkom vegetacijom i malo građevinskih objekata
0,05	Poljoprivredna područja s malo građevinskih objekata
0,3	Sela i poljoprivredna područja s više građevinskih objekata
1 – 10	Urbana područja



**Slika 3** Prikaz aerodinamičke duljine hrapavosti  $z_0$  [28]

### Debljina istisnuća atmosferskog graničnog sloja $d$

Pri strujanju zraka nad površinama s gusto raspoređenim objektima površinske hrapavosti (stambene četvrti, šume, itd.), atmosferski granični sloj biva istisnut u vertikalnom smjeru. U takvim slučajevima se u obzir mora uzeti debljina istisnuća atmosferskog graničnog sloja  $d$ , a uobičajeno je uzeti da je jednaka visini objekata površinske hrapavosti. Slika 4 prikazuje formiranje novog graničnog sloja na visini koja je jednaka razlici aerodinamičke duljine hrapavosti i debljine istisnuća ( $z_0 - d$ ).



Slika 4 Formiranje atmosferskog graničnog sloja pri strujanju zraka iznad površine s gusto raspoređenim objektima površinske hrapavosti [28]

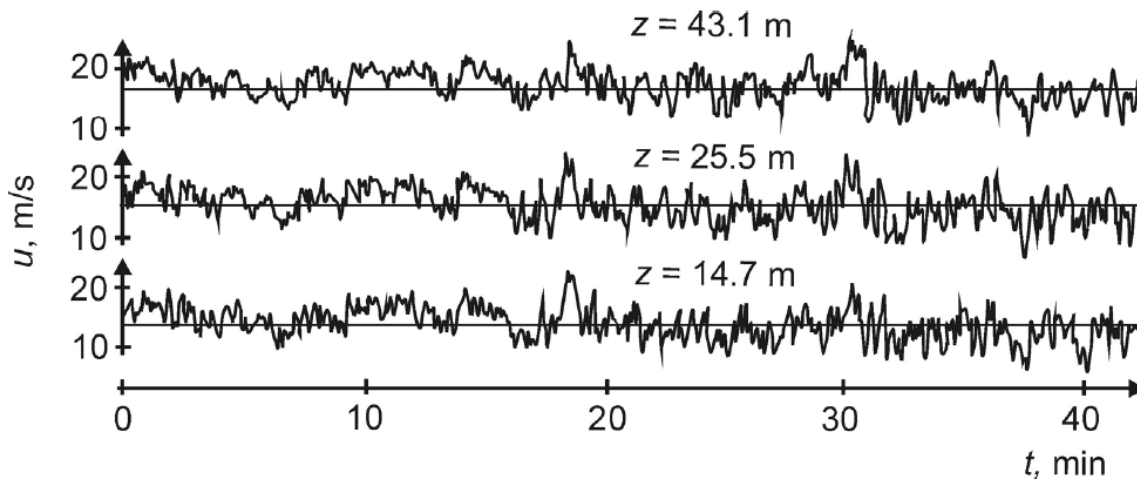
#### 2.2.2. Struktura strujanja u atmosferskom graničnom sloju

Kako je strujanje u atmosferskom graničnom sloju turbulentno, brzine se mogu definirati Reynoldsovim osrednjavanjem kao:

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u', \\ v &= \bar{v} + v', \\ w &= \bar{w} + w', \end{aligned} \tag{2.1}$$

gdje  $\bar{u}$  predstavlja osrednjenu brzinu strujanja vjetra u horizontalnom smjeru,  $\bar{v}$  u lateralnom te  $\bar{w}$  u okomitom smjeru. Veličine  $u'$ ,  $v'$  i  $w'$  predstavljaju pulsirajući dio brzine. Najčešće je brzina u horizontalnom smjeru  $\bar{u}$  znatno veća od druge dvije

komponente pa se one mogu i zanemariti, a to znači da brzine  $\bar{u}$  i  $u'$  najviše utječu na sile uzrokovane strujanjem. Slika 5 prikazuje brzine mjerene na tri različite visine unutar atmosferskog graničnog sloja.



Slika 5 Prikaz mjenjenih i osrednjenih brzina na tri različite visine  $z$  unutar atmosferskog graničnog sloja [26]

### 2.2.3. Empirijske relacije za modeliranje atmosferskog graničnog sloja

Prilikom analize strujanja u stacionarnom homogenom atmosferskom graničnom sloju, najčešće se koriste matematički izrazi za koje se pokazalo da se dobro poklapaju s podacima mjenjenim u prirodi.

#### Logaritamski zakon

Logaritamski zakon se često koristi za modeliranje prvih 10% debljine atmosferskog graničnog sloja. Za definiranje zakona u obzir se uzima samo površinska hrapavost, a formulacija zakona glasi

$$\bar{u} = u_{\tau} \cdot \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right), \quad (2.2)$$

gdje  $u_{\tau}$  predstavlja brzinu trenja,  $d$  predstavlja debljinu istisnuća atmosferskog graničnog sloja, a  $\kappa$  predstavlja von Kármán-ovu konstantu čiji iznos u literaturi varira između 0,38 i 0,41.



Brzina trenja se računa kao

$$u_T = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}, \quad (2.3)$$

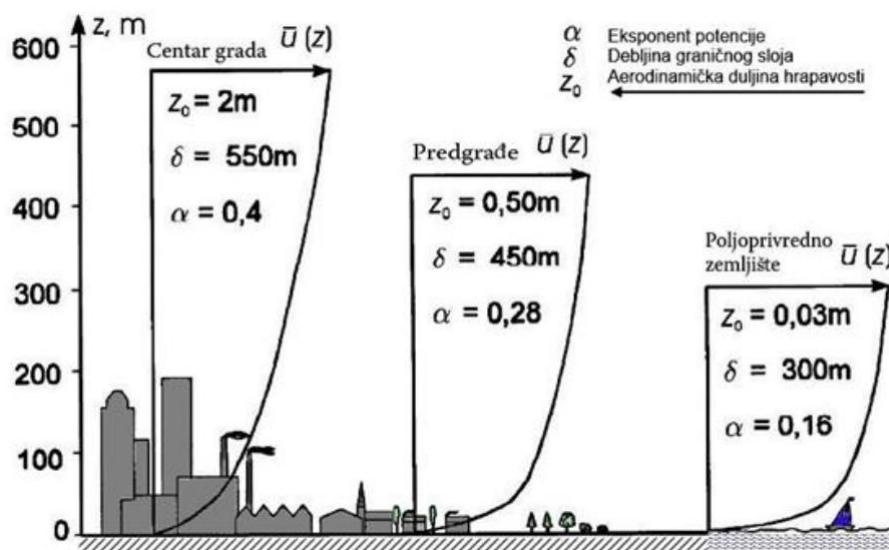
gdje je  $\tau_0$  smično naprezanje na površini, a  $\rho$  gustoća fluida.

### Zakon potencije

Zakon potencije vrijedi kroz čitavu debljinu atmosferskog graničnog sloja, a matematička formulacija zakona potencije glasi:

$$\bar{u} = \bar{u}_{\text{ref}} \cdot \left( \frac{z-d}{z_{\text{ref}}-d} \right)^\alpha. \quad (2.4)$$

Varijabla  $d$  predstavlja debljinu istisnuća atmosferskog graničnog sloja, a  $\bar{u}_{\text{ref}}$  predstavlja referentnu brzinu na referentnoj visini  $z_{\text{ref}}$ . Eksponent  $\alpha$  je funkcija aerodinamičke duljine hrapavosti  $z_0$ . Slika 6 prikazuje profile atmosferskog graničnog sloja koji su dobiveni zakonom potencije za strujanje nad tri različita tipa terena (urbani - centar grada, suburbani - predgrađe i ruralni - poljoprivredno zemljište).



Slika 6 Profili homogenog atmosferskog graničnog sloja dobiveni zakonom potencije za strujanje nad tri različita tipa terena [29]

### 3. MATEMATIČKI MODEL

U ovom poglavlju je dan pregled jednadžbi koje se koriste za računalno modeliranje strujanja u atmosferskom graničnom sloju, prema [27]. Prvo će se navesti opće jednadžbe mehanike kontinuuma pomoću kojih se modelira promatrano strujanje fluida, a u drugom dijelu poglavlja će se prikazati diskretizacija jednadžbi kojim one prelaze u oblik pogodan za numeričko rješavanje.

#### 3.1. Osnovne jednadžbe mehanike kontinuuma

U ovom radu se promatra nestlačivo izotermno strujanje koje se opisuje skupom parcijalnih diferencijalnih jednadžbi (Navier-Stokesove jednadžbe) koje glase:

- Jednadžba kontinuiteta

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \quad (3.1)$$

- Jednadžba količine gibanja

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{UU} = -\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}. \quad (3.2)$$

Jednadžba (3.1) predstavlja jednadžbu kontinuiteta kojom se polje brzine  $\mathbf{U}$  definira kao bezizvorno ili solenoidalno polje. Jednadžba kontinuiteta se može smatrati ograničenjem koje rješenje polja brzine mora zadovoljavati.

Jednadžba (3.2) predstavlja jednadžbu količine gibanja koja opisuje promjenu količine gibanja uslijed djelovanja masenih i površinskih sila na česticu fluida. Posljednji član u jednadžbi naziva se tenzor naprezanja  $\boldsymbol{\sigma}$ . Tenzor naprezanja je potrebno modelirati za što se koristi Newtonov zakon viskoznosti koji glasi

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\Sigma}, \quad (3.3)$$

gdje  $\boldsymbol{\Sigma}$  predstavlja simetrični tenzor viskoznih naprezanja, a član  $p\mathbf{I}$  predstavlja naprezanje uslijed djelovanja tlaka. Newtonov zakon viskoznosti uspostavlja linearnu vezu između simetričnog tenzora viskoznih naprezanja i tenzora brzine deformacije. Pretpostavi li se da su fluidu svojstva izotropna, tenzor  $\boldsymbol{\Sigma}$  tada glasi

$$\boldsymbol{\Sigma} = \mu(\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{U})\mathbf{I}. \quad (3.4)$$

Iz jednadžbe (3.1) se jasno da zaključiti kako je drugi dio jednadžbe (3.4) jednak nuli za nestlačivo strujanje pa izraz za tenzor  $\Sigma$  konačno glasi

$$\Sigma = \mu(\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T). \quad (3.5)$$

### 3.1.1. Vremenski osrednjene Navier-Stokesove (RANS) jednadžbe

Osrednjavanje Navier-Stokesovih jednadžbi se temelji na Reynoldsovoj dekompoziciji. Fizikalne veličine se rastavljaju na osrednjeni dio koji ne ovisi o vremenu te na dio koji je vremenski ovisan. Ako se Reynoldsova dekompozicija provede na poljima tlaka  $p$  i brzine  $\mathbf{U}$ , dobit će se jednadžbe

$$\mathbf{U}(\mathbf{x}, t) = \bar{\mathbf{U}}(\mathbf{x}) + \mathbf{U}'(\mathbf{x}, t), \quad (3.6)$$

$$p(\mathbf{x}, t) = \bar{p}(\mathbf{x}) + p'(\mathbf{x}, t). \quad (3.7)$$

Nakon uvrštavanja dekompoziranih izraza za polja brzine (3.6) i tlaka (3.7) u jednadžbu kontinuiteta (3.1) i jednadžbu količine gibanja (3.2) umjesto odgovarajućih članova, dobiva se konačan oblik osrednjenih Navier-Stokesovih (RANS) jednadžbi oblika

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{U}} = 0, \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{U}}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\mathbf{U}}\bar{\mathbf{U}} = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\nu(\nabla \bar{\mathbf{U}} + \nabla \bar{\mathbf{U}}^T)) - \nabla \cdot \overline{\mathbf{U}'\mathbf{U}'}. \quad (3.9)$$

Posljednji član u jednadžbi (3.9) potrebno je, poput tenzora naprezanja  $\sigma$ , modelirati. Navedeni član predstavlja divergens Reynoldsovog tenzora naprezanja, a modelira se pomoću Boussinesqove aproksimacije te se zapisuje kao

$$-\overline{\mathbf{U}'\mathbf{U}'} = \nu_T(\nabla \bar{\mathbf{U}} + \nabla \bar{\mathbf{U}}^T) - \frac{2}{3}k\mathbf{I}, \quad (3.10)$$

gdje  $\nu_T$  predstavlja turbulentnu viskoznost koja se mora modelirati nekim od modela turbulencije, a  $k$  predstavlja kinetičku energiju turbulencije koja se računa kao

$$k = \frac{1}{2} \overline{\mathbf{U}' \cdot \mathbf{U}'}. \quad (3.11)$$

Turbulentna viskoznost  $\nu_T$  je kod realnih turbulentnih strujanja nekoliko redova veličine veća od fizikalne kinematske viskoznosti  $\nu$ . Treba spomenuti kako turbulentna viskoznost nije fizikalna veličina već vrijednost koja služi za opisivanje turbulencije te se modelira kao funkcija uvjeta strujanja.

Nakon primjene Boussinesqove aproksimacije slijedi konačan oblik RANS jednadžbi

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{U}} = 0, \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{U}}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\mathbf{U}}\bar{\mathbf{U}} = -\frac{1}{\rho} \nabla p_{\text{eff}} + \nabla \cdot \left( \nu_{\text{eff}} (\nabla \bar{\mathbf{U}} + \nabla \bar{\mathbf{U}}^T) \right), \quad (3.13)$$

gdje je  $p_{\text{eff}}$  efektivni tlak, a  $\nu_{\text{eff}}$  efektivna viskoznost, a definiraju se kao

$$p_{\text{eff}} = \bar{p} + \frac{2}{3} k, \quad (3.14)$$

$$\nu_{\text{eff}} = \nu + \nu_T. \quad (3.15)$$

### 3.1.2. Modeliranje turbulencije

Korištenjem Reynoldsovog osrednjavanja na skup parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koje opisuju nestlačivo strujanje, u jednadžbi (3.9) se jasno vidi kako je samo posljednji član ovisan o vremenu. Iz konačnog oblika RANS jednadžbi (3.12) - (3.15) se nazire osnovna zadaća modela turbulencije, a to je definiranje funkcije koja računa turbulentnu viskoznost. U ovom radu je korišten standardni  $k - \varepsilon$  model turbulencije te će se u ovom poglavlju dati pregled jednadžbi tog modela. Standardni  $k - \varepsilon$  model turbulencije je opisan s dvije parcijalne diferencijalne jednadžbe gdje prva jednadžba predstavlja transportnu jednadžbu za disipaciju kinetičke energije turbulencije  $\varepsilon$ , a druga predstavlja transportnu jednadžbu za kinetičku energiju turbulencije  $k$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\mathbf{U}}\varepsilon - \nabla \cdot \left( \left( \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \nabla \varepsilon \right) = C_1 \cdot \frac{P_\varepsilon}{k} - C_2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \bar{\mathbf{U}}k - \nabla \cdot \left( \left( \frac{\nu_T}{\sigma_k} + \nu \right) \nabla k \right) = P - \varepsilon. \quad (3.17)$$

Disipacija kinetičke energije turbulencije  $\varepsilon$  je definirana kao

$$\varepsilon = \overline{\mathbf{U}'\mathbf{U}':\nabla\mathbf{U}'}, \quad (3.18)$$

Gdje se izvorski član  $P$  (produkcija kinetičke energije turbulencije) modelira izrazom

$$P = 2\nu_T \frac{(\nabla \bar{\mathbf{U}} + \nabla \bar{\mathbf{U}}^T)}{2} : \frac{(\nabla \bar{\mathbf{U}} + \nabla \bar{\mathbf{U}}^T)}{2}. \quad (3.19)$$

Izraz za turbulentnu kinematičku viskoznost  $\nu_T$  glasi:

$$\nu_T = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (3.20)$$

Tablica 2 prikazuje standardne koeficijente  $k - \varepsilon$  modela turbulencije.

**Tablica 2** Standardni koeficijenti  $k - \varepsilon$  modela turbulencije

$C_\mu$	$C_1$	$C_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0,09	1,44	1,92	1	1,3

### 3.1.3. Modeliranje turbulencije u blizini zida

Za inženjerske potrebe najčešće nije potrebno riješiti cjelokupnu sliku strujanja uz stijenku (zid) već postoji zahtjev za veličinama koje opisuju utjecaj promatrane stijene na strujanje i obratno (otpor strujanju, površinsko naprezanje, itd.). Modeliranje turbulencije uz zid se provodi primjenom zidnih funkcija s ciljem da se umanje potrebne rezolucije (veličine) mreže, a time i potrebno računalno vrijeme rješavanja sustava jednadžbi koje opisuju promatrano strujanje. Naravno, postoje i modeli koji u potpunosti rješavaju strujanje uz stijenku (Low-Reynolds modeli), ali se najčešće ne koriste u industriji iz prethodno navedenih razloga.

Turbulentno strujanje uz zid se općenito dijeli na tri osnovna područja:

- Viskozni podsloj  $y^+ < 5$

U viskoznom podsloju dominiraju efekti molekularne viskoznosti  $\nu$  (nekoliko redova veličine su dominantniji od efekata turbulentne viskoznosti) pa se efekti turbulencije mogu zanemariti.

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

U prijelaznom podsloju su molekularna i turbulentna viskoznost od istog utjecaja.

- Inercijalni podsloj  $y^+ > 30$

U inercijalnom podsloju dominiraju efekti turbulencije te se utjecaj viskoznosti može zanemariti.

## Standardna zidna funkcija

Zidne funkcije koriste empirijske relacije kako bi opisale strujanje uz stijenku. Korištenjem zidnih funkcija moguće je izraziti osrednjenu brzinu usporednu sa stijenkom i parametre turbulencije van viskoznog podsloja u ovisnosti o udaljenosti od stijenke. Kako bi se zidne funkcije mogle primijeniti centar volumena uz stijenku se mora nalaziti u inercijskom podsloju. Na taj način se može koristiti zakon zida za definiranje rubnih uvjeta disipacije kinetičke energije turbulencije  $\varepsilon$  i kinetičke energije turbulencije  $k$ .

Osnovni oblik standardne zidne (Slika 7) funkcije glasi

$$u^+ = \frac{\bar{u}_t}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) + B, \quad (3.21)$$

gdje  $\bar{u}_t$  predstavlja osrednjenu brzinu strujanja usporednu sa zidom,  $\kappa$  je Kármánova konstanta,  $B$  je empirijska konstanta koja ovisi o debljini viskoznog podsloja,  $E$  je parametar hrapavosti podloge, a  $u_\tau$  je brzina trenja koja se definira kao

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}. \quad (3.22)$$

Bezdimenzijska udaljenost od zida  $y^+$  definira se izrazom

$$u_\tau = \frac{u_\tau \cdot y}{\nu}, \quad (3.23)$$

gdje  $y$  predstavlja dimenzijsku udaljenost od zida.

U OpenFOAM®-u je granična vrijednost  $y^+ = 11,6$ , pa ako je vrijednost  $y^+$  viša od 11,6 koristi se zidna funkcija, a ukoliko je vrijednost  $y^+$  manja od 11,6 koristi se linearan zakon ( $u^+ = y^+$ ). Ukoliko se zidna funkcija upotrebljava u području gdje je izračunati  $y^+$  manji od 11,6 može doći od velikih grešaka u rješenju.

Smično naprezanje na zidu se računa na sljedeći način

$$\tau_w = \frac{u_\tau \bar{u}_P \kappa}{\ln(Ey^+)}, \quad (3.24)$$

a uzme li se u obzir da se smično naprezanje na zidu može definirati kao

$$\tau_w = \nu \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)_w = \nu_{\text{eff}} \frac{\bar{u}_P}{y_P}, \quad (3.25)$$

efektivna se viskoznost (predstavlja zbroj molekularne i turbulentne viskoznosti) konačno može zapisati

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_{\tau} y_p \kappa}{\ln(Ey^+)}. \quad (3.26)$$

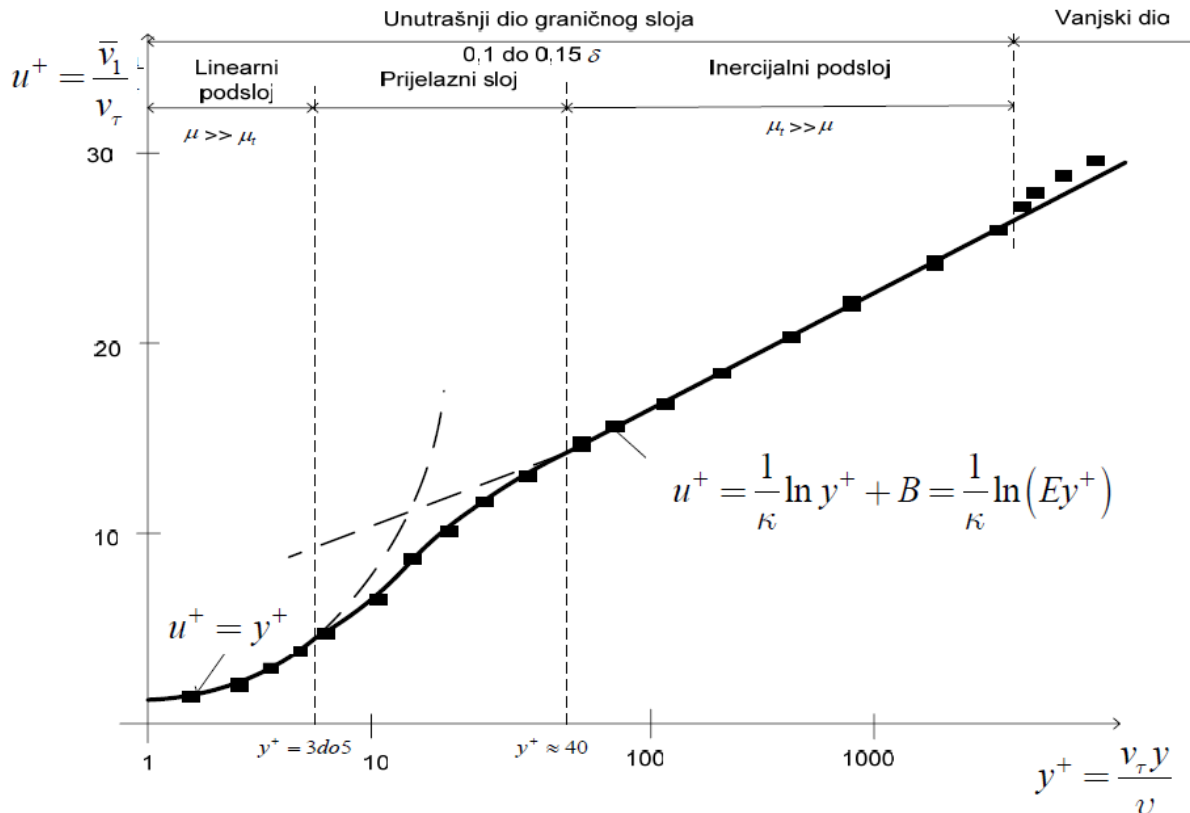
Smično naprežanje se može definirati i kao

$$-\overline{u'v'} = \tau_w = \frac{\tau_w}{\rho} = u_{\tau}^2, \quad (3.27)$$

te se produkcija kinetičke energije turbulencije tada definira

$$\varepsilon = P = -\overline{u'v'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \frac{u_{\tau}^3}{\kappa y}. \quad (3.28)$$

Pretpostavlja se jednakost disipacije turbulencije i produkcije turbulencije (prema direktnim numeričkim simulacijama koje su na to ukazale u području inercijskog podsloja gdje je  $y^+ \approx 50$ ), a svi gradijenti osim  $\partial \bar{u} / \partial y$  se zanemaruju.



Slika 7 Shematski prikaz bezdimenzijske brzine u ovisnosti o bezdimenzijskoj udaljenosti od zida [34]

Nadalje se može pisati

$$-\overline{u'v'} = \nu_T \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \cdot \frac{u_\tau}{\kappa y}. \quad (3.29)$$

Konačan izraz za disipaciju kinetičke energije turbulencije u blizini zida glasi

$$\varepsilon_P = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}}}{\kappa y_P}. \quad (3.30)$$

Kada se izraz (3.30) koristi kao rubni uvjet na zidu za disipaciju kinetičke energije turbulencije  $\varepsilon$ , Neumannov rubni uvjet se može koristiti za kinetičku energiju turbulencije  $k$ . Izvorski član u prvom volumenu uz stijenkku se može izračunati tako da se pronađe njegova srednja vrijednost u polovini volumena, te uz pretpostavku da je  $\tau_w$  konstantan po čitavom volumenu slijedi izraz

$$\bar{P} = \frac{1}{y_P} \int_0^{y_P} \tau_w \cdot \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} dy = \tau_w \cdot \frac{\bar{u}_P}{y_P}. \quad (3.31)$$

Produksijski član se tada može izračunati iz izraza

$$P_P = \nu_T \frac{C_\mu^{\frac{1}{4}} k_P^{\frac{3}{2}}}{\kappa y_P} \frac{\partial \bar{u}(y_P)}{\partial y}, \quad (3.32)$$

a izraz za  $y^+$

$$y_P^+ = \frac{C_\mu^{\frac{1}{4}} k_P^{\frac{1}{2}} y_P}{\nu}. \quad (3.33)$$

U području viskoznog podsloja, gdje zidna funkcija nije valjana, koristi se linearna funkcija oblika

$$y^+ = \frac{\bar{u}}{u_\tau}, \quad (3.34)$$

a smično naprezanje u viskoznom podsloju se definira kao

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \nu_{\text{eff}} \frac{\bar{u}_P}{y_P}. \quad (3.35)$$



U prijelaznom području ne vrijede ni zidna funkcija ni linearna funkcija. Upravo zbog toga OpenFOAM® koristi linearnu funkciju do vrijednosti  $y^+$  od 11,6, a za vrijednosti veće od 11,6 koristi zidne funkcije.

### Zidna funkcija modificirana za hrapavost

U ovom se radu atmosferski granični sloj uz zid modelira hrapavom zidnom funkcijom koja se temelji na aerodinamičkoj duljini hrapavosti  $z_0$  prema Richardsu i Hoxeyu [21]. Disipacija kinetičke energije turbulencije u centru volumena uz zidnu stijenu  $\varepsilon_p$  se računa koristeći brzinu trenja  $u_\tau$

$$\varepsilon_p = \frac{u_\tau^3}{\kappa(z_p + z_0)}, \quad (3.36)$$

gdje se brzina trenja računa koristeći vrijednosti kinetičke energije turbulencije u centru volumena uz zid  $k_p$

$$u_\tau = \sqrt[4]{C_\mu \sqrt{k_p}}. \quad (3.37)$$

Produkcija turbulencije u centru volumena uz zid  $P_p$  određuje se iz vrijednosti iznosa derivacije brzine u centru prvog volumena uz zid

$$P_p = \tau_w \left( \frac{d\bar{u}}{dz} \right)_p, \quad (3.38)$$

a smično se naprezanje na zidu modelira kao

$$\frac{\tau_w}{\rho} = \frac{\bar{u} u_\tau \kappa}{\ln \left( \frac{z_p + z_0}{z_0} \right)}, \quad (3.39)$$

gdje je  $\bar{u}_p = \bar{u}(z_p)$  iznos brzine u centru volumena uz zidnu stijenu.

### 3.2. Diskretizacija matematičkog modela

Matematički model je opisan RANS jednadžbama, (3.12) i (3.13), te jednadžbama standardnog  $k - \varepsilon$  modela turbulencije. Matematički model definiraju parcijalne diferencijalne jednadžbe za koje ne postoje analitička rješenja te se upravo iz tog razloga pribjegava numeričkim metodama rješavanja.

Najkorištenija numerička metoda u analizi problema mehanike fluida je metoda konačnih volumena. Metoda se temelji na integriranju transportnih jednadžbi koje se potom prevode u sustav linearnih algebarskih jednadžbi. Domena strujanja se dijeli na veliki broj konačnih volumena koji ju ispunjavaju ali se nikako ne smiju preklapati.

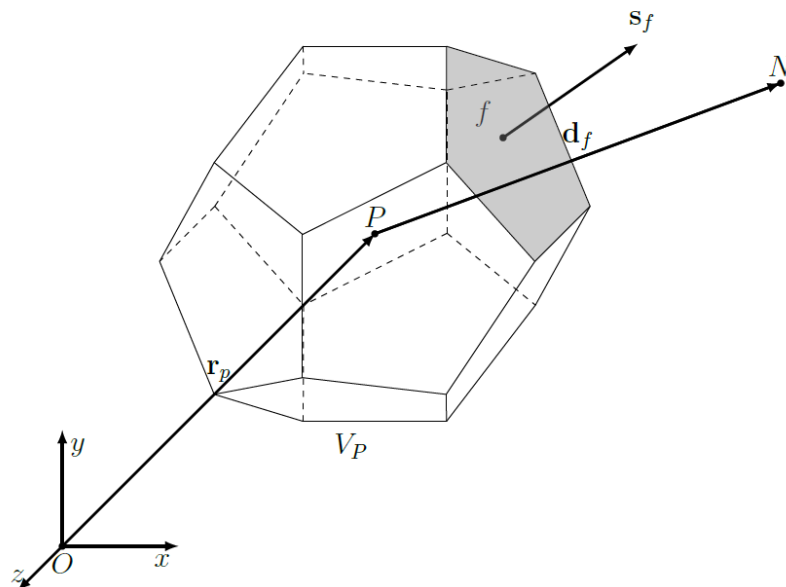
Jednadžbe matematičkog modela oblika su opće konvekcijsko-difuzijske jednadžbe oblika

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \Phi) - \nabla \cdot (\rho \Gamma_{\Phi} \nabla \Phi) = S_{\Phi}(\Phi), \quad (3.40)$$

gdje prvi član s lijeve strane označava lokalnu promjenu fizikalnog svojstva, drugi član s lijeve strane označava konvektivni prijenos fizikalnog svojstva, treći član s lijeve strane predstavlja difuzijski prijenos fizikalnog svojstva, a član s desne strane predstavlja izvor fizikalnog svojstva.

Kako primjena ove metode zahtjeva integralni oblik diferencijalne jednadžbe, jednadžba (3.40) će biti zadovoljena po kontrolnom volumenu  $V_P$  i oko točke P težišta tog volumena, čiji je vektor položaja  $\mathbf{r}_P$  definiran

$$\mathbf{r}_P = \int_{V_P} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_P) dV = 0. \quad (3.41)$$



Slika 8 Prikaz proizvoljnog konačnog volumena [24]

Uzme li se pretpostavka konstantne gustoće (nestlačivo strujanje) u obzir, tada jednadžba (3.40) u integralnom obliku glasi

$$\int_V \frac{\partial \Phi}{\partial t} dV + \oint_S \Phi (\mathbf{n} \cdot \mathbf{U}) dS - \oint_S \Gamma_\Phi \mathbf{n} \cdot (\nabla \Phi)_P dS = \int_V S(\Phi) dV. \quad (3.42)$$

Kako bi se članovi diskretizirali metodama drugog reda točnosti, diskretizacija prostornih i vremenskih članova se mora provesti linearnim funkcijama.

Općenita prostorna promjena fizikalnog svojstva oko težišta kontrolnog volumena P se može definirati kao

$$\Phi(x) = \Phi(x_P) + (x - x_P) \cdot (\nabla \Phi)_P = \Phi_P + (x - x_P) \cdot (\nabla \Phi)_P, \quad (3.43)$$

a vremenska promjena se može definirati kao

$$\Phi(t + \Delta t) = \Phi(t) + \Delta t \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)^t = \Phi^t + \Delta t \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)^t. \quad (3.44)$$

Koristeći jednadžbu (3.43), volumni integral se može zapisati kao

$$\int_V \Phi dV = \Phi_P V_P, \quad (3.45)$$

a površinski integral se može rastaviti na sumu po plohama kontrolnog volumena

$$\oint_S \mathbf{n} \Phi dS = \sum_f \mathbf{s}_f \Phi_f, \quad (3.46)$$

gdje je  $\mathbf{s}_f$  površinski vektor definiran u težištu plohe kontrolnog volumena (Slika 8), a iznosa je površine plohe kontrolnog volumena

$$\mathbf{s}_f = \int_{S_f} \mathbf{n} dS. \quad (3.47)$$

Težište plohe kontrolnog volumena se definira slično kao i težište kontrolnog volumena

$$\int_{S_f} (x - x_f) dS = 0. \quad (3.48)$$

### 3.2.1. Diskretizacija prostornih članova

Operatori gradijenta, divergensa te konvekcijski, difuzijski i izvorski članovi se smatraju prostornim članovima čiji će se postupak diskretizacije opisati.

Operator gradijenta se najčešće diskretizira pomoću Gaussovog teorema

$$\int_V \nabla \Phi dV = \oint_{\partial V} \Phi ds, \quad (3.49)$$

gdje je vektor  $\mathbf{s}$  definiran kao

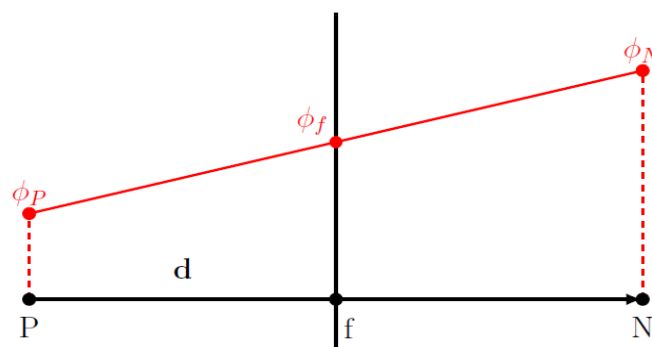
$$\mathbf{s} = \mathbf{n}dS. \quad (3.50)$$

Konačan izraz za računanje operatora gradijenta, uzevši u obzir i jednadžbu (3.46), glasi

$$\oint_S \mathbf{n}\Phi dS = \sum_f \mathbf{s}_f \Phi_f. \quad (3.51)$$

Preostaje odrediti vrijednost polja  $\Phi$  na plohama kontrolnog volumena, što se izvodi korištenjem linearne interpolacije:

$$\Phi_f = t\Phi_P + (1-t)\Phi_N. \quad (3.52)$$



Slika 9 Prikaz primjene linearne interpolacije za određivanje vrijednosti  $\Phi$  na plohama kontrolnog volumena [27]

Veličina  $\Phi_P$  predstavlja vrijednost promatrane varijable u središtu promatranog volumena, a veličina  $\Phi_N$  predstavlja vrijednost promatrane varijable u susjednom volumenu.

Faktor  $t$  predstavlja faktor linearne korekcije, Slika 9:

$$t = \frac{\overline{fN}}{\overline{PN}} \quad (3.53)$$

### Diskretizacija konvekcijskog člana

Konvekcijski član predstavlja transport fizikalnih veličina uslijed strujanja fluida, odnosno postojanja brzine (može se tvrditi i uslijed promjene položaja u prostoru). Diskretizacija člana se izvodi na sljedeći način

$$\oint_S \Phi(\mathbf{n} \cdot \mathbf{U}) dS = \sum_f \Phi_f(\mathbf{s}_f \cdot \mathbf{U}_f) = \sum_f \Phi_f F, \quad (3.54)$$

gdje je  $F$  protok kroz plohu kontrolnog volumena.

Veličina  $\Phi_f$  je vrijednost koju je potrebno odrediti na plohi kontrolnog volumena, što je moguće uraditi na više načina. Jedan od načina je shema centralnih razlika koja je objašnjena kod opisa računanja operatora gradijenta. Za određivanje vrijednosti  $\Phi_f$  može se koristiti i uzvodna shema koja uzima u obzir smjer strujanja fluida, a mogu se koristiti i sheme koje koriste limitere.

### Diskretizacija difuzijskog člana

Difuzijski član predstavlja transport fizikalnih veličina uslijed postojanja gradijenata u sustavu. Diskretizacija člana se izvodi na sljedeći način

$$\oint_S \Gamma_\phi \mathbf{n} \cdot (\nabla \Phi)_P dS = \sum_f (\Gamma_\phi)_f \mathbf{s}_f \cdot (\nabla \Phi)_f, \quad (3.55)$$

gdje se vrijednost koeficijenta difuzije  $(\Gamma_\phi)_f$  određuje koristeći linearnu interpolaciju (centralnu shemu) na plohi kontrolnog volumena.

Ukoliko je vektor  $\mathbf{d}_f$  u ravnini sa duljinom  $\overline{PN}$ , Slika 9, komponenta gradijenta iz jednačbe (3.55) u smjeru vektora  $\mathbf{d}_f$  se računa kao

$$\mathbf{s}_f \cdot (\nabla\Phi)_P = |\mathbf{s}_f| \frac{\Phi_N - \Phi_P}{|\mathbf{d}_f|}. \quad (3.56)$$

Ukoliko vektor  $\mathbf{d}_f$  nije u ravnini s duljinom  $\overline{PN}$ , potrebno je uraditi korekciju zbog neortogonalnosti, što se obično radi ukoliko su mreže konačnih volumena izrazito neortogonalne.

### Diskretizacija izvorskog i ponorskog člana

Članovi jednadžbe koji se ne mogu svrstati pod konvekcijske, difuzijske ili tranzijentne članove se smatraju izvorskim ili ponorskim članom. U općem slučaju izvorski član može biti funkcija prostora i vremena, a prije diskretizacije ih se linearizira

$$S_\Phi(\Phi) = S_u + S_p\Phi. \quad (3.57)$$

Član  $S_p$  je definiran kao

$$S_p = \frac{\partial S_\Phi(\Phi)}{\partial \Phi}. \quad (3.58)$$

Članovi  $S_u$  i  $S_p$  su funkcija varijable  $\Phi$ , te se diskretizacija člana izvodi na sljedeći način

$$\int_V S_\Phi(\Phi) dV = S_u V_P + S_p V_P \Phi_P. \quad (3.59)$$

### 3.2.2. Diskretizacija nestacionarnog (vremenskog) člana

Ovaj član opisuje brzinu promjene fizikalne veličine, a diskretizacija mu se svodi na uvođenje vremenskog koraka  $\Delta t$  čime se omogućava definiranje veze između novog i starog vremenskog koraka

$$t^{\text{new}} = t^{\text{old}} + \Delta t. \quad (3.60)$$

Na ovaj način se mogu definirati vrijednosti fizikalnih veličina u starom, odnosno novom vremenskom koraku

$$\Phi^o = \Phi(t^{\text{old}}), \quad (3.61)$$

$$\Phi^n = \Phi(t^{\text{new}}). \quad (3.62)$$

Diskretizirani oblik nestacionarnog člana glasi

$$\int_V \frac{\partial \Phi}{\partial t} dV = \frac{\Phi^n - \Phi^o}{\Delta t} V_P. \quad (3.63)$$

### 3.3. Algoritam rješavanja sustava Navier-Stokesovih jednadžbi

U ovom se radu promatra stacionarni homogeni atmosferski granični sloj te se u skladu s time koristio stacionarni rješavač baziran na SIMPLE algoritmu. U ovom poglavlju će se ukratko prikazati implementacija spomenutog algoritma u OpenFOAM®-u, računalnom paketu korištenom za računalne proračune.

#### 3.3.1. Diskretizirani sustav Navier-Stokesovih jednadžbi

Nakon provedbe opisane diskretizacije matematičkog modela, dobiva se sustav jednadžbi u kojem gradijent tlaka još nije diskretiziran

$$a_P \bar{\mathbf{U}}_P = \mathbf{H}(\bar{\mathbf{U}}) - \nabla p. \quad (3.64)$$

Iz jednadžbe (3.64) se izražava brzina

$$\bar{\mathbf{U}}_P = \frac{\mathbf{H}(\bar{\mathbf{U}})}{a_P} - \frac{1}{a_P} \nabla p, \quad (3.65)$$

koja se može interpolirati na plohama kontrolnog volumena

$$\bar{\mathbf{U}}_f = \left( \frac{\mathbf{H}(\bar{\mathbf{U}})}{a_P} \right)_f - \left( \frac{1}{a_P} \right)_f (\nabla p)_f. \quad (3.66)$$

Diskretizirana jednadžba kontinuiteta (3.12) glasi

$$\sum_f \mathbf{s} \cdot \bar{\mathbf{U}}_f = 0. \quad (3.67)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (3.66) u (3.67), dobiva se izraz za računanje gradijenta tlaka

$$\left( \frac{1}{a_P} \nabla p \right) = \nabla \cdot \left( \frac{\mathbf{H}(\bar{\mathbf{U}})}{a_P} \right) = \sum_f \mathbf{s} \cdot \left( \frac{\mathbf{H}(\bar{\mathbf{U}})}{a_P} \right)_f. \quad (3.68)$$

Konačan oblik diskretiziranog sustava Navier-Stokesovih jednadžbi glasi

$$a_P \bar{\mathbf{U}}_P = \mathbf{H}(\bar{\mathbf{U}}) - \sum_f S(p)_f, \quad (3.69)$$

$$\sum_f \mathbf{s} \cdot \left[ \left( \frac{1}{a_P} \right)_f (\nabla p)_f \right] = \mathbf{s} \cdot \left( \frac{\mathbf{H}(\bar{\mathbf{U}})}{a_P} \right)_f. \quad (3.70)$$

Protok  $F$  kroz plohe kontrolnog volumena, uzevši u obzir jednadžbu (3.66), glasi

$$\left( \frac{1}{a_P} \nabla p \right) = \nabla \cdot \left( \frac{\mathbf{H}(\bar{\mathbf{U}})}{a_P} \right) = \sum_f \mathbf{s} \cdot \left( \frac{\mathbf{H}(\bar{\mathbf{U}})}{a_P} \right)_f. \quad (3.71)$$

### 3.3.2. SIMPLE algoritam

Osnovna ideja algoritma je povezivanje polja brzine i polja tlaka, a bazira se na iterativnom rješavanju sustava lineariziranih jednadžbi. Princip algoritma (prema [30]) glasi

1. Preuzeti polja brzine i polja tlaka iz prethodne iteracije
2. Izračunati novo polje brzine koristeći podrelaksiranu jednadžbu (3.69)

Kako bi se ubrzala konvergencija rješenja, jednadžbu (3.69) se implicitno podrelaksira faktorom  $\alpha_u$  za brzinu. Dobiva se novi sustav podrelaksiranih jednadžbi koji je potrebno riješiti kako bi se dobilo novo polje brzine (prilikom računanja se koriste polje tlaka i polje brzine iz prethodne iteracije):

$$\frac{\alpha_p}{\alpha_u} \bar{\mathbf{U}}_P = \mathbf{H}(\bar{\mathbf{U}}) - \sum_f S(p)_f + \frac{1 - \alpha_u}{\alpha_u} \bar{\mathbf{U}}_P^o. \quad (3.72)$$

3. Sa novim poljem brzina se računa nova matrica  $\mathbf{H}(\bar{\mathbf{U}})$ , te se nakon toga rješava jednadžba za tlak (3.70) čime se dobiva novo polje tlaka.
4. Izračunati novo polje i eksplicitno ga podrelaksirati

Rješavanje jednadžbi koje opisuju strujanje unosi grešku nelinearnih efekata pa je potrebno dobiti aproksimaciju vrijednosti polja tlaka nakon čega se ponovno računa matrica  $\mathbf{H}(\bar{\mathbf{U}})$ . Iako novo izračunato polje brzina zadovoljava jednadžbu kontinuiteta, novo izračunato polje tlaka nosi grešku gradijenta tlak, konvekcije i difuzije te se iz tog razloga polje tlaka podrelaksira:

$$p^{\text{new}} = p^{\text{old}} + \alpha_p(p^P - p^{\text{old}}). \quad (3.73)$$

5. Ponovno proračunom proći kroz jednadžbu za protok (3.71)
6. Riješiti diskretizirane jednadžbe modela turbulencije  
Ukoliko prilikom rješavanja koristi model turbulencije.
7. Provjeriti konvergenciju rješenja

Ukoliko dobiveno rješenje ne zadovoljava postavljene zahtjeve, nastaviti s proračunom.

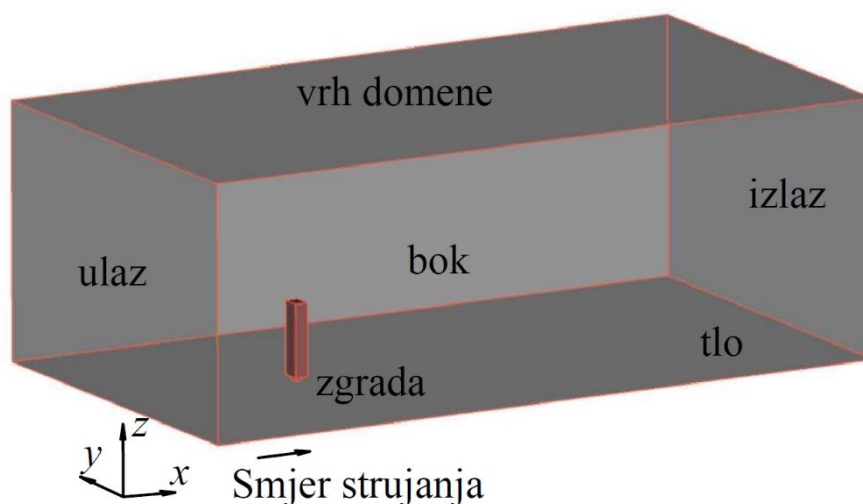


## 4. RAČUNALNI MODEL

U ovom poglavlju će se prikazati postavke računalnog modela korištenog za modeliranje strujanja vjetra oko izdignutih zgrada, odnosno prikazat će se odabir domene strujanja, odabir mreže konačnih volumena, korišteni ulazni profili fizikalnih veličina te postavljeni rubni uvjeti i korištene numeričke sheme diskretizacija.

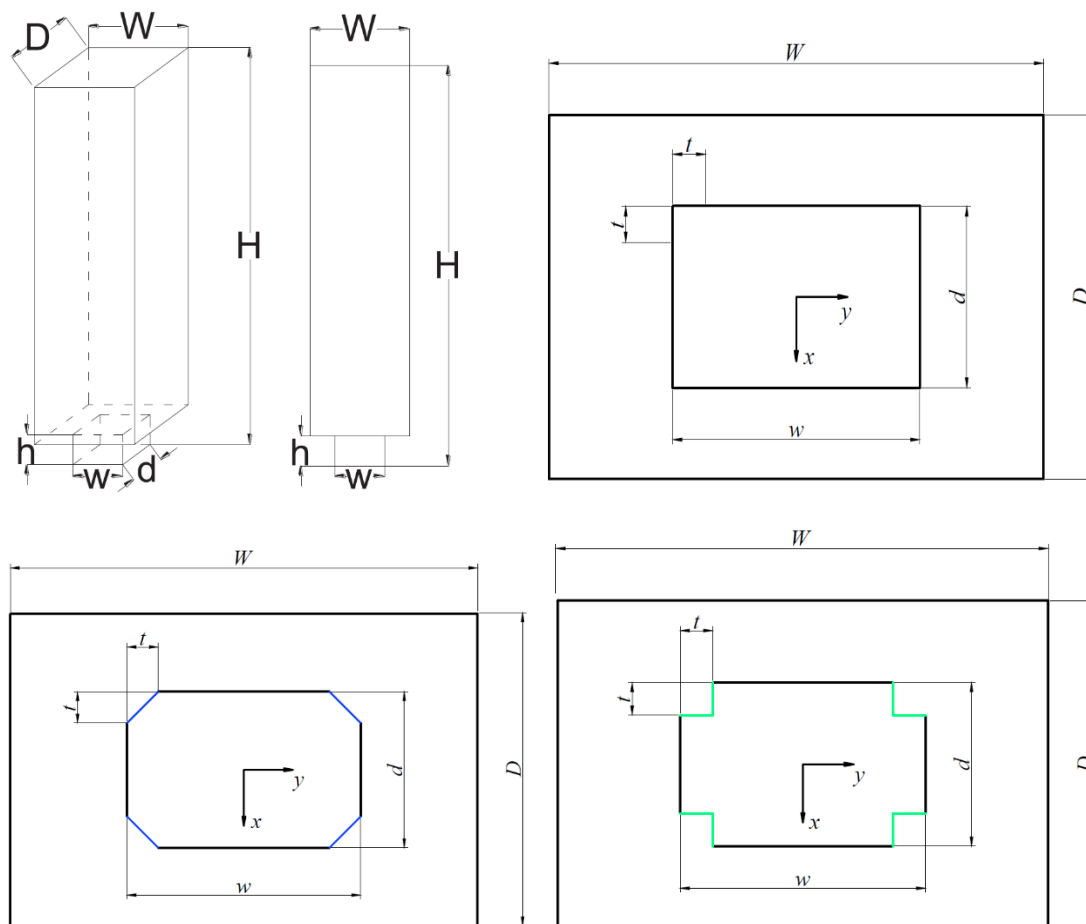
### 4.1. Domena strujanja

Dimenzije računalne domene se odabiru na način da su rubovi domene dovoljno udaljeni od zgrade kako ne bi utjecali na strujanje u njejoj okolini. Prema [31], odabiru se duljina domene u iznosu od 1120 metara, visina domene od 400 metara te širina domene od 630 metara. Visina i širina domene se trebaju birati prema faktoru zagušenja, koji za spomenute dimenzije iznosi 1,43 % (manje od 3 %, zadovoljen uvjet prema [31]), a računa se kao odnos površina poprečnog presjeka domene i zgrade. Prema [31], duljina domene treba biti oko deset iznosa visine zgrade s time da duljina između granice kroz koju zrak ulazi u domenu (ulaz, Slika 10) i zida zgrade(zgrada, Slika 10) treba iznositi barem dvije visine zgrade. Slika 10 prikazuje domenu strujanja sa ucrtanim imenima rubnih ploha.



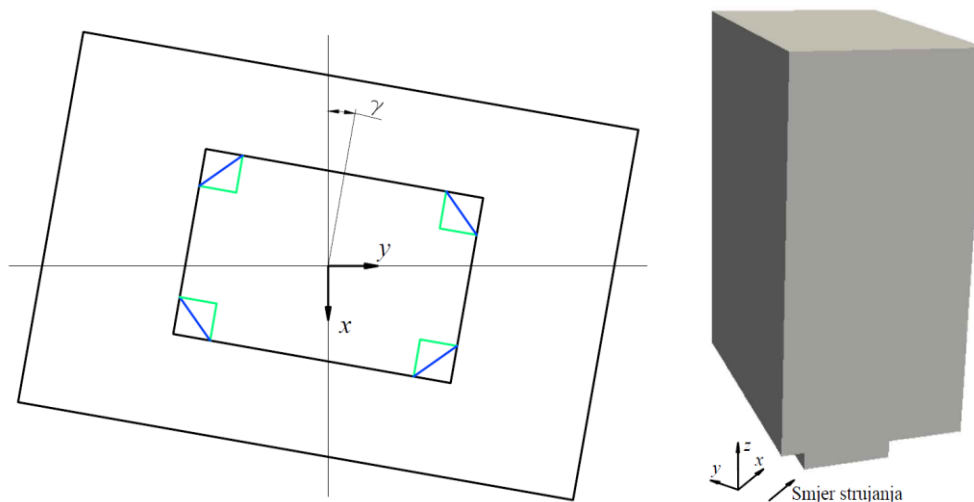
Slika 10 Prikaz korištene računalne domene s rubovima

Zadatak rada bio je analizirati utjecajne parametre arhitekture zgrade. Prema [20] su odabrani modeli izdignute zgrade čiji su shematski prikaz i dimenzije dani na Slika 11 i Slika 12 te u Tablica 3.



**Slika 11** Kotirane dimenzije zgrade sa shematskim tlocrtnim prikazom korištenih oblika jezgri zgrade

Slika 11 također prikazuje različite oblike nosivih dijelova zgrada (jezgri). Plava boja predstavlja nosivi dio zgrade koja ima skošene rubove (označava se sa oznakom CH), a zelena boja predstavlja nosivi dio zgrade sa izrezanim rubovima (označava se sa oznakom RC). Crni obrub predstavlja pravokutnu jezgru koja će se označavati sa oznakom RT. Iako postoje različite konfiguracije zgrada (dimenzije konfiguracija su dane u Tablica 3) rubne plohe domene se neće mijenjati. U domeni strujanja mijenjat će se geometrija zgrade i kut nastrujavanja zraka (rotacija zgrade oko vertikalne osi, prema Slika 12), ali ne i njen položaj u domeni.



Slika 12 Prikaz napadnog kuta zgrade

Tablica 3 Dimenzije korištenih konfiguracija zgrada [20]

Zgrada	Dimenzije zgrade (m)			Izdignuta jezgra (m)			Oblik jezgre	Kut nastrujavanja $\gamma(^{\circ})$
	Visina ( $H$ )	Širina ( $W$ )	Duljina ( $D$ )	Visina ( $h$ )	Širina ( $w$ )	Duljina ( $d$ )		
M1-B2-CH	120	30	20	6	15	10	CH	0
M1-B2-CH	120	30	20	6	15	10	CH	30
M1-B2-CH	120	30	20	6	15	10	CH	45
M1-B2-RC	120	30	20	6	15	10	RC	0
M1-B2-RC	120	30	20	6	15	10	RC	30
M1-B2-RC	120	30	20	6	15	10	RC	45
M1-B2-RT	120	30	20	6	15	10	RT	0
M1-B2-RT	120	30	20	6	15	10	RT	30
M1-B2-RT	120	30	20	6	15	10	RT	45
M2-B2-CH	60	30	20	6	15	10	CH	0
M2-B2-RC	60	30	20	6	15	10	RC	0
M2-B2-RT	60	30	20	6	15	10	RT	0
M3-B2-CH	45	30	20	6	15	10	CH	0
M3-B2-RC	45	30	20	6	15	10	RC	0
M3-B2-RT	45	30	20	6	15	10	RT	0

Treba napomenuti kako su rubne plohe ulaz, izlaz, bok i vrh domene zadane kao plohe tipa *patch*, a rubne plohe tlo (predstavlja tlo) i zgrada zadane kao zidne stijenske.

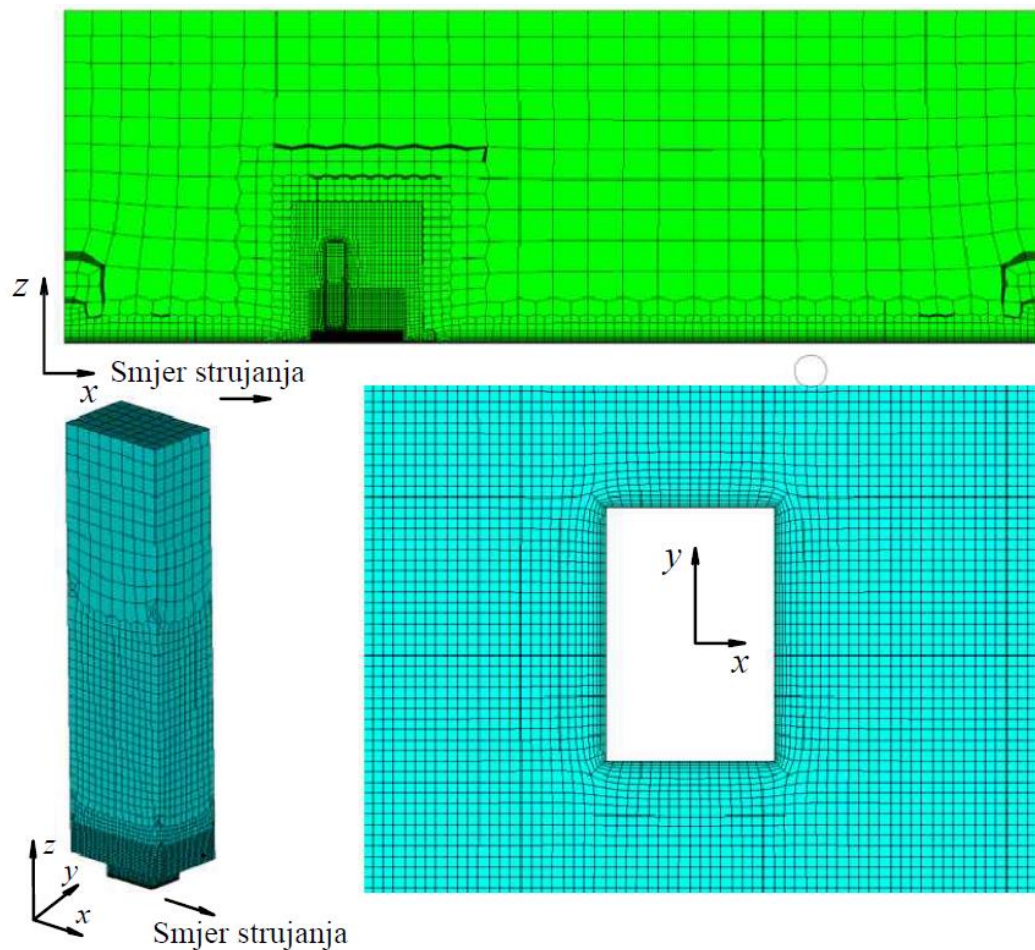
#### **4.2. Generiranje mreže konačnih volumena**

S obzirom da se u ovom radu ispituju utjecajni parametri arhitekture zgrade na osjećaj ugone pješaka, upravo područje oko izdignute jezgre zgrade predstavlja dio domene strujanja čija će se rješenja proračuna analizirati. Stoga je važno upravo u tom području domene generirati dovoljno velik broj konačnih volumena kako bi konačni rezultati proračuna bili zadovoljavajuće točnosti.

Mreža konačnih volumena se izradila u komercijalnom programskom paketu CF-MESH+®. Razlog korištenja ovog programskog paketa je u njegovoj brzini i lakoći upravljanja različitim postavkama generiranja mreže. Naime, u svega deset minuta nakon učitane geometrije domene strujanja moguće je generirati mrežu konačnih volumena.

Postavke generiranja mreže se sastoje od maksimalno moguće veličine volumena, primitiva koje ispunjavaju volumene različitih veličina relativno zadane koristeći iznos maksimalnog volumena u računalnoj domeni (Slika 13), te iznosa ukupnog broja volumena u graničnom sloju koji se zadaje na rubne plohe zgrade i dna računalne domene.

Prilikom generiranja mreže konačnih volumena potrebno je obratiti pažnju na iznos udaljenosti centra konačnih volumena uz zidnu stijenu. Razlog tome je zahtjev da se udaljenost centra konačnog volumena uz zidnu stijenu mora nalaziti u inercijalnom podsloju.



Slika 13 Prikaz presjeka korištene mreže konačnih volumena

Na Sliku 13 mogu se uočiti velike razlike u veličini kontrolnih volumena koji ispunjavaju računalnu domenu. Razlog tome je ušteda računalnih resursa (vremena potrebnog za generiranje mreže i vremena potrebnog za numerički proračun strujanja). Pritom je mreža izvedena na način da su najmanji konačni volumeni u zoni čija se rješenja moraju provesti kroz daljnju analizu (visine koje odgovaraju visinama kretanja pješaka). Programski paket CF-MESH+® znatno olakšava posao korisniku prilikom analize osjetljivosti rješenja na rezoluciju mreže, s obzirom da se do nove mreže konačnih volumena dolazi promjenom maksimalno moguće veličine volumena u računalnoj domeni, a svi se ostali parametri relativno vežu za vrijednost parametra maksimalne veličine volumena. Analiza osjetljivosti rješenja na rezoluciju mreže provedena je u poglavlju 4.7.

### 4.3. Ulazni profili fizikalnih veličina

Kako bi se u računalnoj domeni ostvarilo strujanje karakteristično strujanju u atmosferskom graničnom sloju potrebno je pravilno zadati rubne uvjete. Polazna točka postavljanja rubnih uvjeta je zadavanje rubnih uvjeta na ulazu u domenu, a nakon čega se zadaju rubni uvjeti i na ostalim rubnim površinama računalne domene.

U ovom radu se promatra i utjecaj modeliranja strujanja u atmosferskom graničnom sloju, s obzirom da se modelira strujanje homogenog atmosferskog graničnog sloja pogonjenog smičnim naprezanjem i homogenog atmosferskog graničnog sloja pogonjenog razlikom tlakom. Ulazni profili fizikalnih veličina koji osiguravaju modeliranje homogenog atmosferskog graničnog sloja pogonjenog smičnim naprezanjem definirani su prema Richardsu i Hoxeyu [21], a ulazni profili fizikalnih veličina koji generiraju homogeni atmosferski granični sloj pogonjen razlikom tlaka definiraju se prema Richardsu i Norrisu [22]. Pritom je važno ulazne profile fizikalnih veličina prilagoditi profilima korištenim u [20], s obzirom da su konfiguracije zgrada i eksperimentalni podaci za usporedbu preuzeti iz [20].

Oba tipa računalno generiranog homogenog atmosferskog graničnog sloja korištena su za proračun konfiguracija izdignute zgrade danih u Tablica 3.

#### 4.3.1. Ulazni profil prema Richardsu i Hoxeyu

Na ulazu u domenu zadaju su profili osrednjene brzine  $\bar{u}(z)$ , kinetičke energije turbulencije  $k(z)$  te disipacije kinetičke energije turbulencije  $\varepsilon(z)$  [21]:

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

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

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

$$\sigma_\varepsilon = \frac{\kappa^2}{(C_2 - C_1) \cdot \sqrt{C_\mu}}. \quad (4.4)$$

Tablica 2 prikazuje vrijednosti koeficijenata u gornjim jednadžbama, a Kármánova konstanta  $\kappa$  iznosi 0,4327. Nepoznate vrijednosti iz gornjih jednadžbi su brzina trenja  $u_\tau$  i aerodinamička duljina hrapavosti  $z_0$ , a određuju se pomoću ulaznog profila brzine definiranog u [20]

$$\bar{u}(z) = U_{\text{ref}} \cdot \left( \frac{z}{z_{\text{ref}}} \right)^\alpha, \quad (4.5)$$

gdje referentna brzina  $U_{\text{ref}}$  iznosi 7,59 m/s na referentnoj visini  $z_{\text{ref}}$  vrijednosti 0,6 m koja predstavlja visinu najvišeg modela zgrade oko koje se analiziralo strujanje u [20], a eksponent  $\alpha$  iznosi 0,11.

Nakon uvrštavanja referentnih vrijednosti brzine i visine u jednadžbu (4.1), može se izraziti brzina trenja kao:

$$u_\tau = \frac{\kappa \cdot U_{\text{ref}}}{\ln \left( \frac{z_{\text{ref}} + z_0}{z_0} \right)}. \quad (4.6)$$

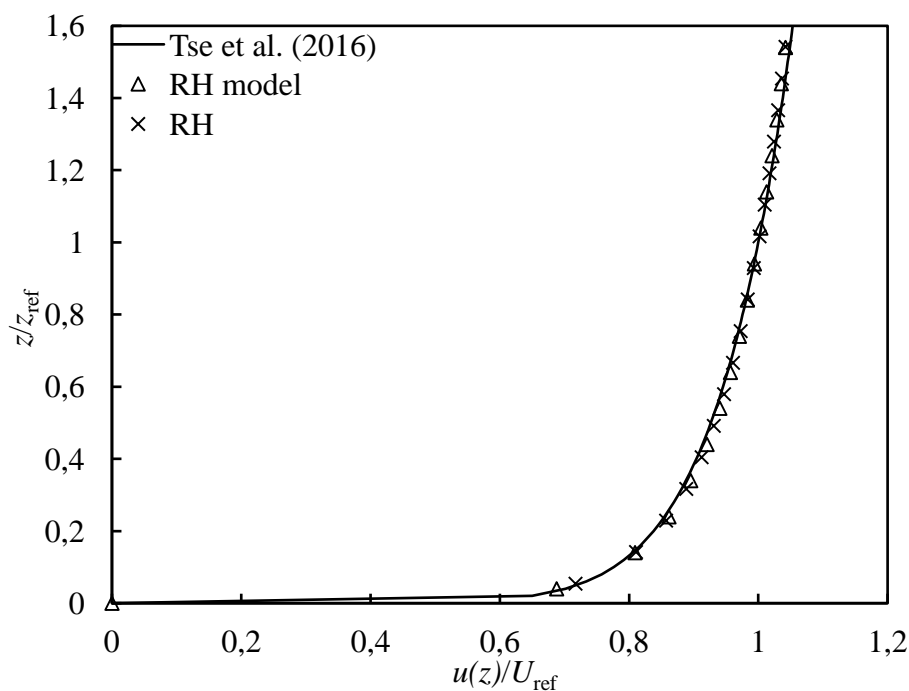
U jednadžbi (4.6) nepoznanica je još i aerodinamička duljina hrapavosti  $z_0$ . Iznos aerodinamičke duljine hrapavosti odredio se na način da se ostvari najbolje poklapanje profila brzine dobivenog jednadžbom (4.1) s (4.5). Tako izračunata vrijednost aerodinamičke duljine hrapavosti iznosi  $z_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  m.

Za odabranu vrijednost aerodinamičke duljine hrapavosti, brzina trenja prema jednadžbi (4.6) iznosi  $u_\tau = 0,31858$  m/s.

Na taj su način određene potrebne veličine za zadavanje ulaznih profila fizikalnih veličina prema Richardsu i Hoxeyu [21], no za domenu koja se koristila u eksperimentu gdje su dimenzije modela zgrade 200 puta manje od realnih dimenzija zgrade. U ovom radu se provela analiza strujanja za stvarne vrijednosti zgrada, što znači da se ponovno mora odabrati vrijednost aerodinamičke duljine hrapavosti  $z_0$  na način da se profil brzine izračunat prema jednadžbi (4.1) i jednadžbi (4.5) što bolje podudaraju. Stvarna visina najviše konfiguracije iznosi 120 metara čime je definirana referentna visina  $z_{\text{ref}}$  na kojoj je iznos referentne brzine 7,59 m/s. Brzina trenja  $u_\tau$  pritom je istog iznosa izračunatog za modelski atmosferski granični sloj, tj.  $u_\tau = 0,31858$  m/s.

Navedene referentne vrijednosti se uvrštavaju u jednadžbu (4.6) u kojoj je potrebno odrediti vrijednost  $z_0$ . Određena vrijednost aerodinamičke duljine hrapavosti  $z_0$  za koju se bezdimenzijski profili brzine najbolje podudaraju iznosi  $z_0 = 4 \cdot 10^{-3}$  m. Potrebno je

naglasiti kako se uspoređuju bezdimenzijski profili brzina određeni dijeljenjem visine  $z$  i brzine  $\bar{u}(z)$  sa referentnim vrijednostima  $z_{\text{ref}}$  i  $U_{\text{ref}}$ . Usporedba opisanih bezdimenzijskih profila brzina prikazuje Slika 14, gdje „Tse et al. (2016)“ predstavlja profil korišten u zračnom tunelu [20], „RH model“ predstavlja profil prema Richardsu i Hoxeyu na modelu zgrade te „RH“ predstavlja profil brzine za zgradu stvarnih dimenzija.



Slika 14 Usporedba ulaznih profila osrednjene brzine prema Richardsu i Hoxeyu [21]

Ulazni profili fizikalnih veličina osrednjene brzine  $\bar{u}(z)$ , kinetičke energije turbulencije  $k(z)$  te disipacije kinetičke energije turbulencije  $\varepsilon(z)$  se zadaju jednadžbama (4.1)-(4.4), a veličine potrebne za izračunavanje profila su definirane u Tablica 4.

Tablica 4 Veličine potrebne za izračunavanje ulaznih profila prema Richardsu i Hoxeyu

$C_\mu$	$C_1$	$C_2$	$\kappa$	$z_0$	$u_\tau$
0,09	1,44	1,92	0,4327	0,004	0,31858



### 4.3.2. Ulazni profili prema Richardsu i Norrisu

Ulazni profili fizikalnih veličina su definirani za strujanje koje je pogonjeno razlikom tlaka. Na ulazu u domenu zadaju su profili osrednjene brzine  $\bar{u}(z)$ , kinetičke energije turbulencije  $k(z)$  te disipacije kinetičke energije turbulencije  $\varepsilon(z)$  [22]:

$$\bar{u}(z) = \frac{u_\tau}{\kappa} \cdot \left( \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + C_{U1} \left(\frac{z}{H_d}\right) + C_{U2} \left(\frac{z}{H_d}\right)^2 + C_{U3} \left(\frac{z}{H_d}\right)^3 + C_{U4} \left(\frac{z}{H_d}\right)^4 \right), \quad (4.7)$$

$$k(z) = u_\tau^2 \cdot \left( C_{K1} + C_{K2} \left(1 - \frac{z}{H_d}\right)^2 + C_{K3} \left(1 - \frac{z}{H_d}\right)^4 + C_{K4} \left(1 - \frac{z}{H_d}\right)^6 \right), \quad (4.8)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{C_\mu k(z)^2}{\kappa u_\tau z} \left( 1 + (1 + C_{U1}) \left(\frac{z}{H_d}\right) + (1 + C_{U1} + 2C_{U2}) \left(\frac{z}{H_d}\right)^2 + (1 + C_{U1} + 2C_{U2} + 3C_{U3}) \left(\frac{z}{H_d}\right)^3 \right), \quad (4.9)$$

$$h_{AGS} = \frac{u_\tau}{12 \cdot \Omega \cdot \sin \Phi}. \quad (4.10)$$

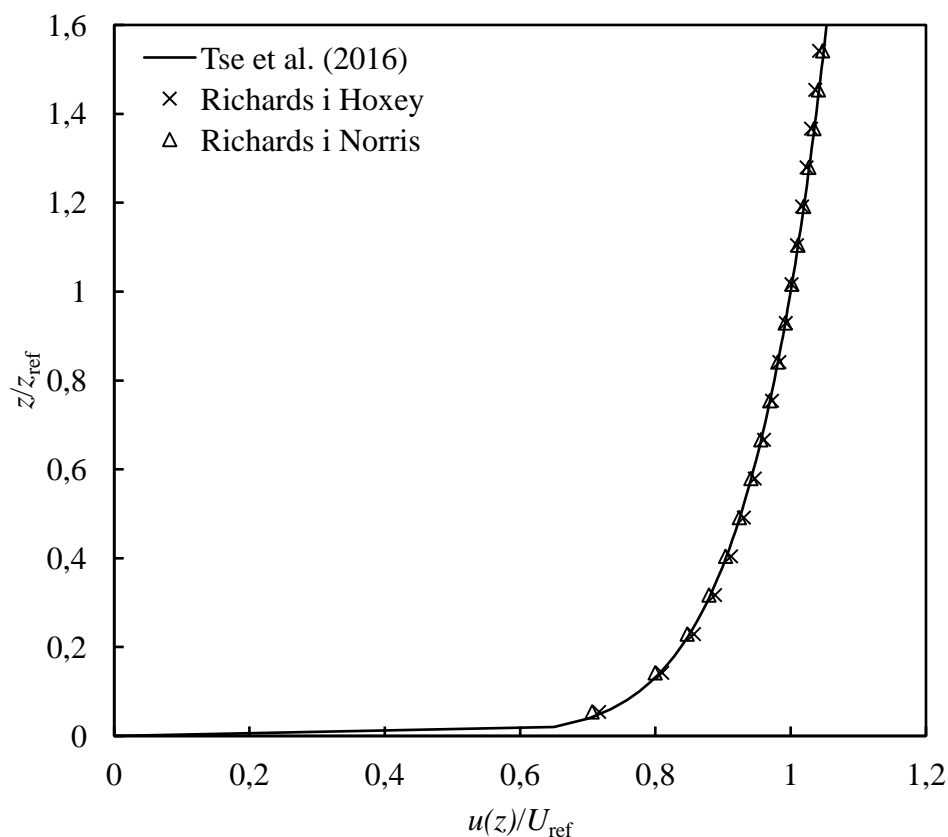
U jednadžbi (4.10)  $h_{AGS}$  predstavlja debljinu atmosferskog graničnog sloja,  $\Omega$  predstavlja kutnu brzinu rotacije Zemlje ( $7,29 \cdot 10^{-5}$  rad/s) te  $\Phi$  predstavlja zemljopisnu širinu (korištena je vrijednost zemljopisne širine Hong Konga iznosa  $22^\circ$  prema [20]). U jednadžbama (4.7)-(4.9)  $H_d$  predstavlja visinu računalne domene iznosa  $H_d = 400$  m.

Vrijednosti brzine trenja  $u_\tau$  i Kármánove konstante  $\kappa$  jednake su kao i za profile prema Richardsu i Hoxeyu, a preostali koeficijenti iz jednadžbi (4.6)-(4.10) potrebni za određivanje profila prema Richardsu i Norrisu [22] su prikazani u Tablica 5.

**Tablica 5** Koeficijenti potrebni za izračunavanje ulaznih profila prema Richardsu i Norrisu [22]

$C_{K1}$	$C_{K2}$	$C_{K3}$	$C_{K4}$	$C_{U1}$	$C_{U2}$	$C_{U3}$	$C_{U4}$
0,921	3,533	-1,926	0,805	0,528	0,385	-1,09	0,243

Slika 15 prikazuje usporedbu ulaznih profila brzine korištenih u zračnom tunelu [20], ulaznih profila brzine prema Richardsu i Hoxeyu [21] te ulaznih profila brzine prema Richardsu i Norrisu [22].

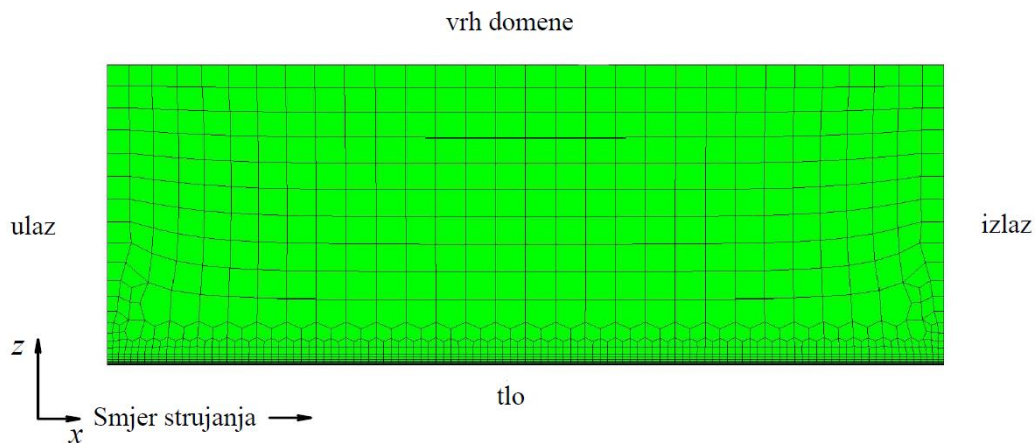


Slika 15 Usporedba ulaznih profila osrednjene brzine

#### 4.4. Provjera homogenosti atmosferskog graničnog sloja u 2D domeni

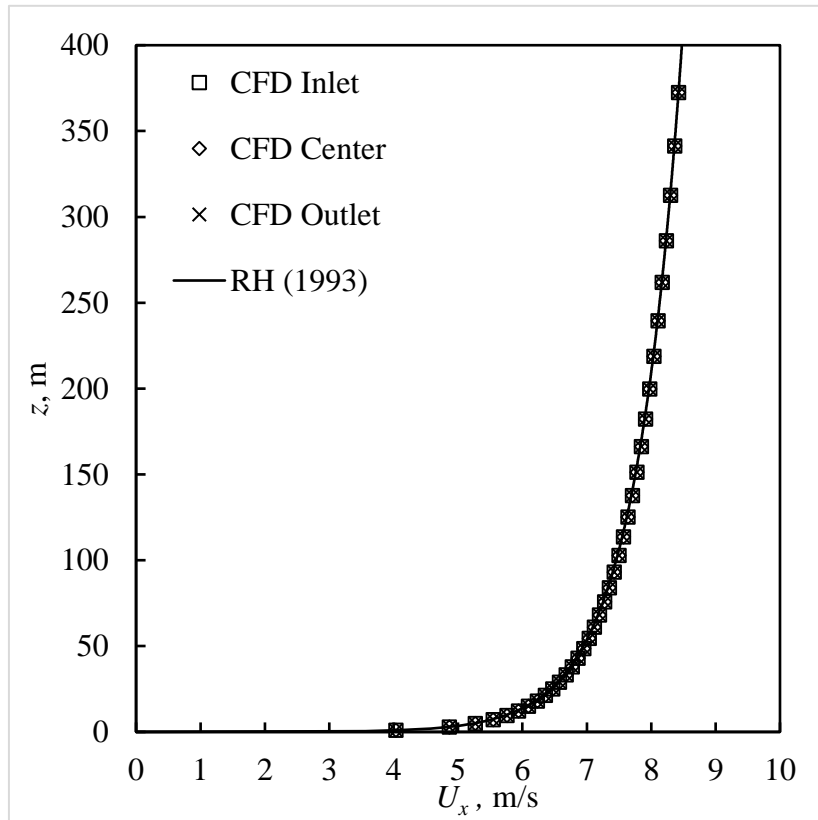
Kako bi se provjerila homogenost atmosferskog graničnog sloja, proveden je numerički proračun u praznoj dvodimenzionalnoj domeni za oba načina zadavanja ulaznih profila. Homogenost je ostvarena ukoliko se profili fizikalnih veličina značajno ne mijenjaju u smjeru strujanja (u smjeru  $x$ -koordinate).

Uspoređuju se profili fizikalnih veličina na tri mjesta, odnosno profili na ulazu u domenu, profili na poziciji na kojoj se nalazi zgrada i profili na izlazu iz računalne domene. Mreža konačnih volumena za ovu provjeru se radi po uzoru na mrežu 3D domene gdje je u smjeru strujanja zadržan isti raspored i ista veličina volumena kao kod 3D domene (Slika 16).

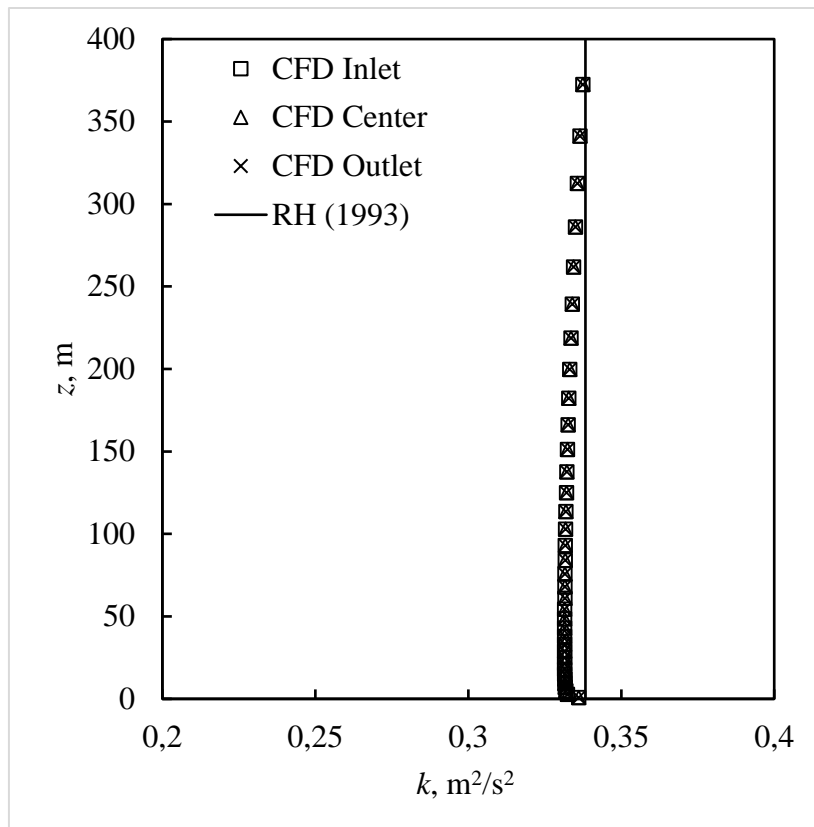


Slika 16 Prikaz 2D mreže konačnih volumena korištene za ispitivanje homogenosti

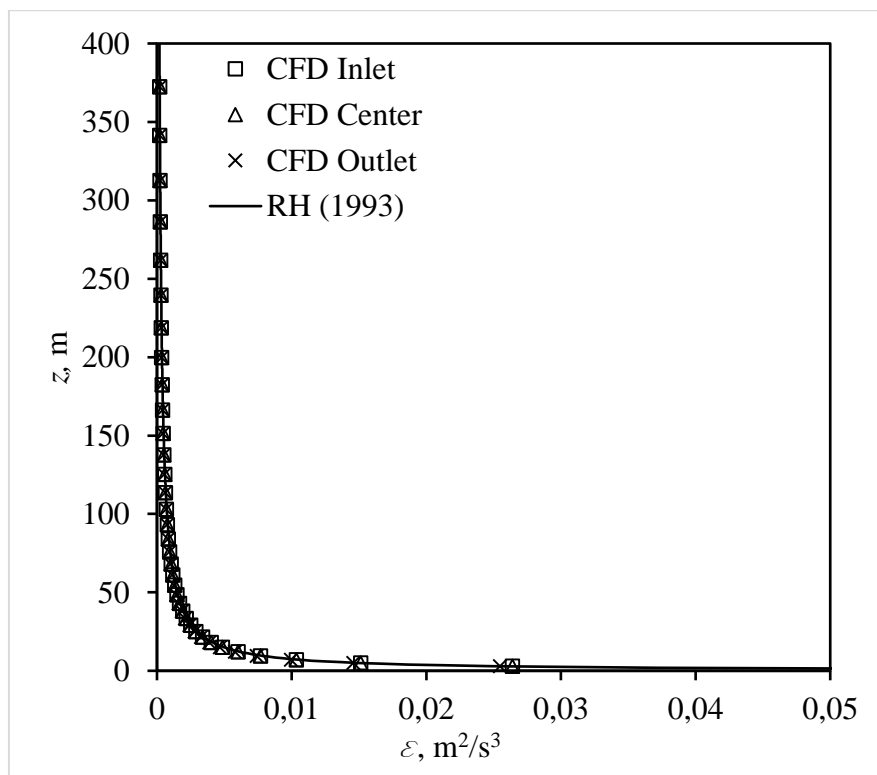
Usporedba profila osrednjene brzine  $\bar{u}(z)$ , kinetičke energije turbulencije  $k(z)$  te disipacije kinetičke energije turbulencije  $\varepsilon(z)$  mjenjenih na ulazu u domenu, na poziciji zgrade te na izlazu iz domene za oba tipa homogenog atmosferskog graničnog sloja prikazana je na Slikama 17-22. U legendi „CFD Inlet“ označava profil na ulazu u domenu, „CFD Center“ profil na mjestu zgrade, „CFD Outlet“ na izlazu domene te „RH (1993)“ profil prema Richardsu i Hoxeyu [22].



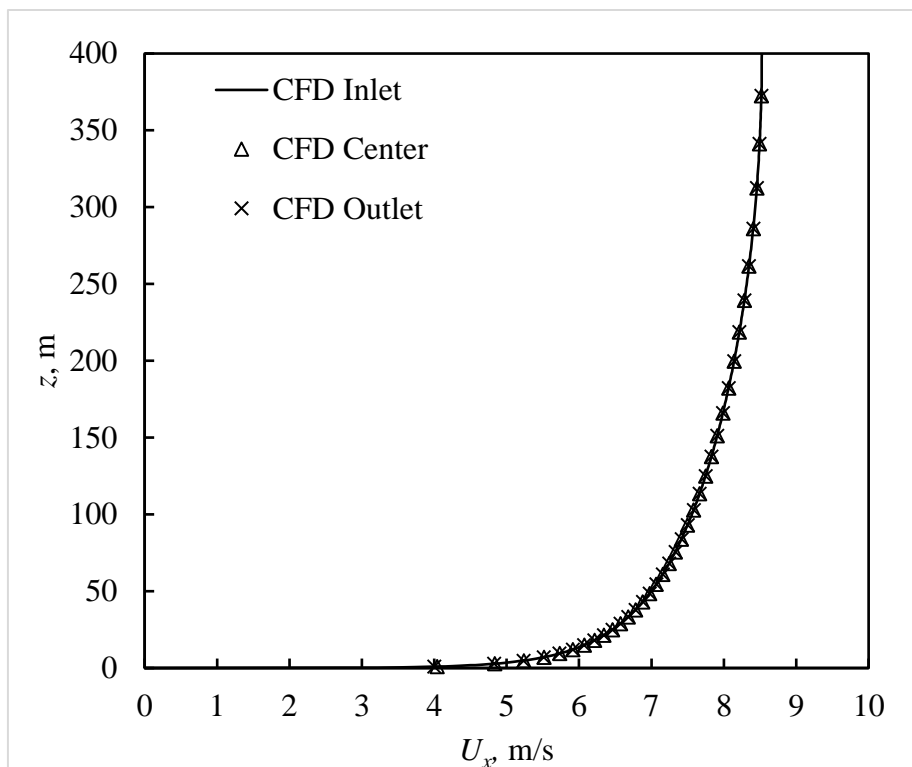
Slika 17 Usporedba profila brzine u 2D domeni s ulaznim profilom prema Richardsu i Hoxeyu



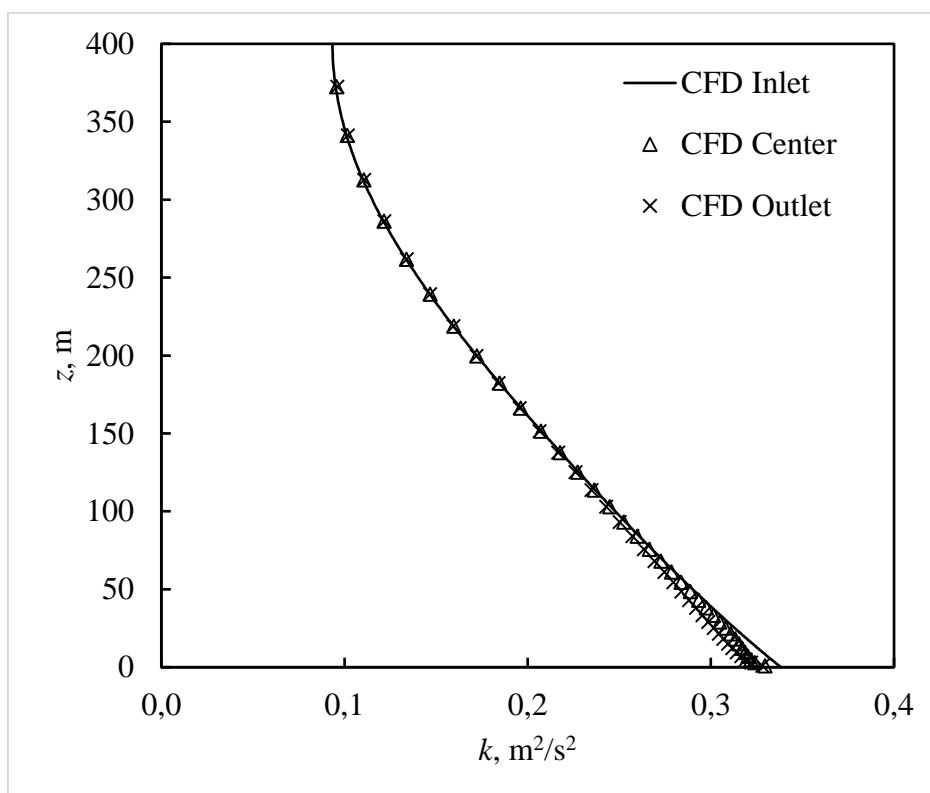
Slika 18 Usporedba profila kinetičke energije turbulencije u 2D domeni s ulaznim profilom prema Richardsu i Hoxeyu



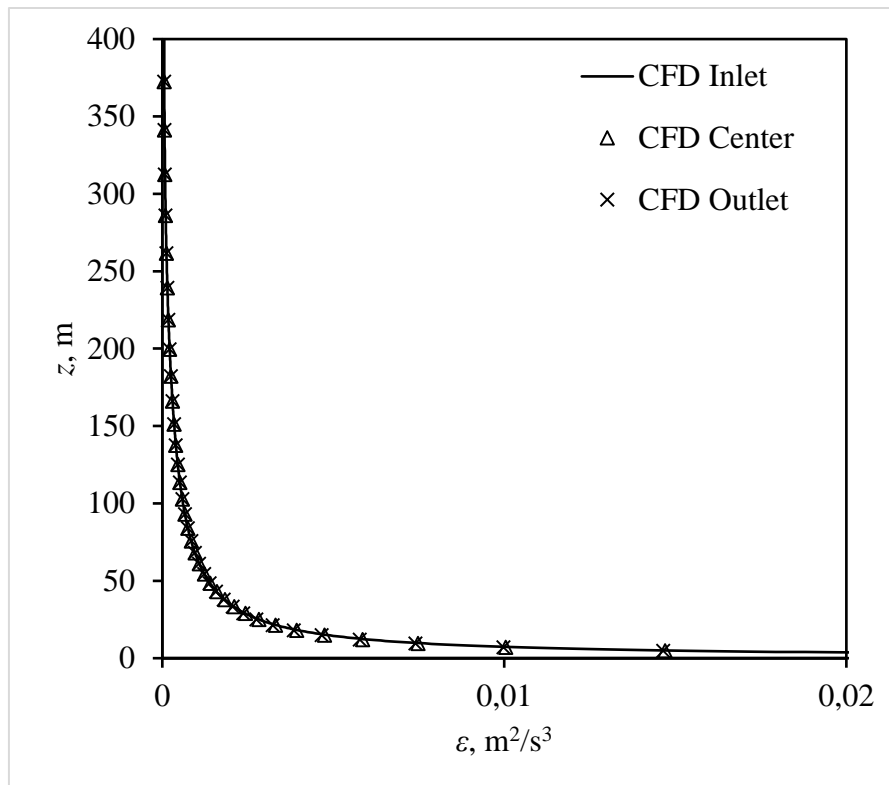
Slika 19 Usporedba profila disipacije kinetičke energije turbulencije u 2D domeni s ulaznim profilom prema Richardsu i Hoxeyu



Slika 20 Usporedba profila brzine u 2D domeni s ulazim profilom prema Richardsu i Norrisu[22]



Slika 21 Usporedba profila kinetičke energije turbulencije u 2D domeni s ulazim profilom prema Richardsu i Norrisu



Slika 22 Usporedba profila disipacije kinetičke energije turbulencije u 2D domeni s ulazim profilom prema Richardsu i Norrisu [22]

#### 4.5. Rubni uvjeti

Na ulazu u računalnu domenu zadani su profili osrednjene brzine, kinetičke energije turbulencije te disipacije kinetičke energije turbulencije. Na zidnim stijenkama je zadana brzina jednaka nuli. Na vrhu računalne domene se za Richards i Hoxey rubne uvjete (Tablica 6) postavljaju fiksne vrijednosti fizikalnih veličina koje su određene iz ulaznih profila na visini domene  $H_d$ , dok se za Richards i Norris rubne uvjete (Tablica 7) postavlja Neumannov rubni uvjet. Za tlak je na svim rubovima računalne domene postavljen Neumannov rubni uvjet, te je u jednom kontrolnom volumenu definirana nulta vrijednost tlaka (nestlačivo strujanje). S obzirom da su na ulazu u računalnu domenu zadani profili kinetičke energije turbulencije  $k(z)$  i disipacije kinetičke energije turbulencije  $\varepsilon(z)$ , turbulentna viskoznost se može izračunati kao

$$v_t = C_\mu k \frac{k(z)^2}{\varepsilon(z)}. \quad (4.11)$$

Tablica 6 prikazuje korištene rubne uvjete za slučaj korištenja Richards i Hoxey rubnih uvjeta, a Tablica 7 za slučaj Richards i Norris rubnih uvjeta.

**Tablica 6** Tablični prikaz korištenih rubnih uvjeta za Richards i Hoxey ulazne profile

	$\bar{u}$	$p$	$k$	$\varepsilon$	$\nu_t$
ulaz	$\bar{u}(z)$	$\frac{\partial p}{\partial x} = 0$	$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}}$	$\varepsilon(z)$	$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$
izlaz	$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \nu_t}{\partial x} = 0$
vrh domene	$\bar{u} = \bar{u}(H_D)$	$\frac{\partial p}{\partial z} = 0$	$k = k(H_D)$	$\varepsilon = \varepsilon(H_D)$	$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$
tlo	$\bar{u} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial z} = 0$	epsilonABL WallFunction	nutABLWall Function
bok	$\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial \nu_t}{\partial y} = 0$
zgrada	$\bar{u} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$	epsilonWall Equation	nutABLWall Function

**Tablica 7** Tablični prikaz korištenih rubnih uvjeta za Richards i Norris ulazne profile

	$\bar{u}$	$p$	$k$	$\varepsilon$	$\nu_t$
ulaz	$\bar{u}(z)$	$\frac{\partial p}{\partial x} = 0$	$k(z)$	$\varepsilon(z)$	$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$
izlaz	$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \nu_t}{\partial x} = 0$
vrh domene	$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0$	$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$
tlo	$\bar{u} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial z} = 0$	epsilonABL WallFunction	nutABLWall Function
bok	$\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial \nu_t}{\partial y} = 0$
zgrada	$\bar{u} = 0$	$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$	epsilonWall Equation	nutABLWall Function

#### 4.6. Korištene sheme diskretizacije

Tablica 8 prikazuje pregled shema diskretizacija korištenih za diskretizaciju članova pojedinih jednadžbi matematičkog modela. Korištene su sheme koje osiguravaju minimalno drugi red točnosti rješenja kako bi se osigurali pravilni rezultati računalnih simulacija ([32] i [33]).

**Tablica 8** Korištene sheme diskretizacije

Član jednadžbe	Shema diskretizacije
Gradijent	Metoda najmanjih kvadrata (least squares method)
Interpolacija	Linearna interpolacija (linear interpolation)
Difuzijski član	Linearna shema s korekcijom (Gauss linear corrected)
Konveksijski član	Shema s limiterom (Gamma differencing scheme)

#### 4.7. Ispitivanje osjetljivosti rješenja na rezoluciju mreže konačnih volumena

Ispitivanje je provedeno na tri različite mreže konačnih volumena. Spomenute mreže se razlikuju samo u jednoj postavci (mijenjala se najveća dopuštena veličina volumena) što rezultira rezolucijama od 649122, 1210432 i 2514174 konačnih volumena.

Veličina po kojoj će se mreže konačnih volumena usporediti je brzina u uzdužnom smjeru, odnosno njen omjer sa brzinom strujanja zraka na visini vrha promatrane zgrade.

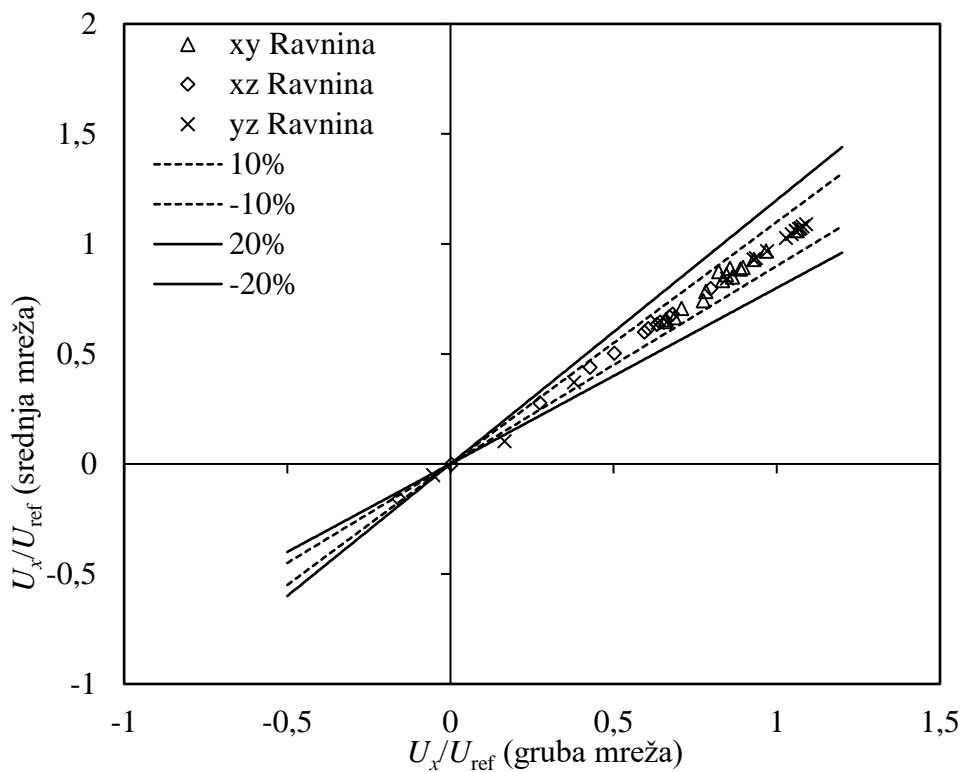
Spomenuti omjeri brzina se uspoređuju u 3 različite ravnine čija ishodišta prolaze kroz zgradu .

Glavni kriterij kvalitete mreže bila je srednja kvadratna pogreška *RMSE* koja se računa kao:

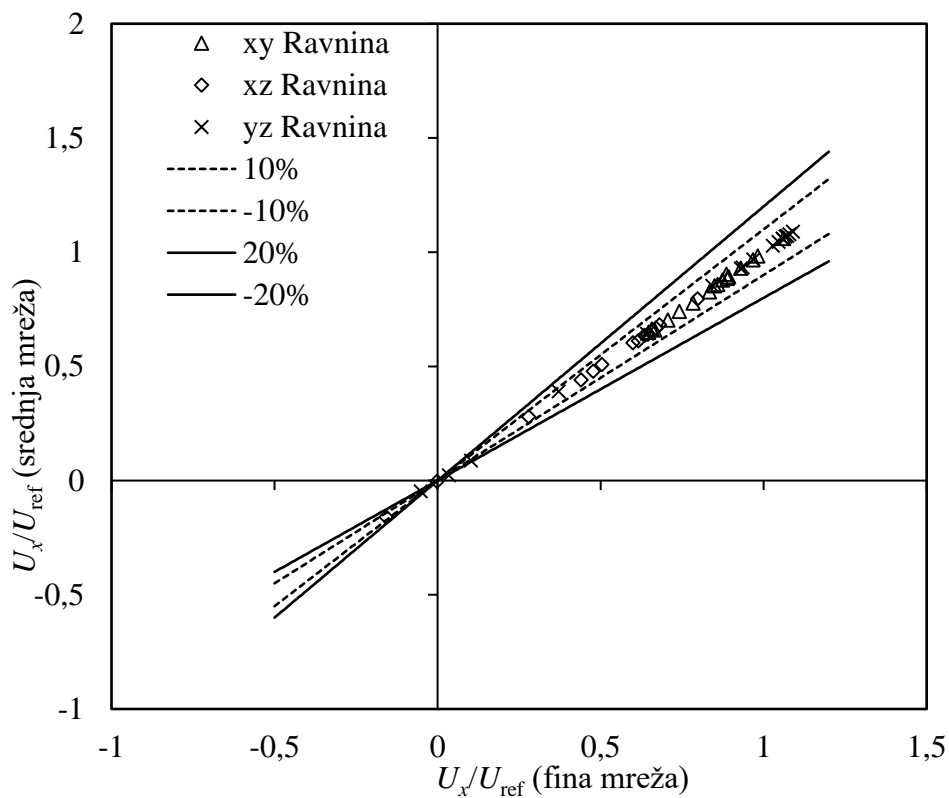
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{1i} - y_{2i})^2}, \quad (4.12)$$

gdje su  $y_{1i}$  i  $y_{2i}$  omjeri brzina na istim koordinatama ali na različitim mrežama.





Slika 23 Odnos koeficijenta ugone srednje i grube mreže.



Slika 24 Odnos koeficijenta ugone između srednje i fine mreže.

Koristeći jednadžbu (4.12) izračunata je srednja kvadratna pogreška za obje usporedbe mreža. Usporedba grube i srednje mreže rezultirala je srednjom kvadratnom greškom u iznosu od  $RMSE = 0,011561$ , a usporedba srednje i fine mreže srednjom kvadratnom greškom iznosa  $RMSE = 0,007598$ .

Za razmatranje problema vezanih za osjećaj ugone pješaka na vjetru, potrebno je koristiti mrežu gdje se veći iznosi omjera brzina neće bitno mijenjati sa promjenom rezolucije mreže konačnih volumena (s obzirom da veći iznosi omjera odgovaraju većim brzinama strujanja vjetra što je važno za proračun osjećaja ugone pješaka), ali također treba imati na umu i srednju kvadratnu grešku te potrebno vrijeme konvergencije proračuna. U ovom radu će se odabrati srednja mreža pošto nema značajne razlike u srednjoj kvadratnoj pogrešci, nema velike razlike rješenja omjera brzina većeg iznosa između fine i srednje mreže, a vrijeme računanja na srednjoj mreži je oko 50% kraće nego vrijeme računanja na finoj mreži.

## 5. REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom poglavlju su prikazani dobiveni rezultati proračuna za petnaest različitih konfiguracija izdignutih zgrada. Proračun je proveden koristeći dva različita tipa ulaznih profila (za homogeni atmosferski granični sloj pogonjen smičnim naprezanjem i razlikom tlaka). Dobiveni numerički rezultati uspoređeni su s dostupnim mjerenjima iz zračnog tunela danim u [20]. Glavni parametar koji je računat je koeficijent ugone  $K$  u ravni koja se nalazi na dva metra visine od tla, uokolo nosivog dijela zgrade (jezgre zgrade), a što se na svim konfiguracijama nalazi ispod gornjeg, stambenog dijela zgrade. Koeficijent ugone pritom se računa kao

$$K = \frac{U_x}{U_{\text{ref}}}, \quad (5.1)$$

gdje je  $U_{\text{ref}}$  definirana kao brzina  $U_x$  na visini zgrade  $H$ . Stoga je za svaku konfiguraciju zgrade potrebno odrediti referentnu brzinu  $U_{\text{ref}}$ .

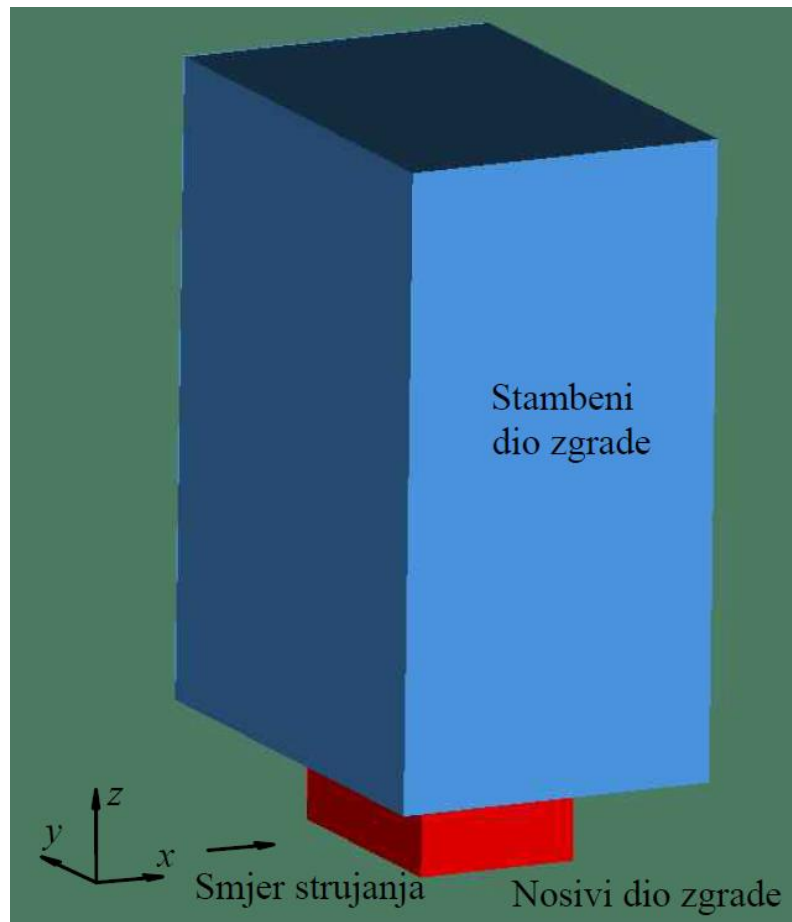
Kako bi se rezultati dobiveni za polje koeficijenta ugone  $K$  mogli analizirati, potrebne su referentne vrijednosti za usporedbu. Tablica 9 prikazuje intervale vrijednosti koeficijenta ugone  $K$  prema kojima se ocjenjuju brzine strujanja u razini čovjeka. Niske brzine strujanja ( $K < 0,3$ , Tablica 9) narušavaju kvalitetu zraka, a neprihvatljive velike brzine strujanja ( $K > 1$ , Tablica 9) uzrokuju nelagodu i predstavljaju opasnost pješacima.

Visoke brzine strujanja ( $0,7 < K < 1$ , Tablica 9) ne uzrokuju probleme ukoliko pješaci nisu dugo izloženi njima.

**Tablica 9** Vrijednosti referentnih vrijednosti koeficijenta ugone  $K$  prema [20]

Koeficijent ugone $K$	Opis
$< 0,3$	Niske brzine strujanja
$0,3 - 0,7$	Prihvatljive brzine strujanja
$0,7 - 1$	Visoke brzine strujanja
$> 1$	Neprihvatljive brzine strujanja

Nadalje su prikazani rezultati polja koeficijenta ugone  $K$  za sve provedene proračune, a prikazani su na ravnini dva metra od tla kako bi se analizirale vrijednosti na visini koja odgovara visini pješaka. Slika 25 prikazuje shematski prikaz konfiguracije zgrade i njen položaj u prostoru kako bi se jasno ukazalo na mjesta na kojim su se računale vrijednosti koeficijenta ugone  $K$ .

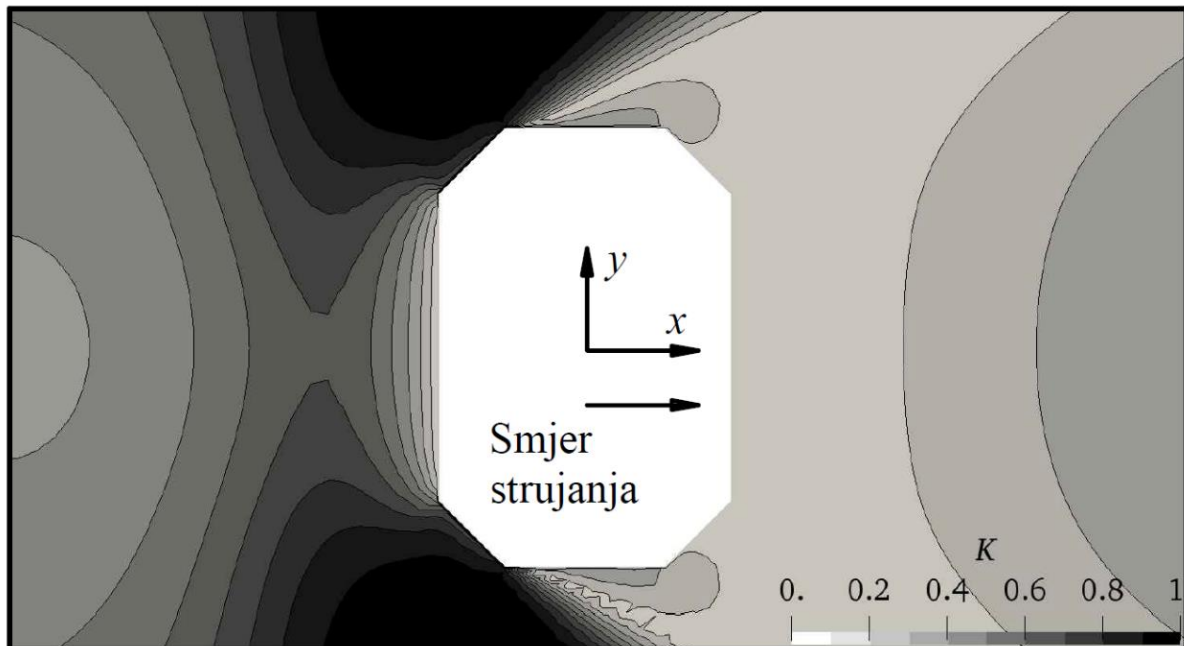


Slika 25 Shematski prikaz konfiguracije zgrade (plava boja - stambeni dio zgrade, crvena boja - nosivi dio ili jezgra zgrade)

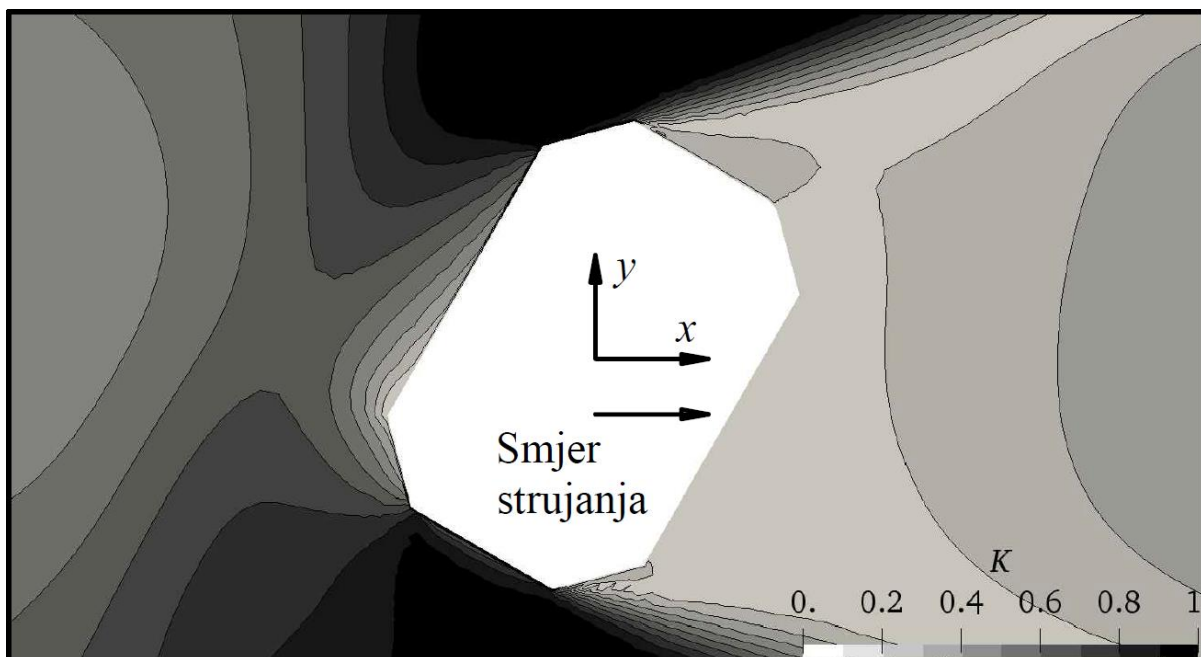
### 5.1. Rezultati polja koeficijenta ugode $K$ za ulazni profil prema Richardsu i Hoxeyu

Slika 26 i Slika 27 prikazuju vrijednosti polja koeficijenta ugode  $K$  izračunatog u okolini nosivog dijela zgrade (jezgre zgrade) koristeći ulazne profile prema Richardsu i Hoxeyu i Richardsu i Norrisu.

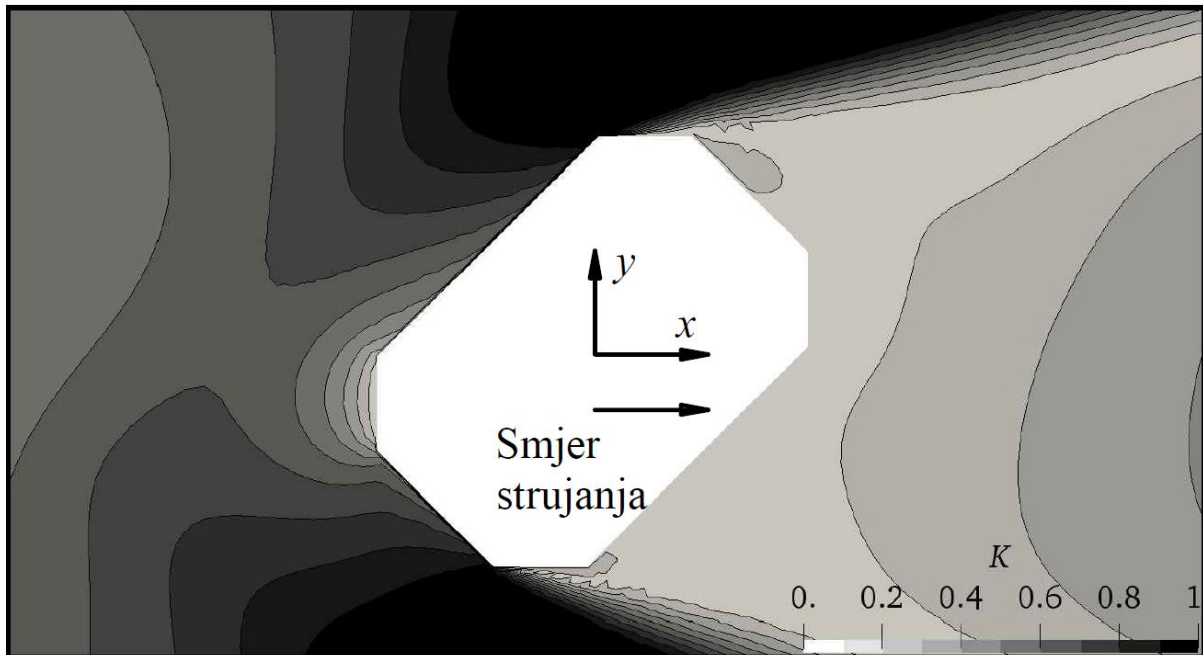
Slika 26 Prikaz polja koeficijenta ugode  $K$  za ulazni profil prema Richardsu i Hoxeyu



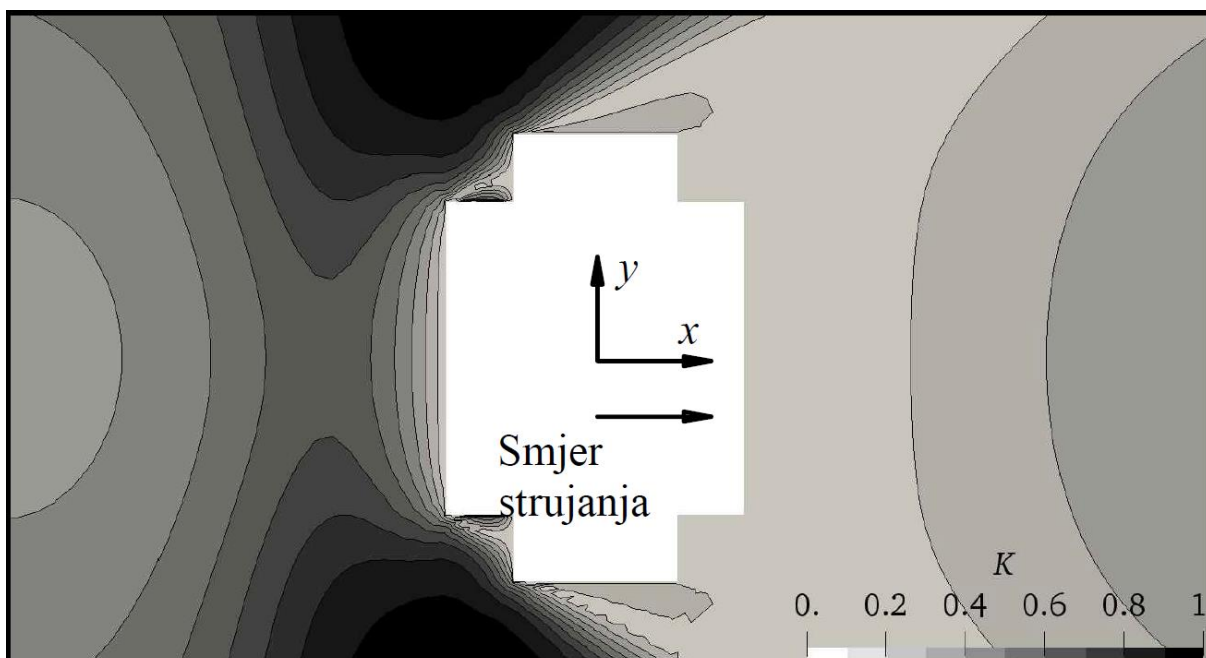
a) Konfiguracija M1-B2-CH-0



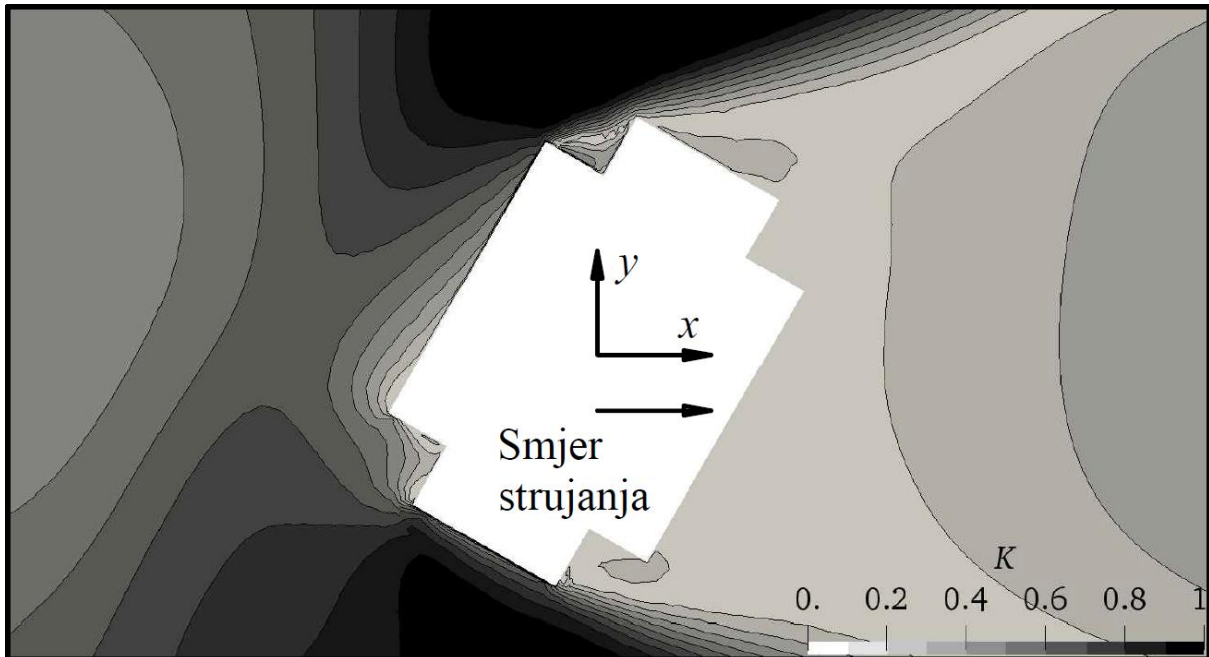
b) Konfiguracija M1-B2-CH-30



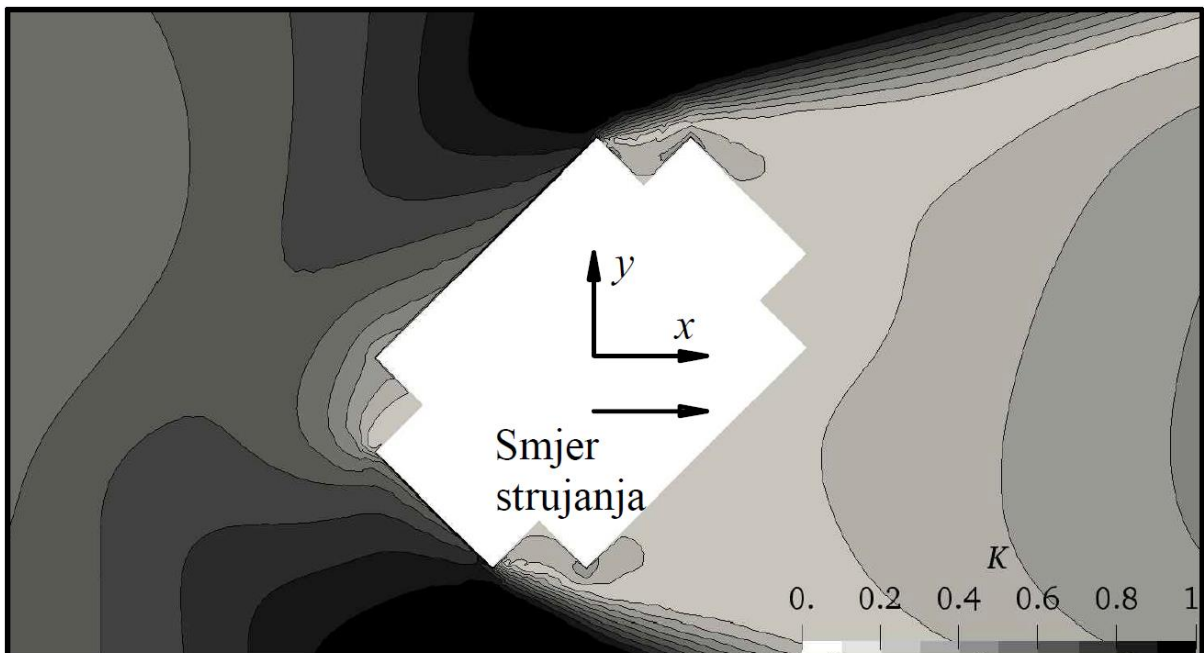
c) Konfiguracija M1-B2-CH-45



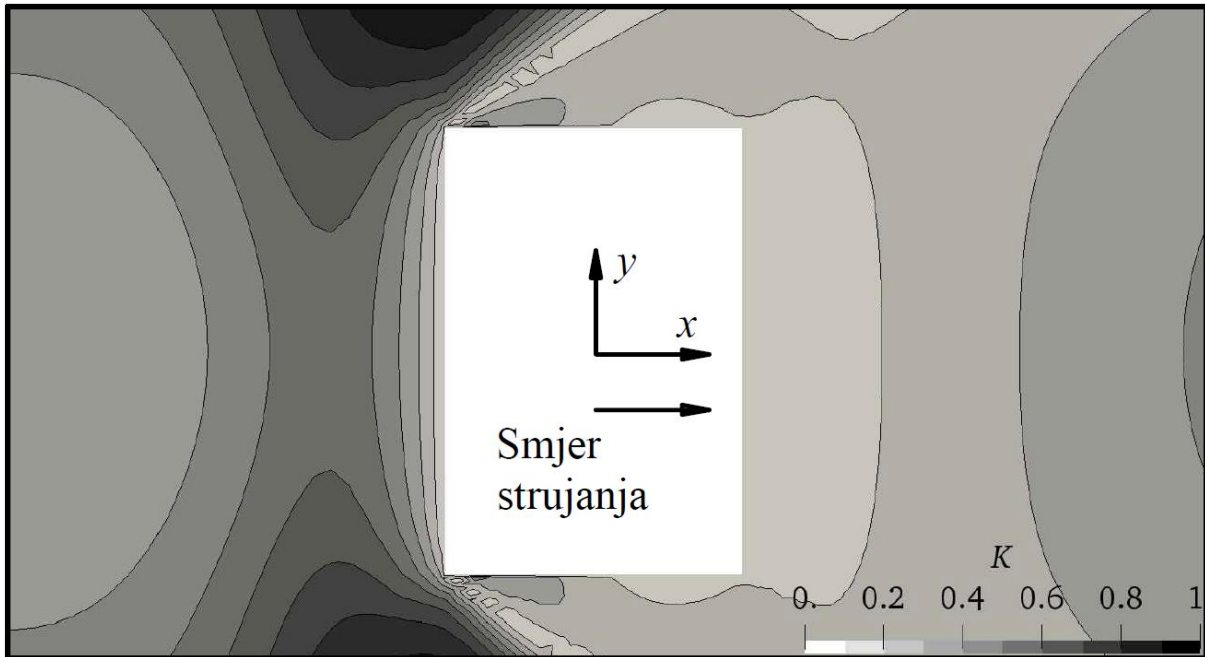
d) Konfiguracija M1-B2-RC-0



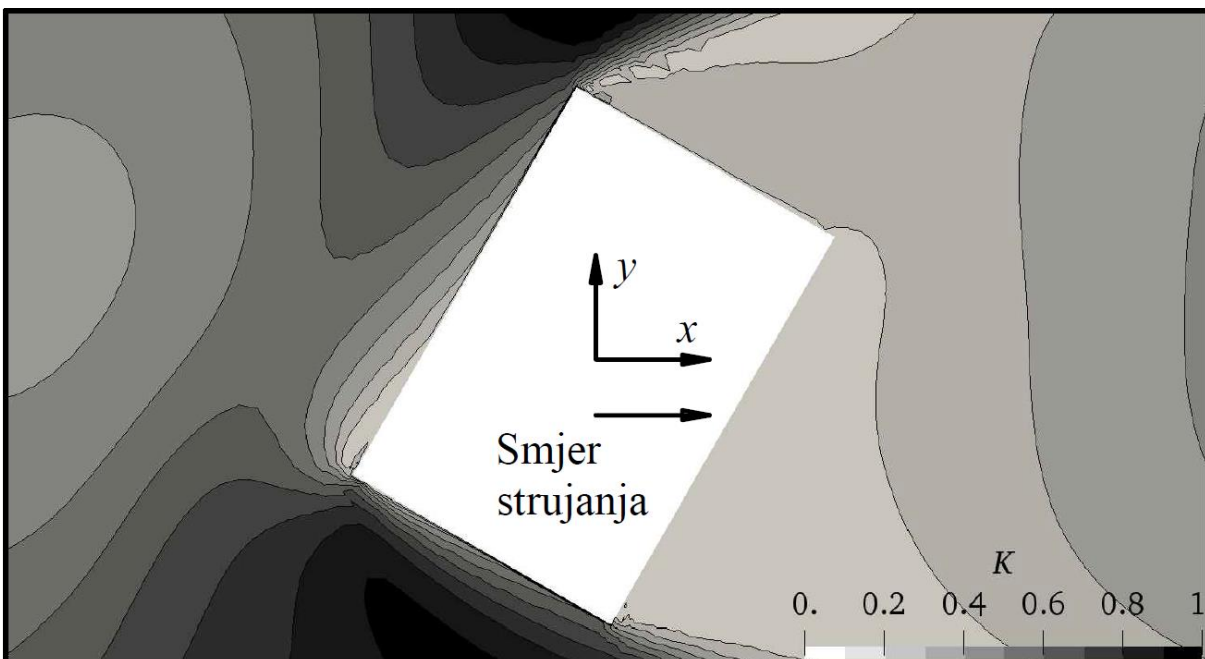
e) Konfiguracija M1-B2-RC-30



f) Konfiguracija M1-B2-RC-45

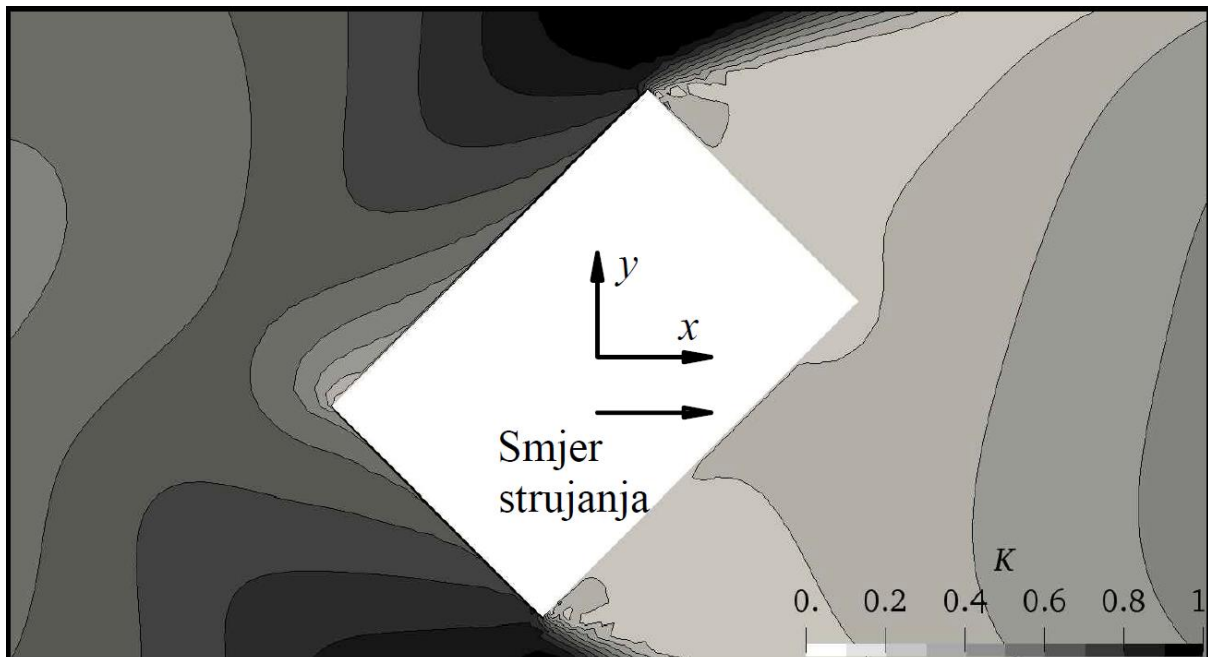


**g) Konfiguracija M1-B2-RT-0**

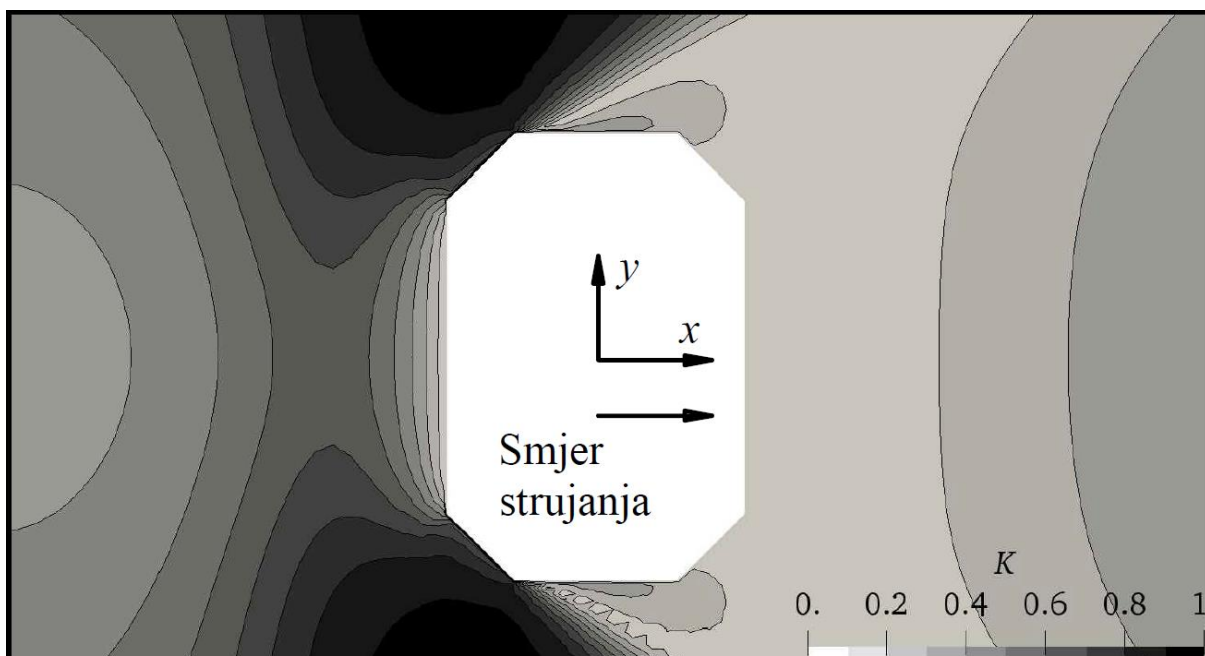


**h) Konfiguracija M1-B2-RT-30**

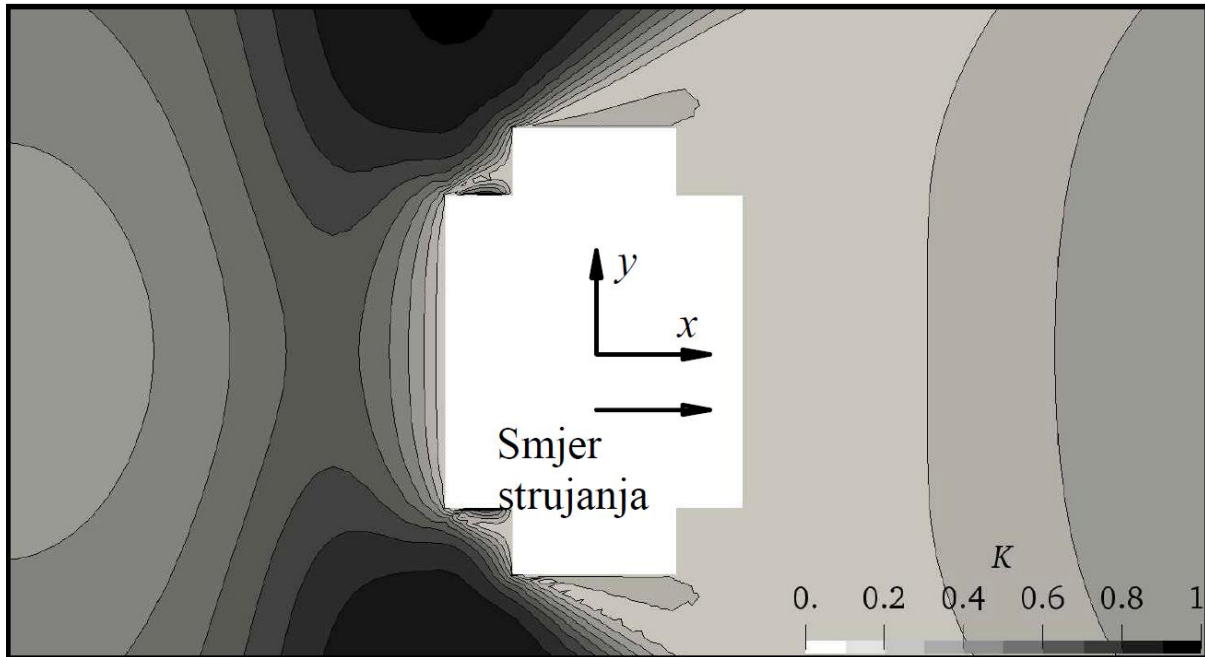




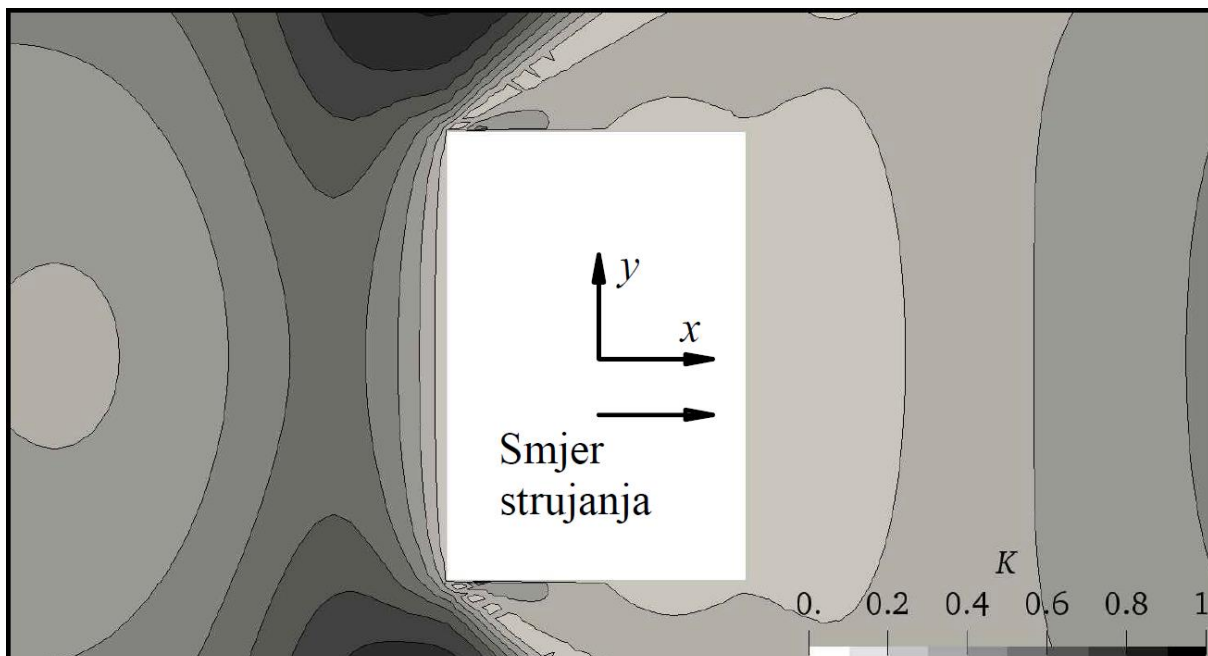
**i) Konfiguracija M1-B2-RT-45**



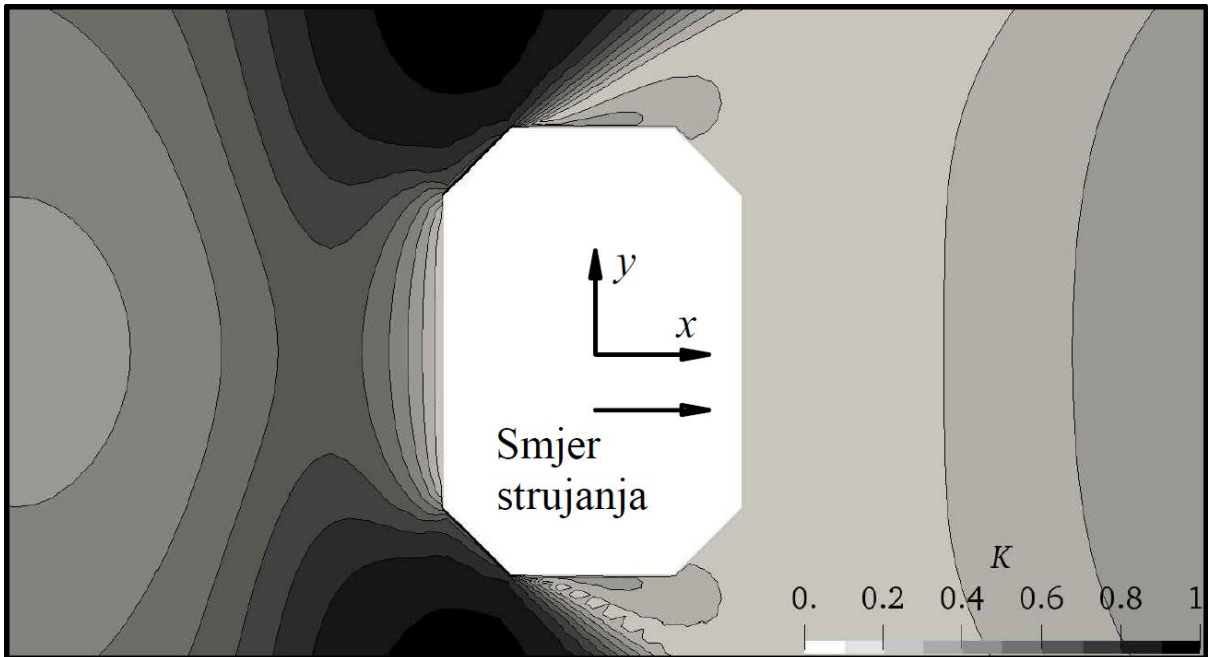
**j) Konfiguracija M2-B2-CH**



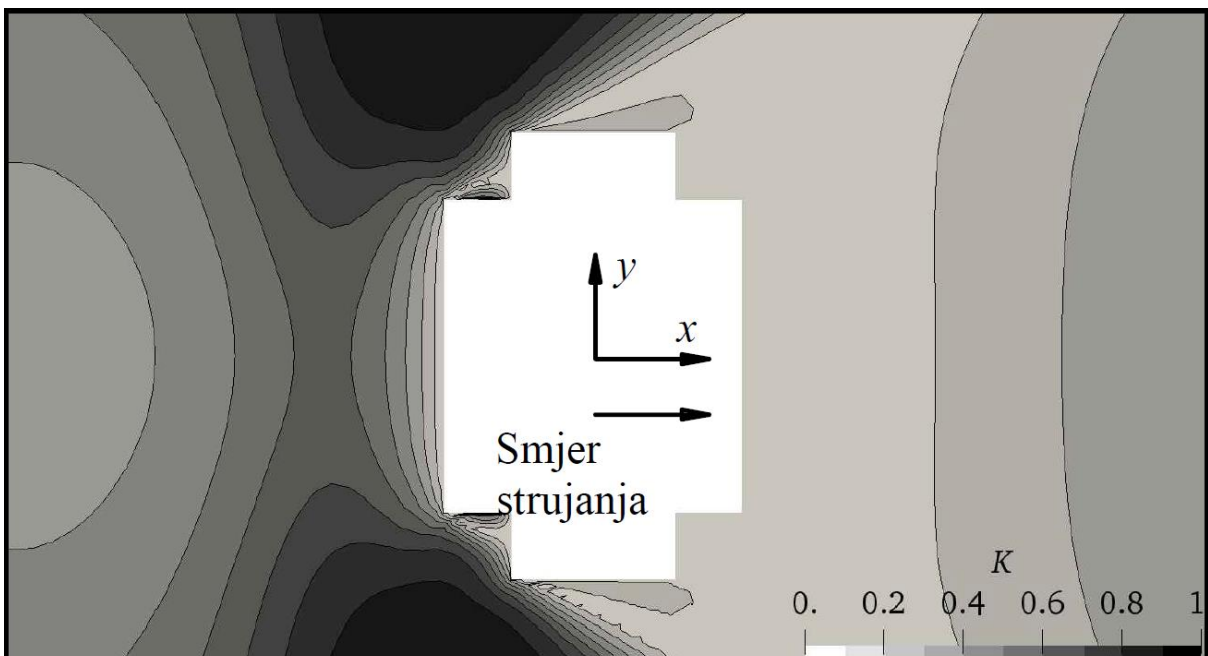
k) Konfiguracija M2-B2-RC



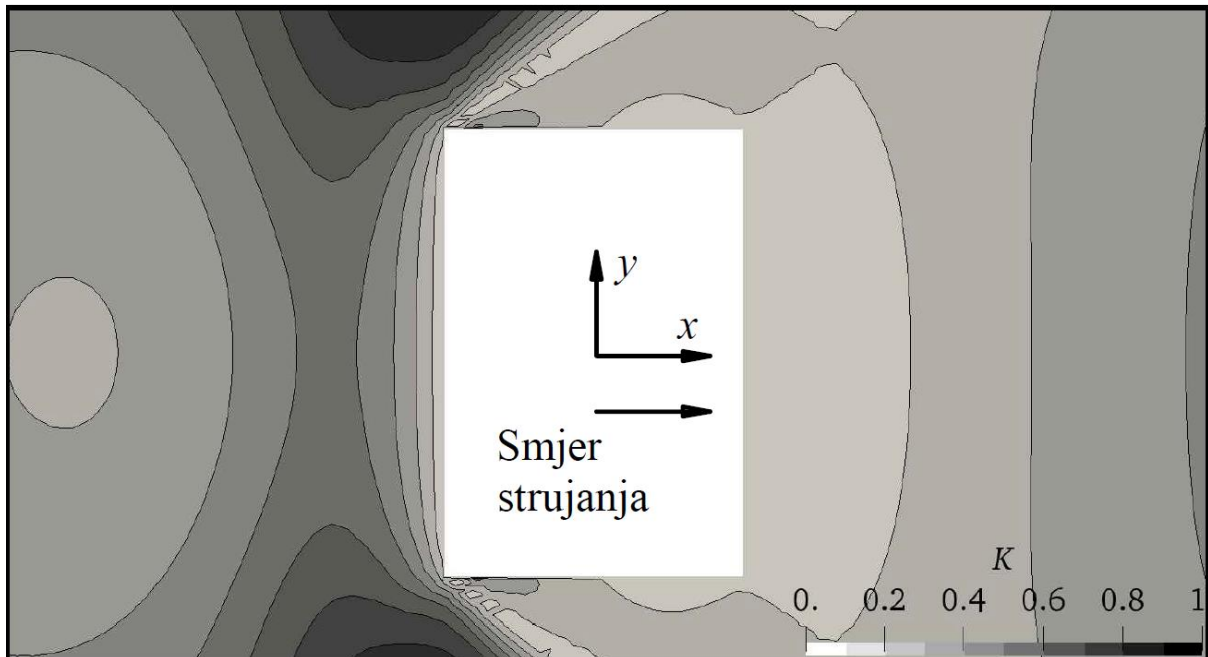
l) Konfiguracija M2-B2-RT



m) Konfiguracija M3-B2-CH



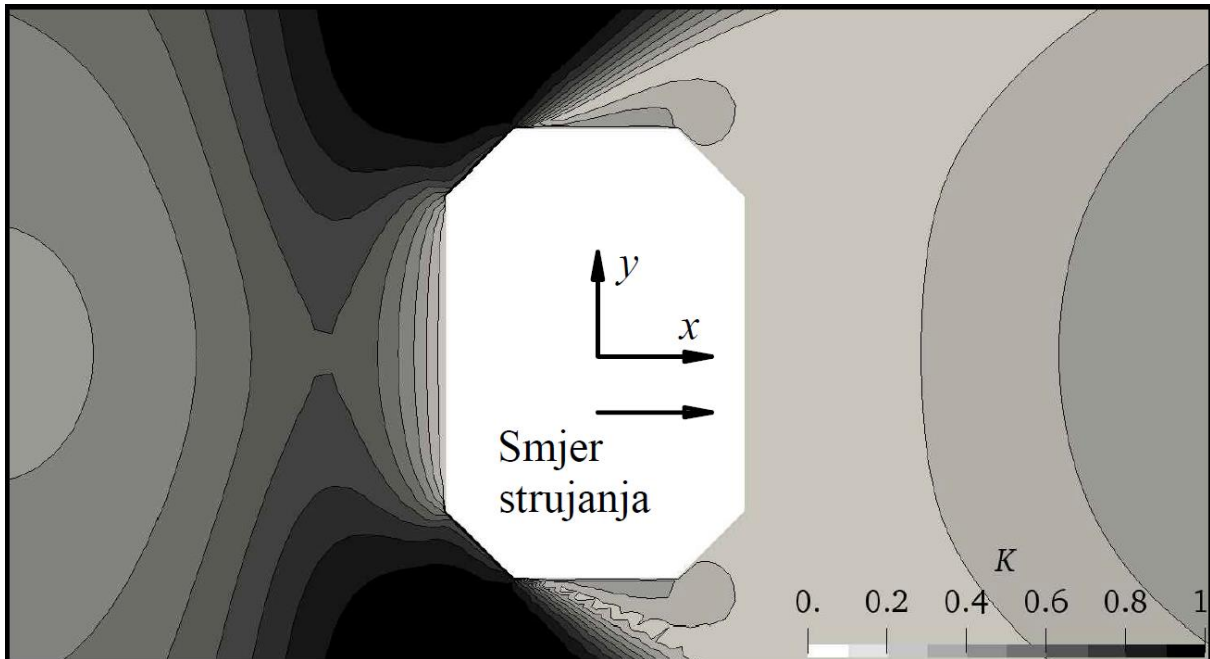
n) Konfiguracija M2-B2-RC



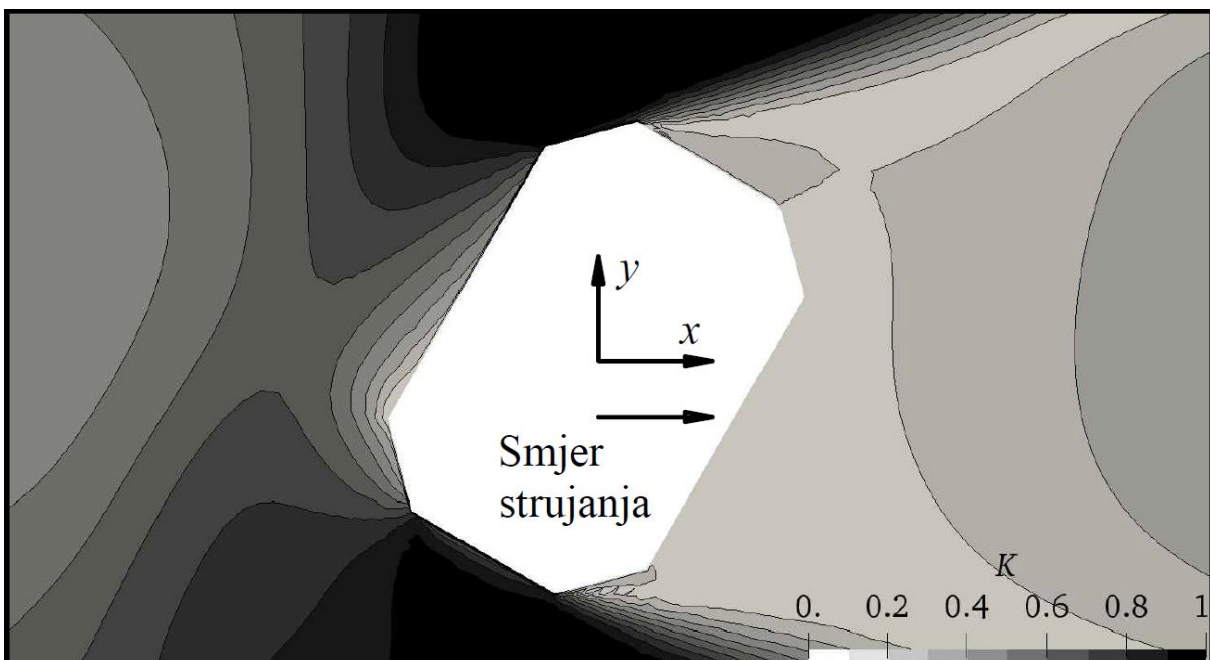
**o) Konfiguracija M3-B2-RT**

## 5.2. Rezultati polja koeficijenta ugode $K$ za ulazni profil prema Richardsu i Norrisu

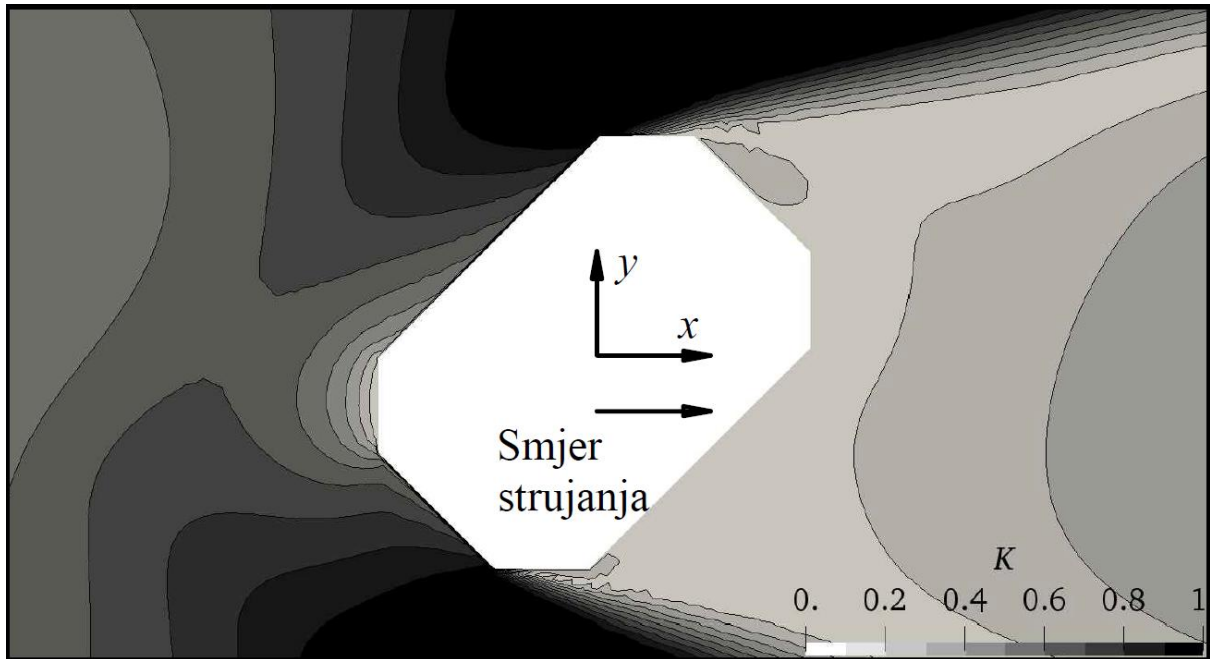
Slika 27 Prikaz polja koeficijenta ugode  $K$  za ulazni profil prema Richardsu i Norrisu



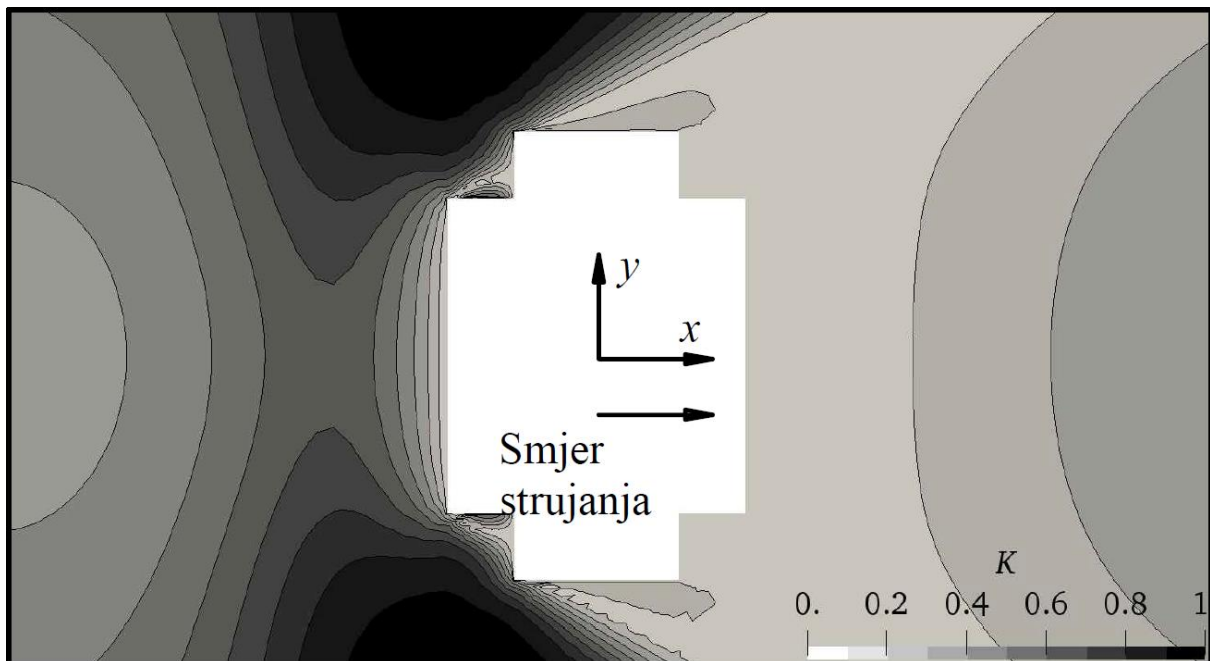
a) Konfiguracija M1-B2-CH-0



b) Konfiguracija M1-B2-CH-30

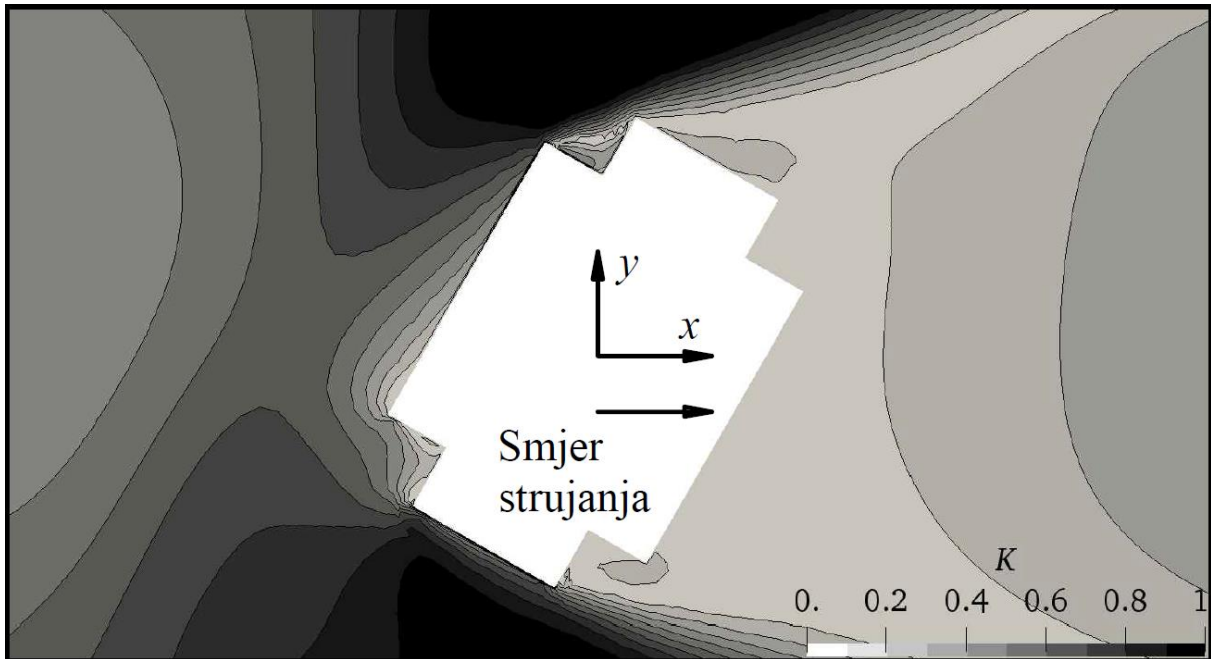


c) Konfiguracija M1-B2-CH-45

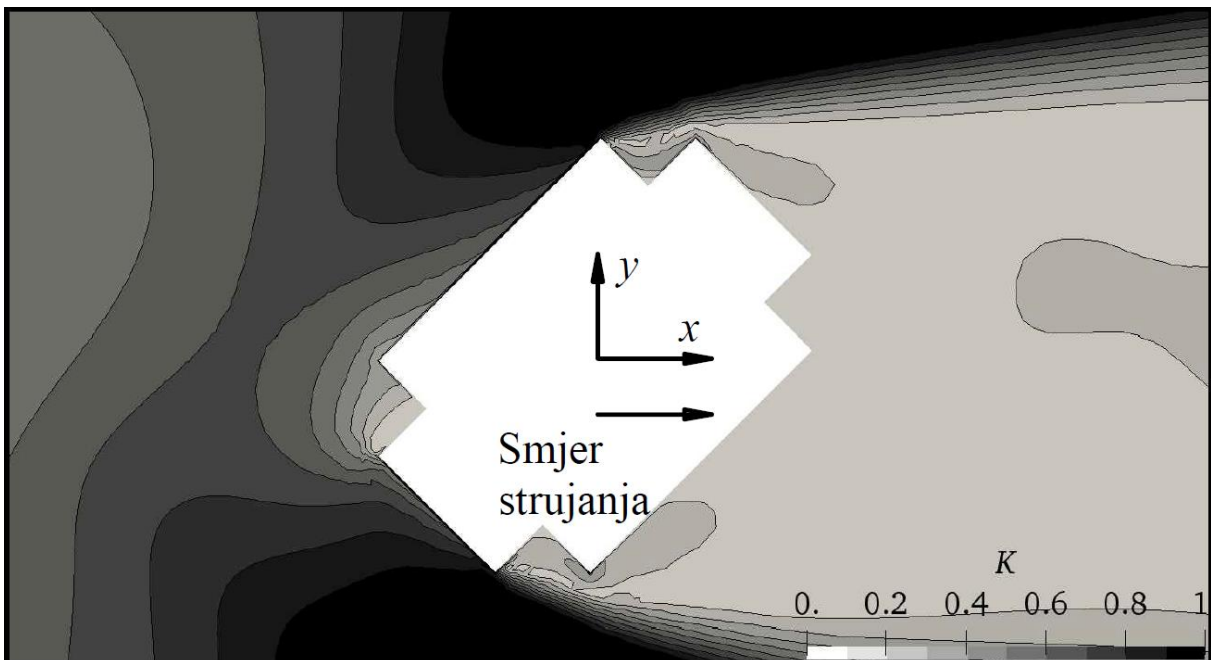


d) Konfiguracija M1-B2-RC-0

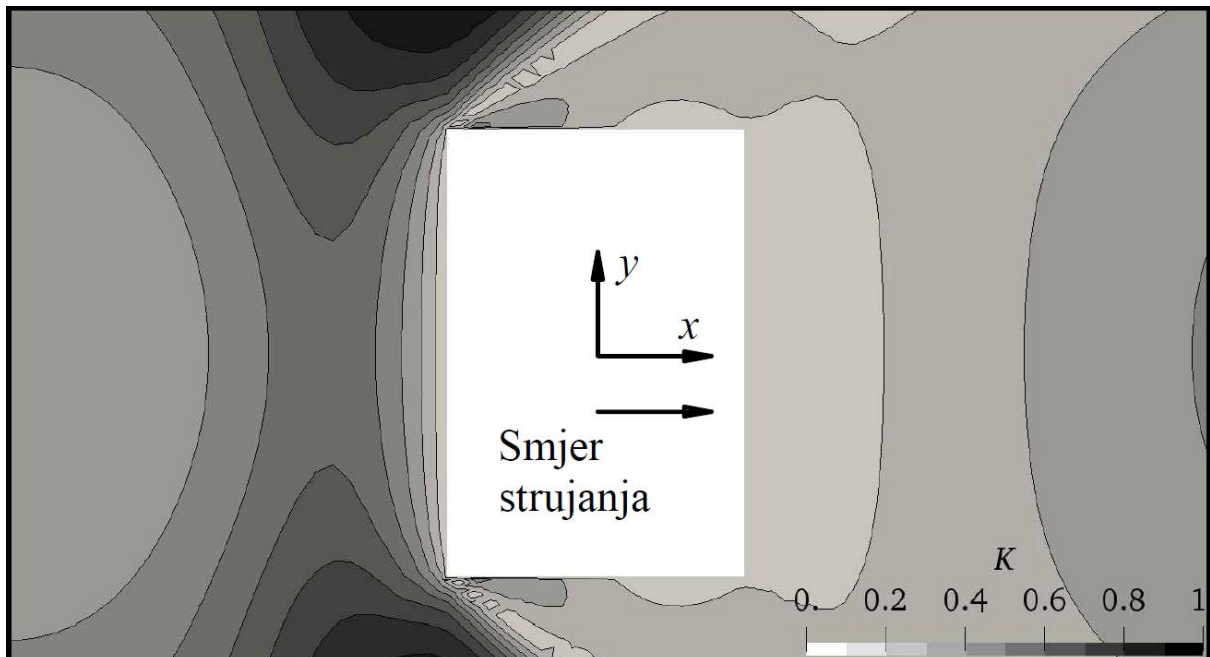




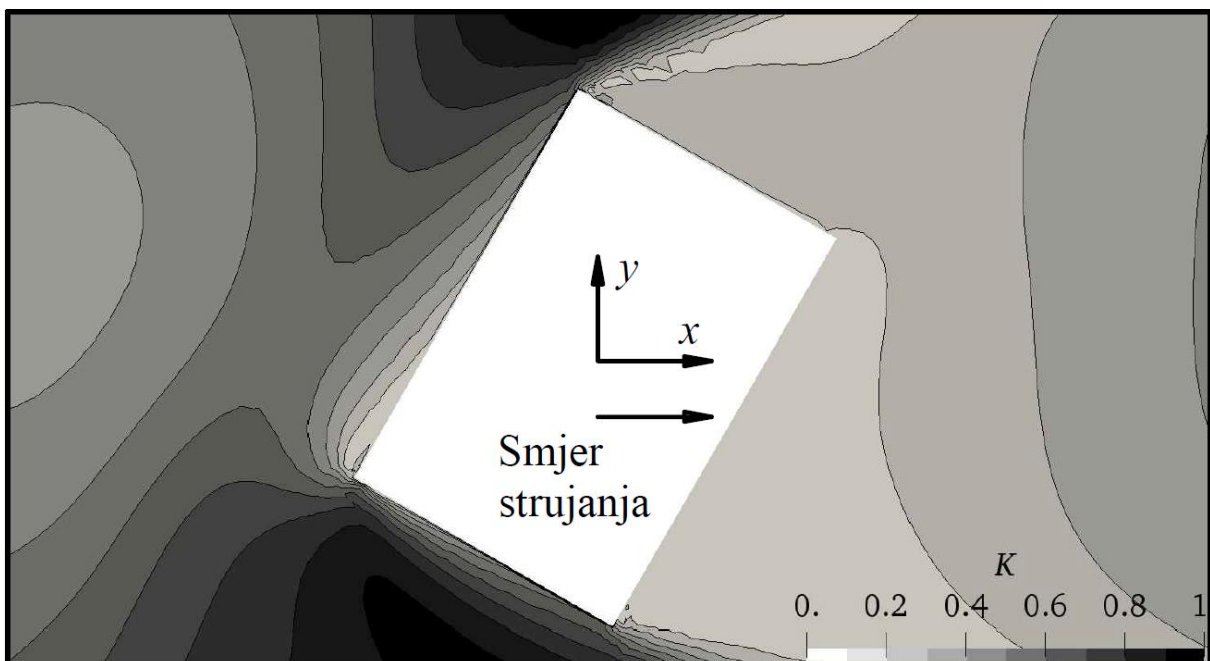
e) Konfiguracija M1-B2-RC-30



f) Konfiguracija M1-B2-RC-45

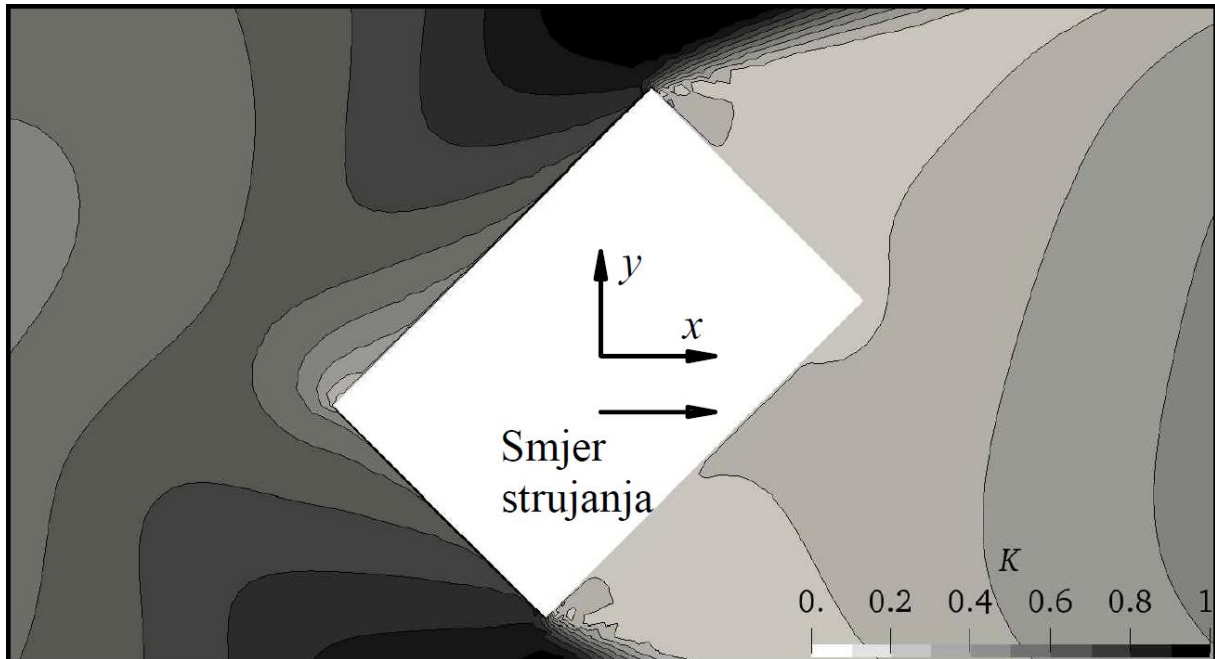


g) Konfiguracija M1-B2-RT-0

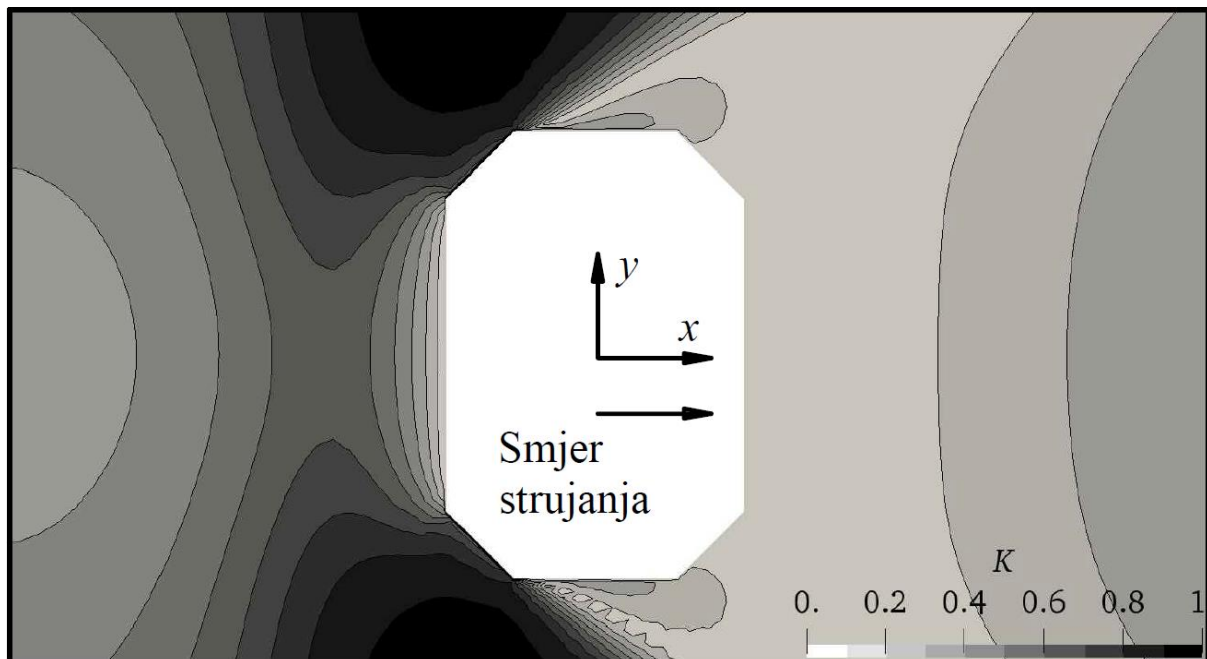


h) Konfiguracija M1-B2-RT-30

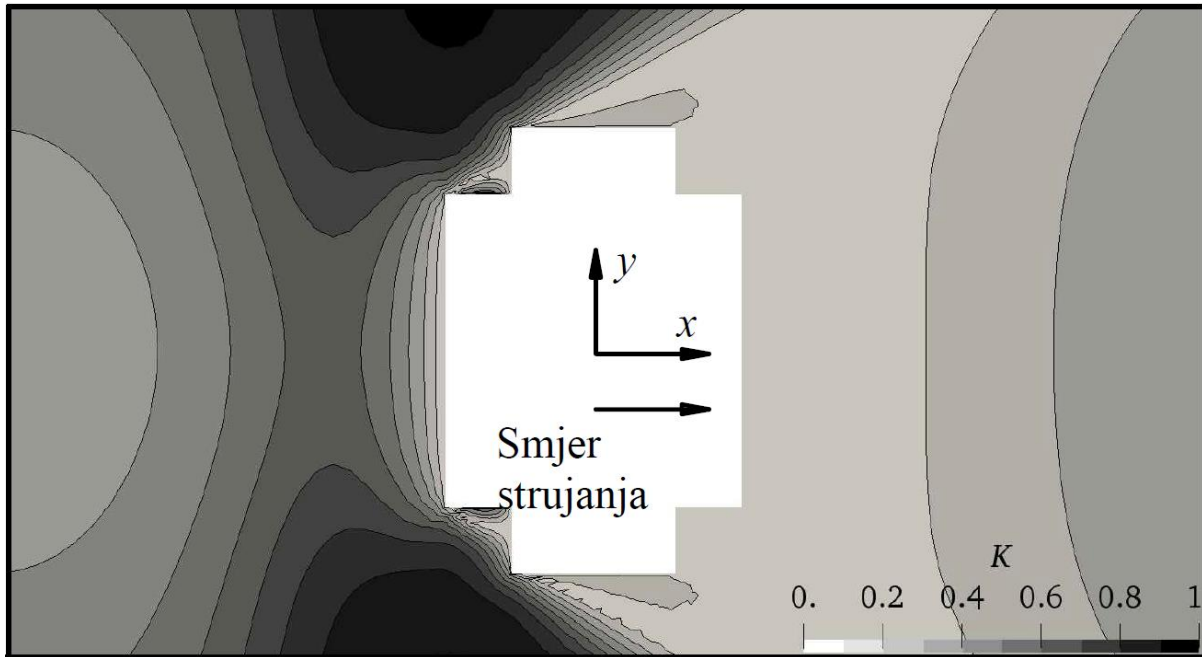




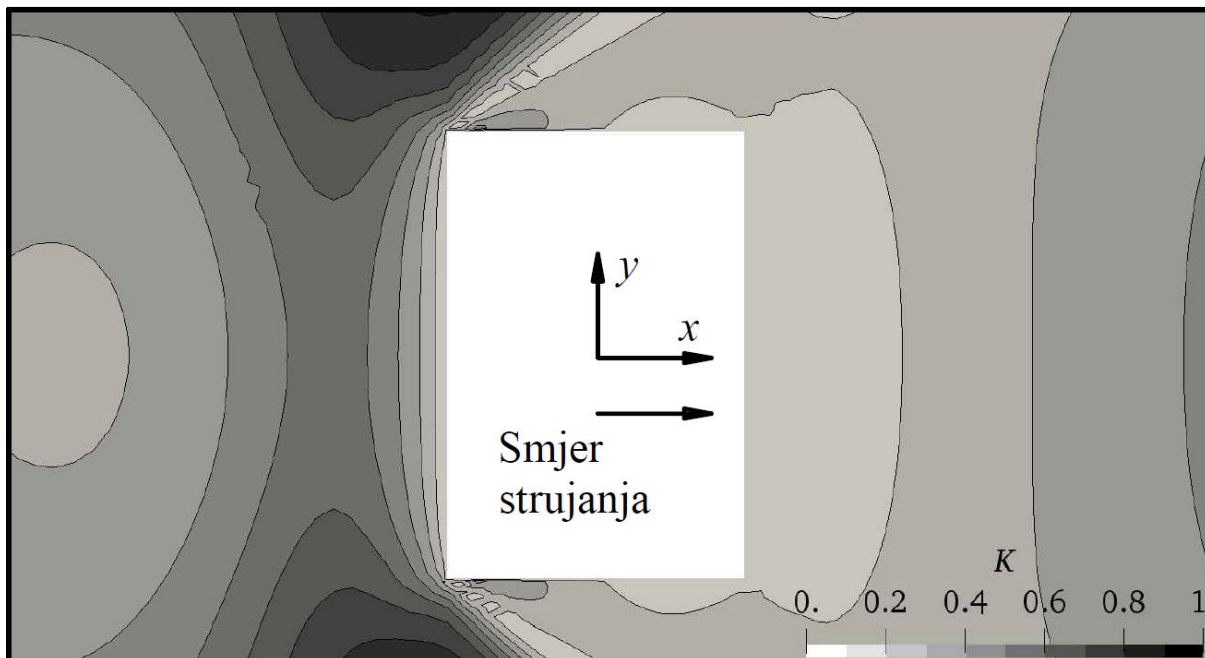
i) Konfiguracija M1-B2-RT-45



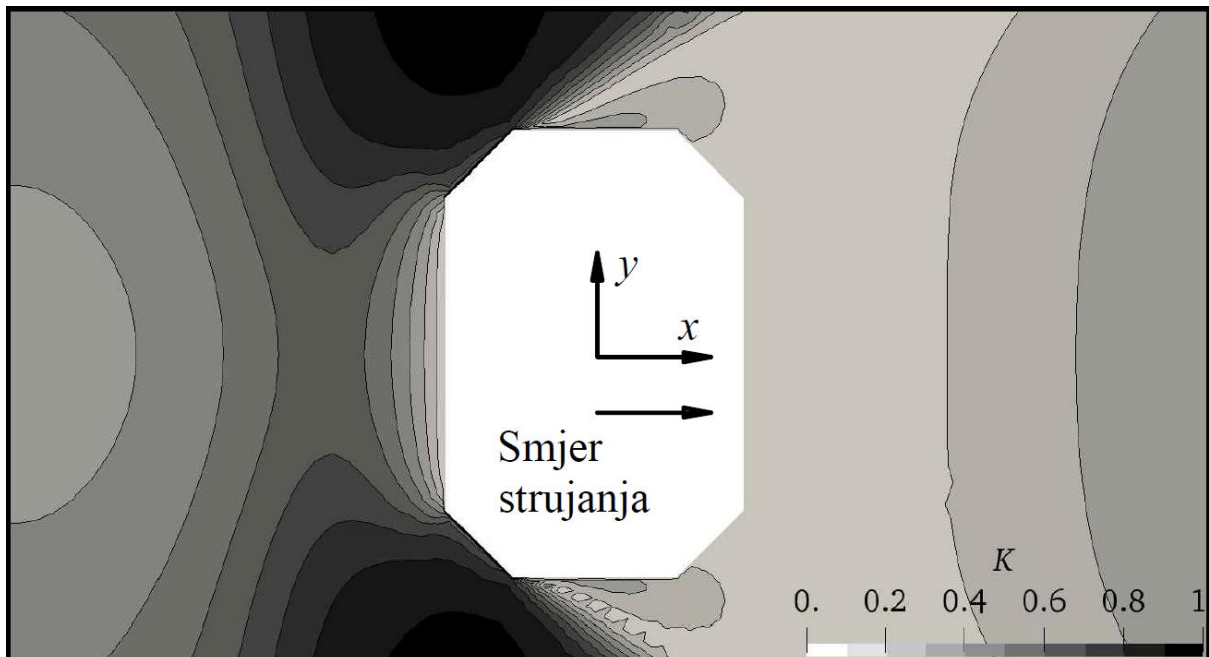
j) Konfiguracija M2-B2-CH



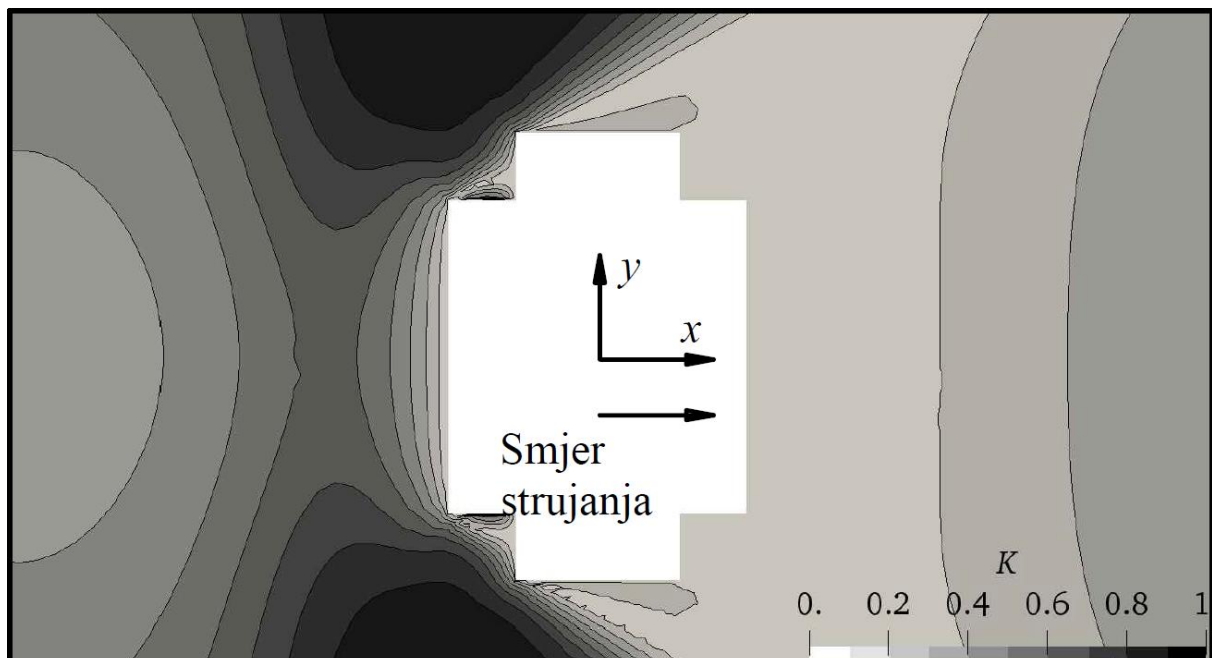
k) Konfiguracija M2-B2-RC



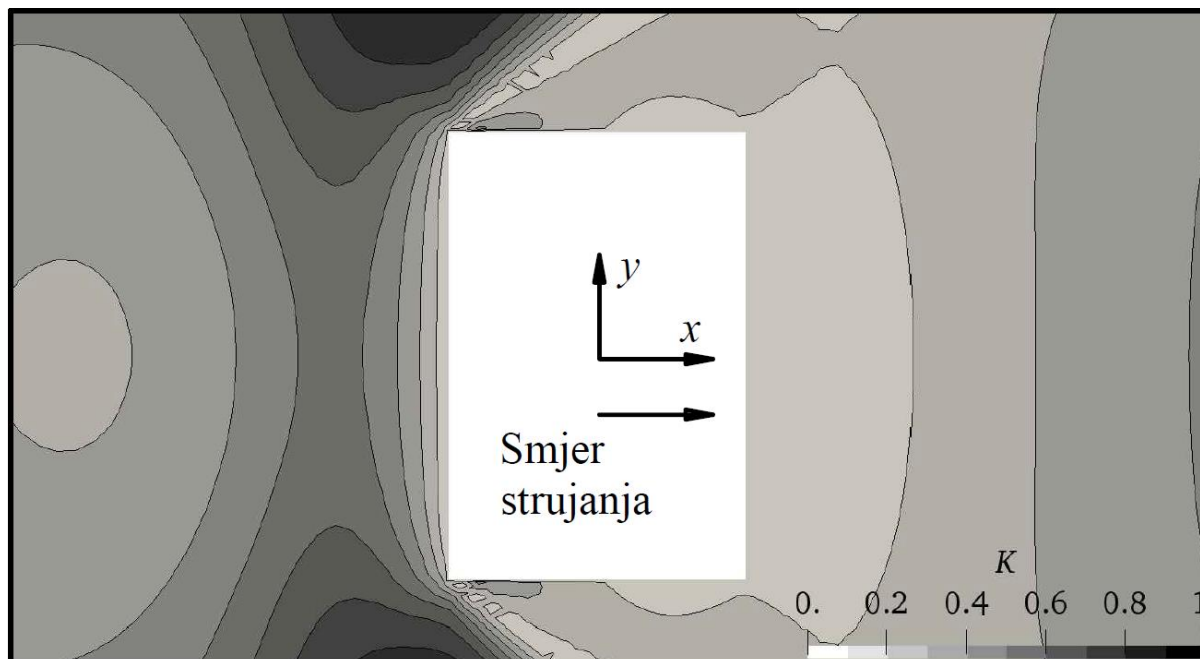
l) Konfiguracija M2-B2-RT



m) Konfiguracija M3-B2-CH



n) Konfiguracija M3-B2-RC



o) Konfiguracija M3-B2-RT

### 5.3. Analiza rezultata

Tablica 10 prikazuje maksimalne izračunate vrijednosti koeficijenta ugone  $K_{\max}$ , pri čemu  $K_{\max}^1$  predstavlja rezultate koeficijenta ugone dobivene iz proračuna sa zadanim ulaznim profilima prema Richardsu i Hoxeyu [21], a  $K_{\max}^2$  iz proračuna sa zadanim ulaznim profilima prema Richardsu i Norrisu [22] za analizirane konfiguracije zgrade, gdje su  $K_o$  očitane vrijednosti maksimalnog koeficijenta ugone iz [20] dobivene mjerenjima u zračnom tunelu. Relativna pogreška  $G^i$  se pritom računa kao

$$G^i = \frac{|K_{\max}^i - K_o|}{K_o}. \quad (5.2)$$

**Tablica 10** Usporedba maksimalnih vrijednosti koeficijenta ugone  $K_{\max}$  s dostupnim maksimalnim vrijednostima izmjerenim u zračnom tunelu [20]

	$K_{\max}^1$	$K_{\max}^2$	$K_o$	$G^1$	$G^2$
M1-B2-CH-0	0,83	0,83	-	-	-
M1-B2-CH-30	0,90	0,91	-	-	-
M1-B2-CH-45	0,94	0,94	0,90	0,044	0,044
M1-B2-RC-0	0,83	0,83	-	-	-

M1-B2-RC-30	0,9	0,9	-	-	-
M1-B2-RC-45	0,93	0,96	0,92	0,011	0,043
	$K^1$	$K^2$	$K_o$	$G^1$	$G^2$
M1-B2-RT-0	0,82	0,82	-	-	-
M1-B2-RT-30	0,89	0,88	-	-	-
M1-B2-RT-45	0,91	0,92	0,97	0,062	0,052
M2-B2-CH	0,796	0,82	0,795	0,001	0,031
M2-B2-RC	0,79	0,82	0,80	0,013	0,025
M2-B2-RT	0,78	0,82	0,815	0,043	0,006
M3-B2-CH	0,80	0,82	0,80	0	0,025
M3-B2-RC	0,79	0,82	0,80	0,013	0,025
M3-B2-RT	0,77	0,82	0,79	0,025	0,038

Usporedimo li izračunate maksimalne vrijednosti koeficijenta ugone koje se javljaju u okolini analiziranih konfiguracija zgrade (Tablica 10) s referentnim vrijednostima koeficijenta ugone  $K$  danim u Tablica 9, dobivena rješenja se svrstavaju pod prihvatljive brzine strujanja zraka. Tablica 10 prikazuje odnos proračunatih vrijednosti koeficijenta ugone i očitanih vrijednosti iz [20] iz čega se vidi kako je računalnim modelom moguće dobro modelirati dostupna mjerenja iz zračnog tunela (izračunate relativne greške za sve konfiguracije ne prelaze vrijednost od 6,5%).

### 5.3.1. Utjecaj dimenzija zgrade

Utjecaj dimenzija zgrade se promatrao na konfiguracijama čije su arhitektonske karakteristike usporedive. Kako se želi analizirati utjecaj dimenzija zgrade na sigurnost i osjećaj ugone pješaka u okolini izdignute zgrade, potrebno je odabrati konfiguracije kod kojih su se samo one i mijenjale. Naime, konfiguracije čiji se rezultati mogu usporediti za određivanje utjecaja dimenzija zgrade su M1-B2-CH-0, M2-B2-CH te M3-B2-CH, zatim M1-B2-RC-0, M2-B2-RC te M3-B2-RC i na kraju M1-B2-RT-0, M2-B2-RT te M3-B2-RT. Rezultati polja koeficijenta ugone  $K$  pokazuju više vrijednosti kod konfiguracija zgrada veće visine  $H$ , zone prihvatljive brzine strujanja (Tablica 9,  $0,3 < K < 0,7$ ) se

manjuju te se može smatrati kako je ukupna visina zgrade  $H$  jedan od utjecajnijih faktora na osjećaj ugone pješaka u izdignutom dijelu zgrade (u okolini jezgre zgrade).

### **5.3.2. Utjecaj oblika nosivog dijela zgrade (jezgre zgrade)**

Utjecaj oblika nosivog dijela zgrade (jezgre zgrade) se analizirao na konfiguracijama zgrada između kojih je jedina razlika oblik nosivog dijela zgrade. Odabrane konfiguracije su M1-B2-CH-0, M1-B2-RC-0 te M1-B2-RT-0, zatim M1-B2-CH-30, M1-B2-RC-30 te M1-B2-RT-30, zatim M1-B2-CH-45, M1-B2-RC-45 te M1-B2-RT-45, zatim M2-B2-CH, M2-B2-RC te M2-B2-RT i na kraju zatim M3-B2-CH, M3-B2-RC te M3-B2-RT.

Računalna analiza ukazuje kako oblici CH i RC nosivog dijela zgrade poboljšavaju strujanje u razini čovjeka uokolo nosivog dijela zgrade povećavajući zonu prihvatljive brzine strujanja (Tablica 9,  $0,3 < K < 0,7$ ) i smanjujući maksimalni iznos koeficijenta ugone  $K_{\max}$ . Spomenuti oblici više pridonose poboljšanju kvalitete strujanja vjetra na visinama koje odgovaraju visini pješaka pri kutu nastrojavanja od  $\gamma = 0^\circ$  nego pri ostalim kutovima nastrojavanja.

### **5.3.3. Utjecaj kuta nastrojavanja $\gamma$**

Utjecaj kuta nastrojavanja  $\alpha$  se analizirao na konfiguracijama zgrada između kojih je jedina razlika kut nastrojavanja zraka. Odabrane konfiguracije su M1-B2-CH-0, M1-B2-CH-30 te M1-B2-CH-45, zatim M1-B2-RC-0, M1-B2-RC-30 te M1-B2-RC-45 i M1-B2-RT-0, M1-B2-RT-30 te M1-B2-RT-45. Strujanje pri  $\gamma = 0^\circ$  rezultira najpovoljnijim vrijednostima koeficijenta ugone  $K$ . Rezultati također pokazuju da kako kut nastrojavanja  $\gamma$  raste tako raste i brzina strujanja na razini čovjeka uokolo zgrade, te se tako smanjuje zona prihvatljive brzine strujanja.

### **5.3.4. Utjecaj zadanih ulaznih profila**

Utjecaj zadanih ulaznih profila prema Richardsu i Hoxeyu [21] te Richardsu i Norrisu [22] se ispitaio na svih 15 ispitanih konfiguracija zgrade. Kod strujanja oko najviših konfiguracija zgrade, neovisno o kutu nastrojavanja i o obliku nosivog dijela zgrade (sve konfiguracije čiji naziv počinje sa M1), gdje su i brzine strujanja u razini čovjeka najviše, nema primjetnih razlika u rezultatima. Kod nižih konfiguracija postoje razlike u dobivenim rezultatima. Kod proračuna gdje su ulazni profili zadani prema Richardsu i

Norrisu [22], dobivene su nešto veće brzine strujanja vjetra u okolini zgrade na visinama koje odgovaraju visini pješaka. S obzirom na zadane ulazne profile, najmanje su razlike u rezultatima kod CH oblika nosivog dijela zgrade, veće su razlike kod RC, a najveće su kod RT oblika nosivog dijela zgrade.

## 6. ZAKLJUČAK

U radu su analizirani utjecajni parametri prilikom strujanja vjetra oko zgrade s izdignutim stambenim dijelom, i to dimenzije zgrade, oblik nosivog dijela zgrade, kutovi nastrujavanja zraka na zgradu te dva različita tipa homogenog atmosferskog graničnog sloja. Kako bi se odredili utjecajni faktori prilikom strujanja vjetra oko zgrade izdignutog dizajna, u radu su provedene trodimenzionalne stacionarne računalne simulacije strujanja zraka uz korištenje osrednjenih Navier-Stokesovih jednadžbi i standardnog  $k-\varepsilon$  modela turbulencije.

Kako bi se osigurali pravilni uvjeti nastrujavanja vjetra na zgradu bilo je potrebno pravilno modelirati homogeni atmosferski granični sloj. U radu su stoga modelirana dva tipa homogenog atmosferskog graničnog sloja, tj. granični sloj pogonjen smičnim naprezanjem i granični sloj pogonjen razlikom tlaka. Kako bi se potvrdila homogenost strujanja u računalnoj domeni provedena je i analiza homogenosti strujanja u praznoj računalnoj domeni (bez modela zgrade). Analizom je pokazano kako je razlika između profila fizikalnih veličina na ulazu u domenu u usporedbi s profilima izmjenjenim na poziciji na kojima se treba nalaziti model izdignute zgrade nezamjetna.

U radu je provedeno i ispitivanje osjetljivosti rješenja na rezoluciju mreže. Pokazano je kako je s aspekta očuvanja računalnih resursa za računalnu analizu najpovoljnije koristiti srednju mrežu koja se sastoji od otprilike 1,2 milijuna volumena.

U radu su prikazani rezultati izračunatih polja koeficijenata ugone  $K$  u ravnini koja se nalazi na dva metra visine od tla (visina koja odgovara visini pješaka), uokolo nosivog dijela zgrade (jezgre zgrade), a što se na svim analiziranim konfiguracijama nalazi ispod gornjeg stambenog dijela zgrade.

Na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Visina zgrade jedan je od bitnijih arhitektonskih parametara zgrade jer izravno utječe na osjećaj ugone pješaka u blizini izdignute zgrade. Pokazano je kako se područje prihvatljive brzine strujanja ( $0,3 < K < 0,7$ ) smanjuje s povećanjem visine zgrade.
- Kut nastrujavanja zraka također bitno utječe na osjećaj ugone pješaka u blizini izdignute zgrade. Strujanje u razini čovjeka uokolo nosivog dijela zgrade najpovoljnije je za slučaj okomitog nastrujavanja zraka ( $\gamma = 0^\circ$ ), a zona



prihvatljive brzine strujanja ( $0,3 < K < 0,7$ ) se smanjuje kad se kut nasmrujavanja povećava. Razlog tome je što dolazi do ubrzavanja strujanja zbog smanjenja otpora oblika zgrade.

- Oblik nosivog dijela zgrade (jezgre zgrade) na rezultate najviše utječe pri okomitom nasmrujavanju zraka na zgradu ( $\gamma = 0^\circ$ ), a najpovoljniji uvjeti strujanja se ostvaruju kod oblika CH (jezgra sa skošenim rubovima) te najlošiji za RT oblik (jezgra s pravokutnim rubovima) nosivog dijela zgrade.
- Zadani ulazni profili ne utječu na strujanje toliko značajno kao visina zgrade ili kut nasmrujavanja zraka. Međutim, dobiveni rezultati ukazuju da kod nižih zgrada (kod kojih je i manja brzina strujanja vjetra na visinama koje odgovaraju visini pješaka) dolazi do manjih razlika u dobivenim numerički vrijednostima izračunatih koeficijenata ugone  $K$ .

## LITERATURA

- [1.] Isyumov N, Davenport AG. 1975. *The ground level wind environment in built-up areas*. In: Proceedings of Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures. Heathrow, UK, Cambridge University Press, 403-422.
- [2.] Stathopoulos T., i Storms R. 1986. *Wind environmental conditions in passages between buildings*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 19 – 31.
- [3.] Yoshikawa I., Kawamura H., Okuda K., Toba, Y. 1988. *Turbulent structure in water under laboratory wind waves*. Journal of the Oceanographical Society of Japan. 143-156.
- [4.] Ratcliff MA, Peterka JA. 1989. *Comparison of pedestrian level wind acceptability criteria*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 36:791-800
- [5.] Conan B., Beeck J., Aubrun S. 2012. *Sand erosion technique applied to wind resource assesment*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 104-106, 322-329.
- [6.] Wu H., Stathopoulos T., 1993. *Wind - Tunnel Techniques for Assessment of Pedestrian - Level Winds*, Journal of Engineering Mechanics 119:10.
- [7.] Flaga A., Lipecki T., Wielgos P., 2018. *Simulation of stochastic wind action on transmission power lines*. In: Proceedings of AIP Conference 1922.
- [8.] Tamura Y., Xu X., Yang Q., 2019. *Characteristics of pedestrian-level Mean wind speed around square buildings: Effects of height, width, size and approaching flow profile*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 192, 74-87.
- [9.] Blocken B., Beeck J., Stathopoulos T., 2016. *Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment*, Building and Environment 100:50-81.
- [10.] Blocken B., Stathopoulos T., 2013. *CFD simulation of pedestrian-level wind conditions around buildings: Past achievements and prospects*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 121, 138-145.
- [11.] Blocken B., Carmeliet J., 2004. *Pedestrian Wind Environment around Buildings: Literature Review and Practical Examples*, Journal of Building - Physics 28:107-159.
- [12.] Du Y, Mak CM, Liu J, Xia Q, Niu J, Kwok KCS, *Effects of lift-up design on pedestrian level wind comfort in different building configurations under three wind directions*, Building and Environment (2017), doi:10/1016.
- [13.] Druenen T., Hooff T., Montazeri H., Bocken B., 2019. *CFD evaluation of building geometry modifications to reduce pedestrian-level wind speed*, Building and Environment 163.
- [14.] Blocken B., Janssen W., Hooff T., 2012. *CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus*, Environmental Modelling and Software 30:15-34.

- [15.] Janssen W., Blocken B., Hooff T., 2013. *Pedestrian wind comfort around buildings: Comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study*, Building and Environment 59:547-562.
- [16.] Blocken B., Persoon J., 2009. *Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 97, 255-270.
- [17.] Tse KT, Xuelin Z, Weerasuriya AU, Li SW, Kwok KCS, Mak CM, Niu J, *Adopting 'lift-up' building design to improve the surrounding pedestrian-level wind environment*, Building and Environment, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.03.011.
- [18.] Tse KT, Xuelin Z, Weerasuriya AU, Li SW, Kwok KCS, Mak CM, Niu J, Zhang L., 2017. *Evaluation of pedestrian wind comfort near 'lift-up' buildings with different aspect ratios and central core modifications*, Building and Environment 124: 245-257.
- [19.] Du Y, Mak CM, Liu J, Xia Q, Niu J, Kwok KCS, *Effects of lift-up design on pedestrian level wind comfort in different building configurations under three wind directions*, Building and Environment (2017), doi: 10.1016/j.buildenv.2017.03.001.
- [20.] Tse KT, Xuelin Z, Weerasuriya AU, Li SW, Kwok KCS, Mak CM, Niu J, Zhang L., 2018. *Pedestrian-level wind conditions in the space underneath lift-up buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 179, 58-69.
- [21.] Richards P.J., Hoxey R.P., 1993. *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering using the  $k - \epsilon$  turbulence model*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 46 & 47, 145-153.
- [22.] Richards P.J., Norris S.E., 2015. *Appropriate boundary conditions for a pressure driven boundary layer*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 142, 43-52.
- [23.] Cai X., Huo Q., Kang L., Song Y., 2014., *Equilibrium Atmospheric Boundary-Layer Flow: Computational Fluid Dynamics Simulation with Balanced Forces*, Boundary Layer Meteorology, 153:349-366.
- [24.] Cindori M., Juretić F., Kozmar H., Džijan I., 2018. *Steady RANS model of the homogeneous atmospheric boundary layer*, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 173:289-301.
- [25.] Kozmar, H., 2005. *Utjecaj mjerila na strukturu modeliranog atmosferskog graničnog sloja*. PhD thesis, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu.
- [26.] Kozmar H., 2000. Diplomski rad, *Modeliranje atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu.
- [27.] Cindori M., 2016. Diplomski rad, *Nova metoda za računalno modeliranje atmosferskog graničnog sloja*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu.
- [28.] Dyrbye, C., Hansen, S.O. *Wind Loads on Structures*. John Wiley and Sons, 1997.
- [29.] Counihan, J., *Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972*, Atmospheric Environment, 9:871-905, 1975.

- [30.] Jasak, H. *Error Analysis and Estimation in the Finite Volume Method With Application to Fluid Flows*. PhD thesis, Imperial College, University of London, 1996.
- [31.] Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B.E. *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. Cost Action 732: Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models*, 2007.
- [32.] Blocken B., 2015., *Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations*, Building and Environment, 91:294-245
- [33.] Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H, Nozu T., 2008. *AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings*, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 96:1749-1761.
- [34.] Mehanika Fluida II ,  
[https://www.fsb.unizg.hr/hydro/pdf/Nastavni\\_materijali/MFII\\_Predavanja.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/hydro/pdf/Nastavni_materijali/MFII_Predavanja.pdf), 2013. Predavanja.

## **PRILOZI**

[I.] CD-R disc