

# Utjecaj hrapavosti terena na dimenzije recirkulacijske zone vjetra nizvodno od zgrade

Emil BARIĆ, Ivo DŽIJAN i  
Hrvoje KOZMAR

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu (Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb), Ivana Lučića 5, HR-10000 Zagreb,  
Republic of Croatia

ivo.dzijan@fsb.hr

## Ključne riječi

Aerodinamika zgrada  
Računalna dinamika fluida  
Atmosferski granični sloj  
 $k$ - $\epsilon$  model turbulencije

## Keywords

Building aerodynamics  
Computational fluid dynamics  
Atmospheric boundary layer  
 $k$ - $\epsilon$  turbulence model

Received (primljeno): 2011-11-12

Accepted (prihvaćeno): 2012-06-26

## 1. Uvod

U proteklih nekoliko desetljeća diljem svijeta je zabilježen značajan porast koncentracije štetnih plinova u zraku koji je najčešće uzrokovan povećanjem količine ispušnih plinova iz vozila, ali i kao posljedica emisije iz velikih industrijskih postrojenja [1-3]. Toksikološke studije upozoravaju na korelaciju između koncentracije štetnih tvari u zraku i pogoršanja zdravstvenog stanja ljudi, kao npr. oštećenja dišnih puteva i srčane bolesti, problemi u trudnoći i premala težina novorođenčadi [4-8], čak i ako su zabilježene koncentracije štetnih plinova u zraku relativno niske [9]. Nadalje, izloženost ugljikovom monoksidu kao produktu nepotpunog izgaranja u automobilskim motorima uzrokuje smanjenje sposobnosti eritrocita da za sebe vežu kisik, čime je onemogućen dotok kisika do organa [10]. Čak i kratka izloženost povećanoj koncentraciji ugljikova monoksida može imati za posljedicu različita akutna oboljenja. S druge pak strane postoje spojevi, kao npr. benzen, koji

Izvornoznanstveni rad

U radu je postavljen model računalne simulacije strujanja vjetra oko zgrade pravokutnog presjeka s ciljem određivanja dimenzije zone recirkulacije iza zgrade u ovisnosti o hrapavosti terena na kojem se zgrada nalazi. Proračun je proveden računalnim paketom Fluent 6.2, a temelji se na rješavanju osrednjenih Navier-Stokesovih jednadžbi uz primjenu  $k$ - $\epsilon$  modela turbulencije, i to za dva različita kuta nastrojavanja vjetra na zgradu, tj. strujanje okomito na kraću i okomito na dužu stranicu zgrade. Određivanje dimenzije zone recirkulacije je provedeno za tri različite hrapavosti terena, pri čemu su karakteristike hrapavosti terena i strujanja vjetra u prirodi preuzete iz međunarodnog ES DU 85020 standarda. Postavljeni računalni model je validiran usporedbom s rezultatima mjerenja u prirodi za jedan tip hrapavosti terena. Dobiveni rezultati ukazuju na smanjenje duljine zone recirkulacije s povećanjem hrapavosti terena, pri čemu je postignuta zadovoljavajuća sličnost s rezultatima mjerenja u prirodi.

## Effect of Terrain Roughness on the Building Wake Dimensions

Original scientific paper

A computational model has been developed to determine wind characteristics in the wake of a rectangular building and validated against previous field-test results. Dimensions of the recirculation zone behind the building have been determined using the Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) equations for two different wind incidence angles, i.e. for wind normal to the longer building side and for wind normal to the shorter building side. Obtained results show a decrease in the recirculation zone length for rougher terrains. Therefore, numerical results presented in this paper proved to be in good agreement with full-scale results indicating that the approach taken in this study can be successfully applied in calculating dimensions of recirculation zone in the wake of a rectangular building for various terrain types.

su opasni u slučaju dugotrajne izloženosti organizma tim spojevima jer mogu uzrokovati pojavu tumora [11]. Također postoje i spojevi, kao npr.  $\text{NO}_2$ , koji štetno djeluju i nakon dugotrajne i nakon kratkotrajne izloženosti njihovim povećanim koncentracijama. Negativni učinci emisije štetnih tvari u atmosferi mogu biti u velikoj mjeri smanjeni, ili čak i potpuno izbjegnuti, proučavanjem karakteristika strujanja vjetra u prirodi i mehanizama njihova širenja odnosno disperzije u ovisnosti o arhitekturi objekata u čijoj se blizini promatraju karakteristični procesi disperzije [12].

Postoji nekoliko različitih pristupa proučavanju disperzije štetnih tvari u atmosferi: mjerenja u realnom vremenu i na stvarnim objektima, simulacije u zračnom tunelu i računalne simulacije uz primjenu računalne dinamike fluida (CFD). Ispitivanja na stvarnim objektima daju najpotpunije podatke, obuhvaćajući kompleksnost pojava unutar atmosferskog graničnog sloja, ali pritom nije moguće kontrolirati vremenske uvjete koji mogu biti važan utjecajan faktor prilikom mjerenja. Nadalje,

**Oznake /Symbols**

$d$	- debljina istisnuća, m - displacement height
$I_u$	- intenzitet turbulencije, % - turbulence intensity
$k$	- kinetička energija turbulencije, $m^2/s^2$ - turbulence kinetic energy
$L_{u,x}$	- integralna duljinska mjera turbulencije, m - integral length scale of turbulence
$u$	- brzina, m/s - velocity

$\alpha$	- eksponent zakona potencije - power law exponent
$\varepsilon$	- disipacija kinetičke energije turbulencije, $m^2/s^3$ - turbulence dissipation rate

**Indeksi/Indices**

avg	- osrednjena vrijednost - average flow parameters
ref	- referentna visina (visina zgrade) - reference height (building height)

rezultati dobiveni mjerenjima na već izvedenim objektima mogu se koristiti isključivo na sličnim objektima koji se planiraju graditi u budućnosti, jer na već izvedenim objektima nije moguće izvesti dodatne građevinske zahvate koji bi značajnije utjecali na promjenu karakteristika strujanja vjetra i smanjenje koncentracije štetnih plinova u urbanom okruženju. Ispitivanja u zračnom tunelu omogućavaju fizikalno modeliranje stvarnog problema na umanjenim modelima urbanih okruženja i predstavljaju vrijednu nadopunu ispitivanjima na terenu. Međutim, ispitivanja u zračnom tunelu mogu biti dugotrajna, vrlo su skupa, a javljaju se i problemi vezani uz simulacije atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu. Detaljan opis procedura simulacije atmosferskog graničnog sloja u zračnom tunelu je dan u [13-14], utjecaj razmaka između zgrada na karakteristike strujanja vjetra je prikazan u [15], prijedlog kriterija za simulaciju strujanja vjetra u zračnom tunelu je dan u [16-18], novi izgled generatora vrtloga za simulacije strujanja vjetra u zračnom tunelu je predložen u [19]. Nadalje, odstupanja preporučenih vrijednosti parametara u međunarodnim standardima koji opisuju strujanje vjetra u atmosferi su dana u [20]. U praksi se uobičajeno primjenjuju i polu-empirijski modeli, kao što su npr. Gaussov model i ASHRAE model, koji su relativno jednostavni za upotrebu, dok s druge pak strane imaju ograničenu primjenjivost i točnost u predviđanju koncentracija štetnih plinova u atmosferi. U proteklih desetak godina učinjen je značajan napredak u primjeni računalne dinamike fluida [21]. Trenutno je taj pristup financijski prihvatljiviji od ispitivanja na samom objektu ili ispitivanja u zračnom tunelu, uz dodatnu prednost poznavanja karakteristika strujanja po cijeloj domeni od interesa. S druge strane, postoje i određeni nedostaci računalnih simulacija, kao npr. modeliranje turbulencije, ograničena točnost proračuna u blizini čvrste stijenke, ograničeni računalni resursi.

U ovom radu je postavljen model računalne simulacije strujanja vjetra oko zgrade pravokutnog presjeka s ciljem određivanja dimenzije zone recirkulacije iza zgrade u

ovisnosti o tipu terena na kojem se zgrada nalazi. Točno predviđanje dimenzije zone recirkulacije iza zgrade je izuzetno važno, jer se u zoni recirkulacije zadržavaju štetni plinovi i boravak ljudi u tom području može biti vrlo štetan za njihovo zdravlje ukoliko se uzvodno od zgrade nalazi izvor štetnih plinova. Karakteristike strujanja vjetra oko zgrada su dane u standardnoj literaturi iz područja međudjelovanja vjetra i građevinskih objekata [22-24]. U ovom radu se koristio računalni paket Fluent s ugrađenim  $k-\varepsilon$  modelom turbulencije, koji se najčešće koristi u području numeričkih simulacija strujanja vjetra oko objekata. Validacija rezultata računalnih simulacija opisanih u ovom radu je provedena usporedbom s rezultatima mjerenja u prirodi, prikazanim u [25]. Ovaj rad predstavlja nastavak istraživanja provedenih u suradnji sa Sveučilištem u Firenci, a vezano uz aerodinamičke karakteristike cestovnih vjetrobrana [26-28].

## 2. Numerička metodologija

Računalni model strujanja vjetra oko zgrade je razvijen u programskom paketu Fluent 6.2 koji se temelji na metodi konačnih volumena pri čemu se rješava sustav osrednjenih Navier-Stokesovih jednažbi. Polazište za izradu ovakvog modela predstavljaju rezultati mjerenja u prirodi, koja su proveli Mavroidis i Griffiths [25] na zgradi duljine  $a = 10.96$  m, širine  $b = 4.24$  m i visine  $h = 1.56$  m. Simulirane su dvije situacije: a) nastujavanje okomito na dulju bočnu površinu zgrade, b) nastujavanje okomito na kraću bočnu površinu zgrade. U oba slučaja se proučava dimenzija recirkulacijske zone, odnosno vrtloga iza zgrade, za tri tipa terena različite hrapavosti. Ispitivanja su provedena na otvorenom tipu terena pa su analogno tome određeni parametri numeričke simulacije. Zaprvi tip terena, nalazu u računalnu domenu zadani su profili brzine i kinetičke energije turbulencije u atmosferskom graničnom sloju, a koji odgovaraju tipu terena kod mjerenja [25] u prirodi. Odabrana je aerodinamička duljina hrapavosti terena

$z_0 = 0.01$  m, što odgovara ruralnom terenu s malim brojem prepreka, te je eksponent zakona potencije  $\alpha$  izračunat prema Counihan [29],

$$\alpha = 0.0961 \log z_0 + 0.016 (\log z_0)^2 + 0.24. \quad (1)$$

Izračunata vrijednost eksponenta je  $\alpha = 0.11$ . Rezultati računalne simulacije za ovaj tip terena su uspoređeni s rezultatima eksperimenata opisanim u Mavroidis i Griffiths [25], kako bi se validirao računalni model razvijen za potrebe ovog rada. U radu su zatim napravljene simulacije za još dva tipa terena kako bi se mogle odrediti dimenzije recirkulacijske zone (vrtloga) iza zgrade u ovisnosti o hrapavosti terena, a s ciljem izvođenja zaključaka o disperziji štetnih plinova. Aerodinamičke duljine hrapavosti za dodatna dva tipa terena iznose  $z_0 = 0.001$  m i  $z_0 = 0.1$  m. Pripadajući eksponenti zakona potencije  $\alpha$  izračunati prema Counihan [29] iznose  $\alpha = 0.096$  za  $z_0 = 0.001$  m i  $\alpha = 0.16$  za  $z_0 = 0.1$  m. Dobivene vrijednosti eksponenta služe za definiranje zakona potencije koji predstavlja ulazni profil brzine u računalnu domenu. Zakon potencije je definiran izrazom,

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{ref}}} = \left( \frac{z-d}{z_{\text{ref}}-d} \right)^\alpha, \quad (2)$$

pri čemu je  $\bar{u}$  osrednjena vrijednost brzine na visini  $z$ ,  $z$  je visina mjerena od tla,  $z_{\text{ref}}$  je referentna visina,  $\bar{u}_{\text{ref}}$  je osrednjena referentna brzina,  $d$  je debljina istisnuća. U svim konfiguracijama referentnu visinu predstavlja visina zgrade, dok iznos referentne brzine varira ovisno o hrapavosti terena, tj. o iznosu  $z_0$ . U konfiguraciji s hrapavosti terena  $z_0 = 0.01$  m zabilježen je iznos referentne brzine  $\bar{u}_{\text{ref}} = 5.3$  m/s, kod  $z_0 = 0.001$  m iznos je  $\bar{u}_{\text{ref}} = 5.1$  m/s, dok je za  $z_0 = 0.1$  m iznos referentne brzine  $\bar{u}_{\text{ref}} = 5.6$  m/s.

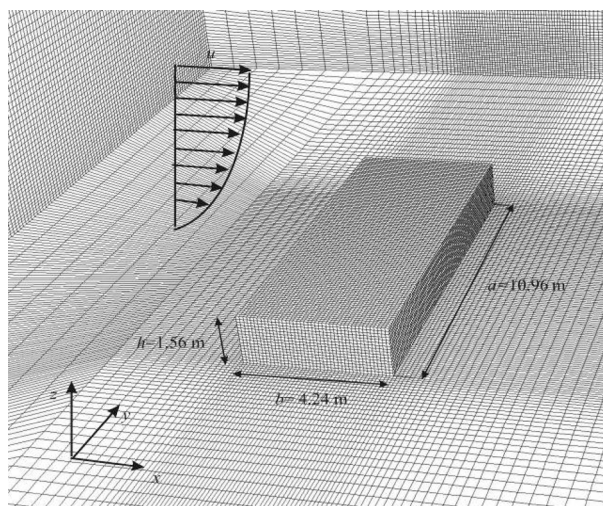
Mreža konačnih volumena generirana je u Fluent-ovom pretprocesoru Gambit. Dimenzije domene bile su odabrane u odnosu na visinu zgrade, pri čemu se vodilo računa da vanjske granice računalne domene nemaju utjecaj na sliku strujanja kako bi se što točnije simulirali uvjeti strujanja u prirodi, a u skladu s preporukama danim u COST 732 [30]. Računalna domena ima duljinu  $26h$  ( $9h$  ispred zgrade), širinu  $22h$ , i visinu  $8h$ , što rezultira strukturiranom mrežom od ukupno 1.2 milijuna kontrolnih volumena. Proračuni su provedeni za nastrojavanje vjetera okomito na dulju i okomito na kraću bočnu stranicu zgrade, a kako je prikazano na slikama 1 i 2.

Za provedbu računalnih simulacije je odabran  $k$ - $\varepsilon$  model turbulencije kod kojeg je na ulazu u računalnu domenu potrebno zadati profile brzine, kinetičke energije turbulencije i disipacije kinetičke energije turbulencije.

Kao referentan standard uzet je ESDU 85020 [31], u kojem su dane vrijednosti za intenzitet turbulencije i integralnu duljinsku mjeru turbulencije. Budući da vrijednosti intenziteta turbulencije i integralne duljinske mjere turbulencije dane u ESDU 85020 [31] nije moguće izravno zadavati na ulazu u računalnu domenu, one su preračunate u vrijednosti kinetičke energije turbulencije i njene dispacije prema izrazima,

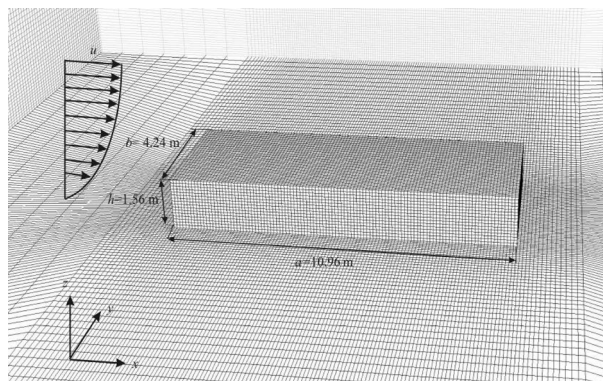
$$k = \frac{3}{2} (u_{\text{avg}} I_u)^2, \quad (3)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_{u,x}}. \quad (4)$$



Slika 1. Konfiguracija pri nastrojavanju okomito na dulju bočnu stranicu

Figure 1. Configuration with wind flow normal to the longer building side



Slika 2. Konfiguracija pri nastrojavanju okomito na kraću bočnu stranicu

Figure 2. Configuration with wind flow normal to the shorter building side

Rubni uvjeti korišteni u računalnim simulacijama su dani u Tablici 1.

**Tablica 1.** Rubni uvjeti primijenjeni u računalnoj simulaciji

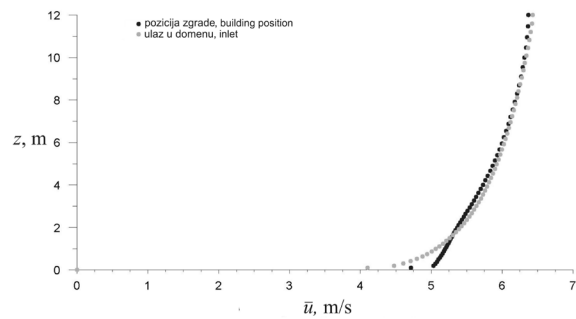
**Table 1.** Boundary conditions applied in computational simulation

Rubovi računalne domene / Computational domain boundaries	Rubni uvjeti / Boundary conditions
Ulaz / Inlet	$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{ref}}} = \left( \frac{z-d}{z_{\text{ref}}-d} \right)^\alpha$ $v = 0, w = 0$ $k = \frac{3}{2} (u_{\text{avg}} I_u)^2$ $\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_{u,x}}$ $L_{u,x} \text{ prema ESDU 85020}$ $L_{u,x} \text{ according to ESDU 85020}$
Izlaz / Outlet	Izlazni rubni uvjet / Outflow
Gornja površina računalne domene / Top wall	Zid bez trenja / Freeslip wall
Bočne površine računalne domene / Side walls	Zid bez trenja / Freeslip wall
Tlo i zidovi zgrade / Bottom and building walls	Zid / Wall

Dodatno je zadana vrijednost  $u_{\text{avg}} = 10 \text{ m/s}$  koja predstavlja brzinu neporemećenog strujanja izvan graničnog sloja. Konstante odabranog standardnog  $k-\varepsilon$  modela turbulencije iznose:  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ .

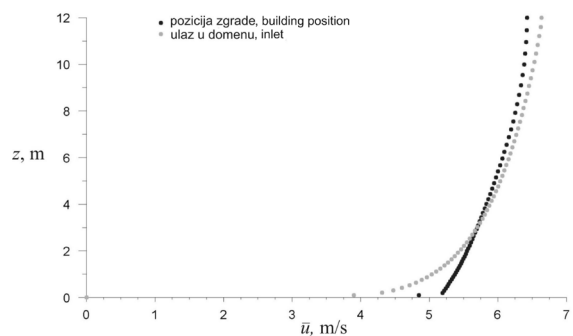
### 3. Prikaz rezultata

Prikazi na slikama 3 do 11 prikazuju početne simulacije u svrhu određivanja promjene profila brzine, kinetičke energije turbulencije i njene disipacije, od ulaza u domenu (inlet profile) do mjesta na kojem će se nalaziti zgrada (incident profile). Ti su rezultati dobiveni simulacijom strujanja zraka kroz praznu domenu, a kako je navedeno u Blocken i dr. [32]. Razlog takvom pristupu je određivanje stvarnih profila kojima će se nastrujavati zgrada tijekom simulacije radi određivanja dimenzija recirkulacijske zone.



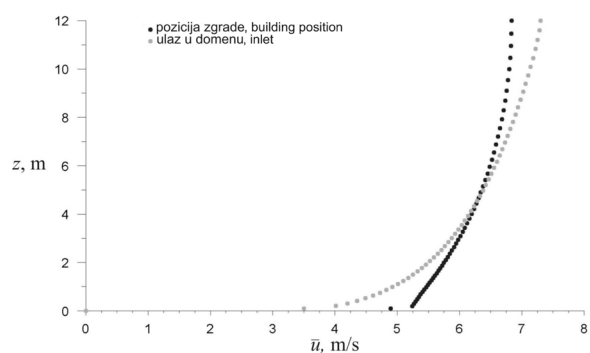
**Slika 3.** Profili srednje brzine na ulazu u domenu i na poziciji zgrade za  $z_0 = 0.001 \text{ m}$

**Figure 3.** Mean velocity profiles at the inlet of the computational domain and at the building position for  $z_0 = 0.001 \text{ m}$



**Slika 4.** Profili srednje brzine na ulazu u domenu i na poziciji zgrade za  $z_0 = 0.01 \text{ m}$

**Figure 4.** Mean velocity profiles at the inlet of the computational domain and at the building position for  $z_0 = 0.01 \text{ m}$

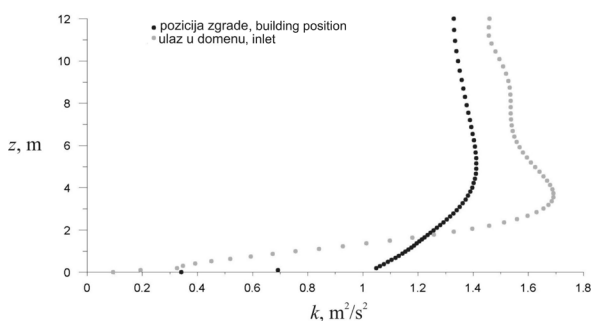


**Slika 5.** Profili srednje brzine na ulazu u domenu i na poziciji zgrade za  $z_0 = 0.1 \text{ m}$

**Figure 5.** Mean velocity profiles at the inlet of the computational domain and at the building position for  $z_0 = 0.1 \text{ m}$

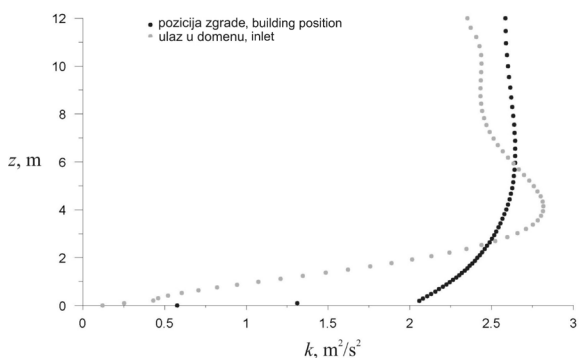
Na slikama 3, 4 i 5 može se uočiti kako uzduž domene strujanje ubrzava u području uz tlo dok se usporava s porastom visine, a što je usporedivo s Yang i dr. [33]. Slike 6, 7 i 8 prikazuju profile kinetičke energije turbulencije

slične uvjetima strujanja vjetra u prirodi danim u ESDU 85020 [31].



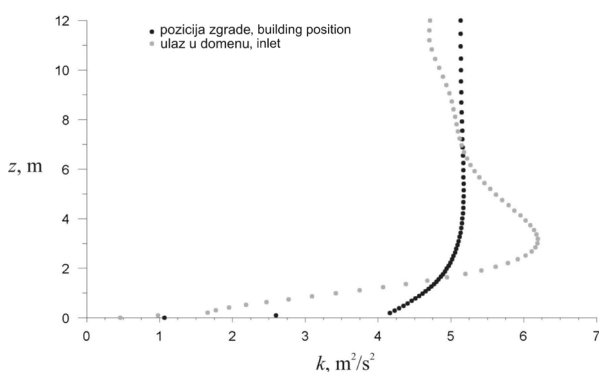
**Slika 6.** Profili kinetičke energije turbulencije na ulazu u domenu i na poziciji zgrade za  $z_0 = 0.001$  m

**Figure 6.** Turbulence kinetic energy profiles at the inlet of the computational domain and at the building position for  $z_0 = 0.001$  m



**Slika 7.** Profili kinetičke energije turbulencije na ulazu u domenu i na poziciji zgrade za  $z_0 = 0.01$  m

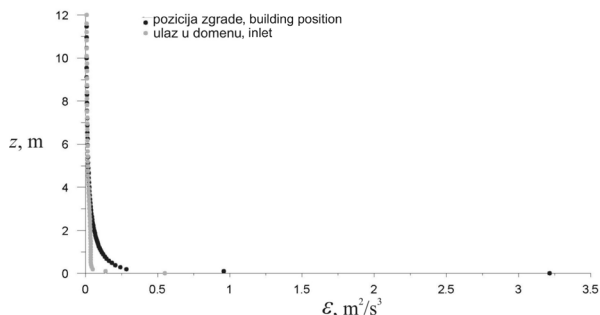
**Figure 7.** Turbulence kinetic energy profiles at the inlet of the computational domain and at the building position for  $z_0 = 0.01$  m



**Slika 8.** Profili kinetičke energije turbulencije na ulazu u domenu i na poziciji zgrade za  $z_0 = 0.1$  m

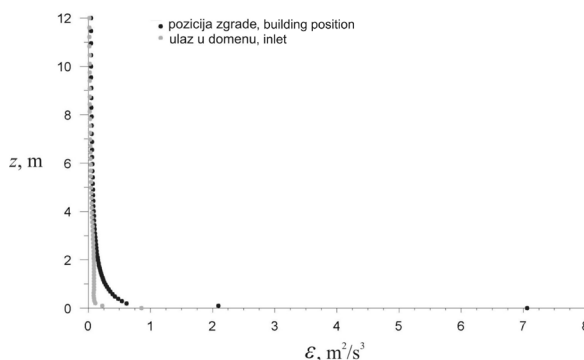
**Figure 8.** Turbulence kinetic energy profiles at the inlet of the computational domain and at the building position for  $z_0 = 0.1$  m

Profili disipacije kinetičke energije turbulencije imaju tendenciju rasta u području u blizini tla zbog hrapavosti terena, dok s porastom visine ostaju gotovo nepromijenjeni, kako je prikazano na slikama 9, 10 i 11.



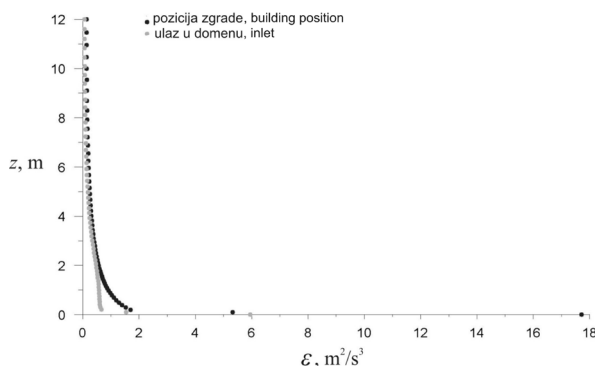
**Slika 9.** Profili disipacije kinetičke energije turbulencije na ulazu u domenu i na poziciji zgrade za  $z_0 = 0.001$  m

**Figure 9.** Dissipation rate profiles at the inlet of the computational domain and at the building position for  $z_0 = 0.001$  m



**Slika 10.** Profili disipacije kinetičke energije turbulencije na ulazu u domenu i na poziciji zgrade za  $z_0 = 0.01$  m

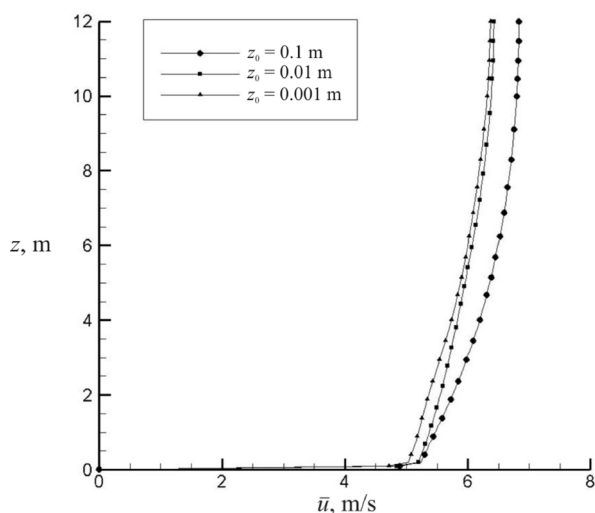
**Figure 10.** Dissipation rate profiles at the inlet of the computational domain and at the building position for  $z_0 = 0.01$  m



**Slika 11.** Profili disipacije kinetičke energije turbulencije na ulazu u domenu i na poziciji zgrade za  $z_0 = 0.1$  m

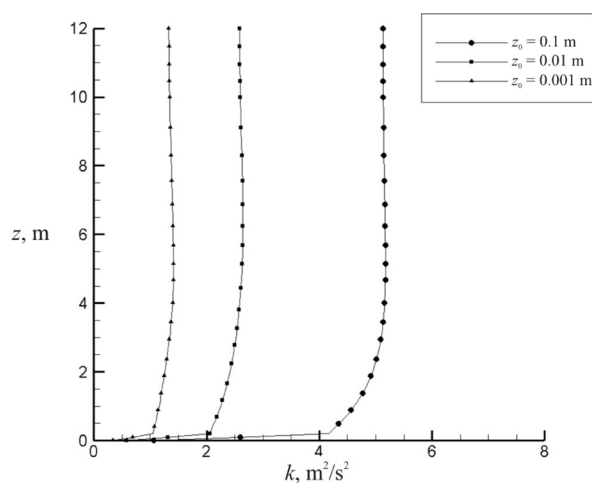
**Figure 11.** Dissipation rate profiles at the inlet of the computational domain and at the building position for  $z_0 = 0.1$  m

Usporedbom profila brzine, kinetičke energije turbulencije i njene disipacije može se uočiti da strujanjem kroz domenu dolazi do određenih promjena profila što je i očekivano zbog utjecaja hrapavosti podloge i karakteristika korištenog modela turbulencije, a kako je pokazano u Barić i dr. [34]. Kako bi se mogao usporediti utjecaj hrapavosti terena na profile brzine, kinetičke energije turbulencije i disipacije, na slikama 12, 13 i 14 dana je usporedba navedenih profila na poziciji zgrade za različite vrijednosti aerodinamičke duljine hrapavosti. Pritom veća vrijednost parametra  $z_0$  označava hrapaviji teren, tj. teren na kojem je stupanj izgrađenosti veći.



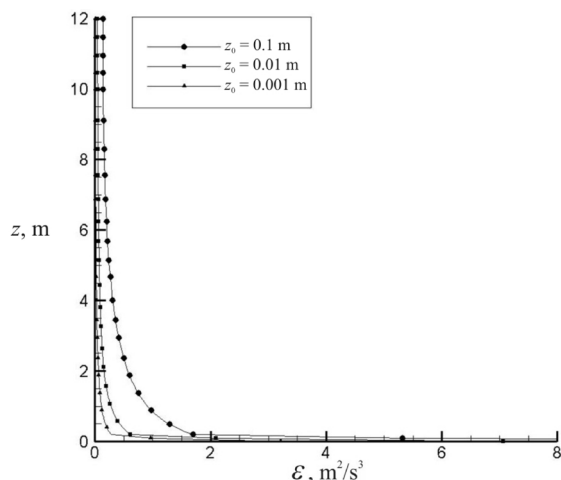
**Slika 12.** Profili brzine za različite hrapavosti terena na poziciji zgrade

**Figure 12.** Mean velocity profiles for different terrain exposures at the building position



**Slika 13.** Profili kinetičke energije turbulencije za različite hrapavosti terena na poziciji zgrade

**Figure 13.** Turbulence kinetic energy profiles for different terrain exposures at the building position



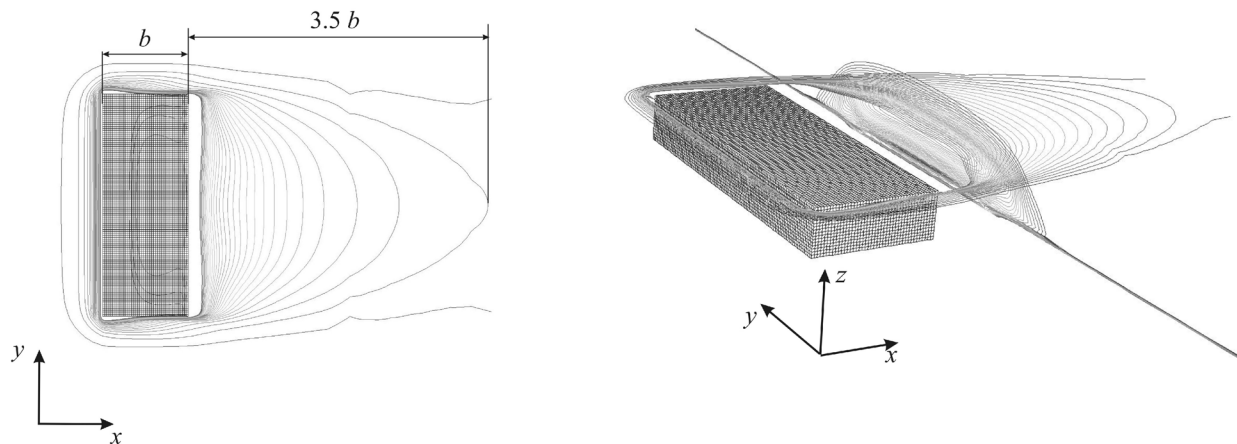
**Slika 14.** Profili disipacije kinetičke energije turbulencije za različite hrapavosti terena na poziciji zgrade

**Figure 14.** Dissipation rate profiles for different terrain exposures at the building position

Iz rezultata prikazanih na slikama 12, 13 i 14 moguće je zaključiti kako hrapavost terena značajno utječe na karakteristike strujanja vjetra iznad pojedinog terena. S povećanjem hrapavosti terena dolazi do porasta srednje brzine od približno 0.3 m/s za svaki red veličine promjene iznosa aerodinamičke duljine hrapavosti  $z_0$ . Nadalje, maksimalna vrijednost kinetičke energije turbulencije se udvostručuje za svaki red veličine promjene iznosa  $z_0$ , a također dolazi i do povećanja disipacije uz značajniji iznos povećanja prilikom promjene hrapavosti terena sa  $z_0 = 0.01$  m na  $z_0 = 0.1$  m.

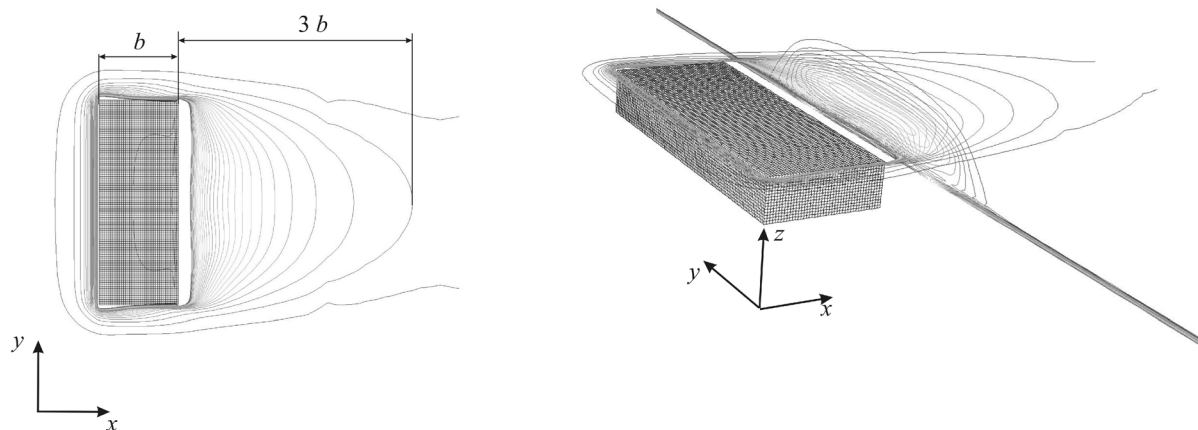
Nadalje, kako bi se kvalitativno procijenio utjecaj hrapavosti terena na dimenzije recirkulacijske zone vjetra nizvodno od zgrade, na slikama 15 do 20 su dani izometrijski i tlocrtni prikazi pojedinih recirkulacijskih zona ovisno o iznosu aerodinamičke duljine hrapavosti  $z_0$  i kutu nastrojavanja vjetra na zgradu. Krivulje na tim slikama predstavljaju linije konstantne vrtložnosti.

Na slici 13 je prikazano da povećanje aerodinamičke duljine hrapavosti  $z_0$  značajno pridonosi povećanju iznosa kinetičke energije turbulencije  $k$ . Iz rezultata prikazanih na slikama 15 do 20 moguće je zaključiti kako povećana hrapavost terena rezultira smanjenjem zone recirkulacije iza zgrade. Za nastrojavanje na dulju stranicu zgrade i aerodinamičku duljinu hrapavosti od  $z_0 = 0.001$  m duljina vrtloga iznosi  $3.5b$ , za  $z_0 = 0.01$  m duljina vrtloga iznosi  $3b$ , a za  $z_0 = 0.1$  m duljina vrtloga iznosi  $2.5b$ , dok za nastrojavanje na kraću stranicu zgrade i aerodinamičku duljinu hrapavosti  $z_0 = 0.001$  m duljina vrtloga iznosi  $2.2b$ , za  $z_0 = 0.01$  m duljina vrtloga iznosi  $1.6b$ , a za  $z_0 = 0.1$  m duljina vrtloga iznosi  $1.4b$ . Ovi rezultati su usporedivi s rezultatima prikazanim u Laneville i dr. [35], Castro i Robins [36], gdje je smanjenje dimenzije vrtloga iza zgrade kod intenzivnije turbulencije u dolaznoj struji zraka povezivano s intenzivnijom izmjenom količine gibanja između strujanja zraka unutar vrtloga i vanjske, neporemećene struje.



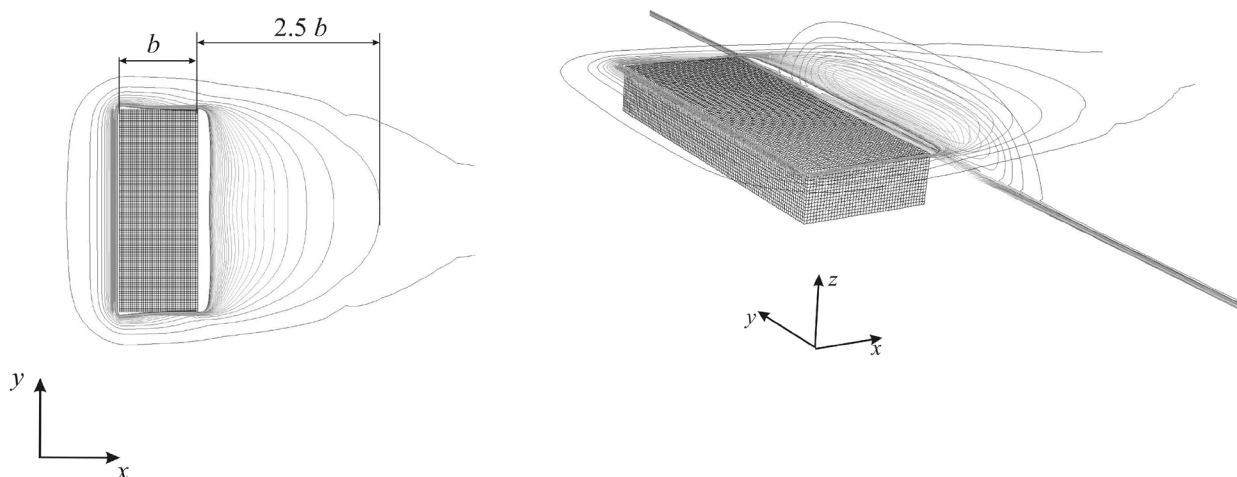
Slika 15. Dimenzija vrtloga u tlocrtu (lijevo) i izometrijski prikaz (desno) za aerodinamičku duljinu hrapavosti  $z_0 = 0.001$  m pri nstrujavanju okomito na dulju stranicu zgrade

Figure 15. Vortex dimensions for aerodynamic roughness length  $z_0 = 0.001$  m and wind flow normal to the longer building side



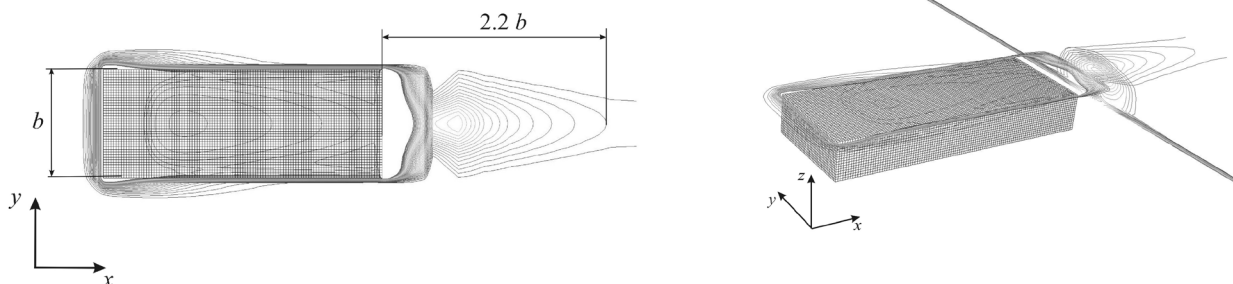
Slika 16. Dimenzija vrtloga u tlocrtu (lijevo) i izometrijski prikaz (desno) za aerodinamičku duljinu hrapavosti  $z_0 = 0.01$  m pri nstrujavanju okomito na dulju stranicu zgrade

Figure 16. Vortex dimensions for aerodynamic roughness length  $z_0 = 0.01$  m and wind flow normal to the longer building side



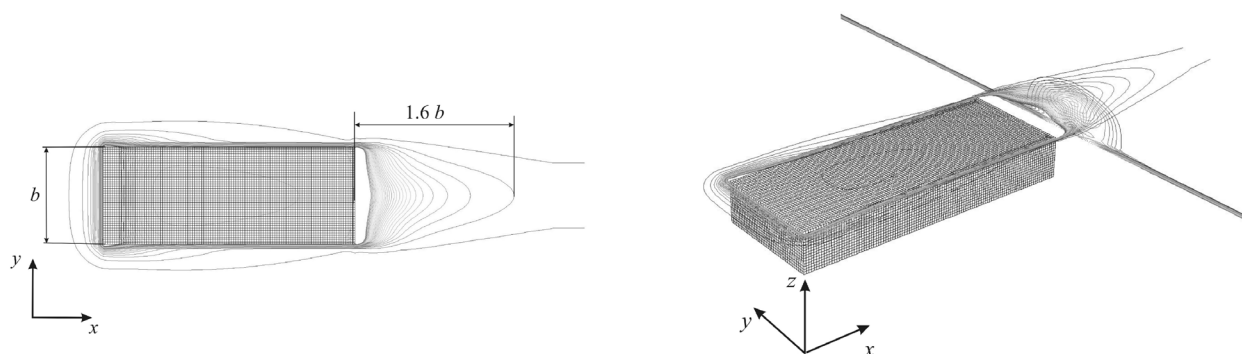
Slika 17. Dimenzija vrtloga u tlocrtu (lijevo) i izometrijski prikaz (desno) za aerodinamičku duljinu hrapavosti  $z_0 = 0.1$  m pri nstrujavanju okomito na dulju stranicu zgrade

Figure 17. Vortex dimensions for aerodynamic roughness length  $z_0 = 0.1$  m and wind flow normal to the longer building side



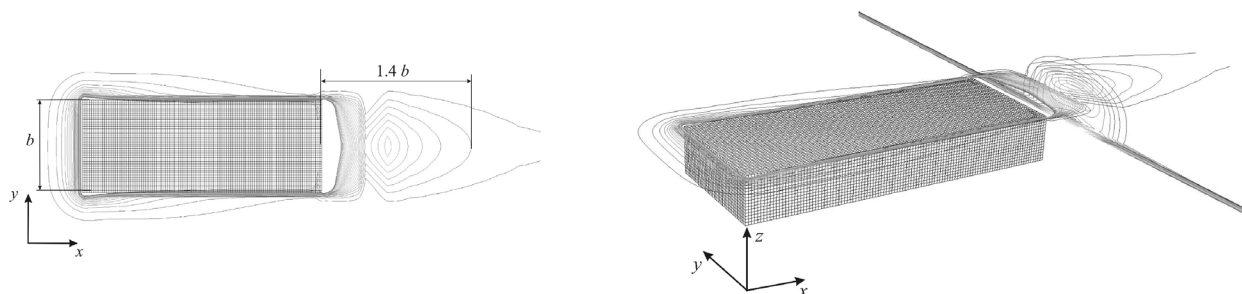
**Slika 18.** Dimenzija vrtloga u tlocrtu (lijevo) i izometrijski prikaz (desno) za aerodinamičku duljinu hrapavosti  $z_0 = 0.001$  m pri nastrujavanju okomito na kraću stranicu zgrade

**Figure 18.** Vortex dimensions for aerodynamic roughness length  $z_0 = 0.001$  m and wind flow normal to the shorter building side



**Slika 19.** Dimenzija vrtloga u tlocrtu (lijevo) i izometrijski prikaz (desno) za aerodinamičku duljinu hrapavosti  $z_0 = 0.01$  m pri nastrujavanju okomito na kraću stranicu zgrade

**Figure 19.** Vortex dimensions for aerodynamic roughness length  $z_0 = 0.01$  m and wind flow normal to the shorter building side



**Slika 20.** Dimenzija vrtloga u tlocrtu (lijevo) i izometrijski prikaz (desno) za aerodinamičku duljinu hrapavosti  $z_0 = 0.1$  m pri nastrujavanju okomito na kraću stranicu zgrade

**Figure 20.** Vortex dimensions for aerodynamic roughness length  $z_0 = 0.1$  m and wind flow normal to the shorter building side

#### 4. Zaključak

U radu je postavljen model računalne simulacije strujanja vjetra oko zgrade pravokutnog presjeka s ciljem određivanja dimenzije zone recirkulacije iza zgrade u ovisnosti o hrapavosti terena na kojem se zgrada nalazi. Proračun je proveden računalnim paketom Fluent 6.2 koji se temelji na rješavanju osrednjenih Navier-Stokesovih jednačbi uz primjenu  $k-\varepsilon$  modela turbulencije. Određivanje duljine zone recirkulacije je provedeno za tri različite hrapavosti terena, pri čemu su karakteristike

hrapavosti terena i strujanja vjetra u prirodi preuzete iz međunarodnog ESDU 85020 [31] standarda. Postavljeni računalni model je validiran usporedbom s rezultatima mjerenja u prirodi za jedan tip hrapavosti terena, danim u Mavroidis i Griffiths [25]. Dobiveni rezultati ukazuju na smanjenje duljine zone recirkulacije s povećanjem hrapavosti terena. Ovi rezultati su usporedivi s rezultatima prikazanim u Laneville i dr. [35], gdje je uočeno smanjenje dimenzije vrtloga iza zgrade kod intenzivnije turbulencije u dolaznoj struji zraka.



## LITERATURA

- [1] HOEK, G.; BRUNEKREEF, B.; VERHOEFF, A.; VAN WIJNEN, J.; FISCHER, P.: *Daily mortality and air pollution in the Netherlands*, Journal of Air Waste and Management Association 50(2000), 1380-1389.
- [2] NYBERG, F.; GUSTAVSSON, P.; JARUP, L.; BELLANDER, T.; BERGLIND, N.; JAKOBSSON, R.; PERSHAGEN, G.: *Urban air pollution and lung cancer in Stockholm*, Epidemiology 11(2000)5, 487-495.
- [3] DAB, W.; SÉGALA, C.; DOR, F.; FESTY, B.; LAMELOISE, P.; LE MOULLEC, Y.; LE TERTRE, A.; MÉDINA, S.; QUÉNEL, P.; WALLAERT, B.; ZMIROU, D.: *Air pollution and health: Correlation or casuality? The case of the relationship between particle exposure and deaths from heart and lung disease*, Journal of Air Waste and Management Association 51(2001), 203-219.
- [4] MOHOROVIĆ, L.: *First two months of pregnancy – critical time for preterm delivery and low birthweight caused by adverse effects of coal combustion toxics*, Early Human Development 80(2004), 115-123.
- [5] ALEBIĆ-JURETIĆ, A.; CVITAŠ, T.; KEZELE, N.; KLASINC, L.; PEHNEC, G.; ŠORGO, G.: *Atmospheric particulate matter and ozone under heat-wave conditions: do they cause an increase of mortality in Croatia?*, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 79(2007), 468-471.
- [6] KAMPA, M.; CASTANAS, E.: *Human health effects of air pollution*, Environmental Pollution 151(2008), 362-367.
- [7] MONKS, P.S.; GRANIER, C.; FUZZI, S.; STOHL, A.; WILLIAMS, M.L., et al.: *Atmospheric composition change – global and regional air quality*, Atmospheric Environment 43(2009), 5268-5350.
- [8] ANDERSON, H.R.: *Air pollution and mortality: A history*, Atmospheric Environment 43(2009), 142-152.
- [9] COSTIGLIOLA, V.: 10th EMS Annual Meeting, 10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM) Abstracts, Zürich, Switzerland, 2010.
- [10] BURNETT, R.T.; PHILIPS, O.; OZKAYNAK, H.: *The association between ambient carbon monoxide levels and mortality in Toronto, Canada*, Journal of Air Waste and Management Association 48(1998), 689-700.
- [11] CICOLELLA, A.: *Evaluation des risques pour la santé liés au benzène*, INERIS, Verneuil, France, 1997.
- [12] ČARIJA, Z.; MRŠA, Z.; KRANJČEVIĆ, L.: *Industrial stack height selection using genetic algorithm*, Strojarstvo 48(2006)5-6, 273-281.
- [13] KOZMAR, H.; DŽIJAN, I.; ŠAVAR, M.: *Jednolikost modela atmosferskoga graničnoga sloja u zračnom tunelu*, Strojarstvo 47(2005)5-6, 157-167.
- [14] KOZMAR, H.: *Characteristics of natural wind simulations in the TUM boundary layer wind tunnel*, Theoretical and Applied Climatology 106(2011)1-2, 95-104.
- [15] KOZMAR, H.: *Influence of spacing between buildings on wind characteristics above rural and suburban areas*, Wind and Structures 11(2008)5, 413-426.
- [16] KOZMAR, H.: *Scale effects in wind tunnel modeling of an urban atmospheric boundary layer*, Theoretical and Applied Climatology 100(2010)1-2, 153-162.
- [17] KOZMAR, H.: *Improved experimental simulation of wind characteristics around tall buildings*, Journal of Aerospace Engineering, DOI 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000167.
- [18] KOZMAR, H.: *Physical modeling of complex airflows developing above rural terrains*, Environmental Fluid Mechanics, DOI: 10.1007/s10652-011-9224-1.
- [19] KOZMAR, H.: *Truncated vortex generators for part-depth wind-tunnel simulations of the atmospheric boundary layer flow*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 99(2011)2-3, 130-136.
- [20] KOZMAR, H.: *Wind-tunnel simulations of the suburban ABL and comparison with international standards*, Wind and Structures 14(2011)1, 15-34.
- [21] WERNER, A.; DEGIULI, N.; SUTLOVIĆ, I.: *CFD as an engineering tool for design and analysis*, Strojarstvo 48(2006)3-4, 115-121.
- [22] HOLMES, J.D.: *Wind loading of structures*, Taylor & Francis, UK, 2007.
- [23] SIMIU, E.; SCANLAN, R.H.: *Wind Effects on Structures*, John Wiley & Sons, New York., 1996.
- [24] DYRBYE, C.; HANSEN, S.O.: *Wind loads on structures*, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [25] MAVROIDIS, I.; GRIFFITHS, R.F.: *Plume dispersion in the wake of a rectangular model building*, International Journal of Environment and Pollution 36(2009)1-2-3, 262-275.
- [26] KOZMAR, H.; VIRAG, Z.; KRIZMANIĆ, S.; DŽIJAN, I.; ŠAVAR, M.: *Eksperimentalna studija aerodinamičke forme cestovnih vjetrobrana*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 96 str., 2007.

- [27] KOZMAR, H.; PROCINO, L.; BORSANI, A.; BARTOLI, G.: *Ispitivanja aerodinamičkih svojstava cestovnih vjetrobrana*, Građevinar 61(2009)3, 261-267.
- [28] VIRAG, Z.; KRIZMANIĆ, S.; DŽIJAN, I.; ŠAVAR, M.; KOZMAR, H.: *Studija zaštite dionica autoceste Rijeka-Zagreb od vjetra*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 38 str., 2007.
- [29] COUNIHAN, J.: *Adiabatic atmospheric boundary layers: a review and analysis of data from the period 1880-1972*, Atmospheric Environment 9(1975), 871-905.
- [30] COST ACTION 732.: *Quality assurance and improvement of micro-scale meteorological models*, <http://www.mi.uni-hamburg.de/Home.484.0.html>, 2005–2009.
- [31] ESDU 85020: *Characteristics of wind speed in the lower layers of the atmosphere near the ground: strong winds (neutral atmosphere)*, Engineering Sciences Data Unit, 1985.
- [32] BLOCKEN, B.; STATHOPOULOS, T.; CARMELIET, J.: *CFD simulation of the atmospheric boundary layer–wall function problems*, Atmospheric Environment 41(2007)2, 238-252.
- [33] YANG, Y.; GU, M.; CHEN, S.; JIN, X.: *New inflow boundary conditions for modeling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 97(2009), 88-95.
- [34] BARIĆ, E.; DŽIJAN, I.; KOZMAR, H.: *Numerical simulation of wind characteristics in the wake of a rectangular building submitted to realistic boundary layer conditions*, Transactions of FAMENA 34(2010)3, 1-10.
- [35] LANEVILLE, A.; GARTSHORE, I.S.; PARKINSON, G.V.: *An explanation of some effects of turbulence on bluff bodies*, Fourth International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, London, UK, 1975.
- [36] CASTRO, I.P.; ROBINS, A.G.: *The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams*, Journal of Fluid Mechanics 79(1977)2, 307-335.