

Ing. Dagmara ČEHELOVÁ¹⁾
 Ing. Milan JANÁK, Ph.D.²⁾
 prof. Ing. Boris BIELEK, Ph.D.¹⁾

¹⁾ Slovenská technická univerzita
 v Bratislave, Stavebná fakulta,
 Katedra konštrukcií
 pozemných stavieb

²⁾ Simulácie budov, s.r.o.

Hodnotenie vplyvu vetra na veternú pohodu a bezpečnosť chodcov v blízkosti budov pomocou metód CFD



The Assessment of the Effect of Wind on the Thermal Comfort and Safety of Pedestrians near Buildings Using CFD Method

Recenzenti:
 doc. Ing. Ondřej Šíkula, Ph.D.
 Ing. Martin Barták, Ph.D.

V predloženom príspevku je opísaný súčasný stav využívania simulácií pomocou metód CFD (Computational Fluid Dynamics) v oblasti vetrového inžinierstva so zameraním predovšetkým na hodnotenie a optimalizáciu veternej pohody a bezpečnosti chodcov v blízkosti budov. Diskutované sú výzvy v oblasti aplikácie CFD metód pre modelovanie atmosférickej hraničnej vrstvy, ako aj modelovanie prúdenia v okolí budov a na budovách. Článok sa zaoberá aj metodikou hodnotenia veternej pohody a bezpečnosti chodcov. Aplikácie CFD a spôsob hodnotenia veternej pohody a bezpečnosti chodcov sú demonštrované na príklade riešeného projektu z praxe v CFD prostredí OpenFOAM.

Kľúčová slova: CFD, aerodynamika budov, chodci, veterná pohoda, veterné riziko

The paper describes the current state of the art in the use of simulation by CFD method (Computational Fluid Dynamics) in the field of wind engineering specialized on the evaluation and optimization of wind comfort and wind safety for pedestrians around buildings. It discusses the challenges in the application of CFD method for modelling of atmospheric border layer, such as modelling of flow in the surrounding of the buildings and on the buildings. The paper deals also with the methods to assess the wind comfort and pedestrian safety. The application of the CFD and the way of the wind comfort and pedestrian safety assessment are demonstrated on a real scenario case study solved in CFD solver OpenFOAM.

Keywords: CFD, building aerodynamics, pedestrians, wind comfort, wind risk

ÚVOD

Výškové budovy v centrách miest sa stávajú čoraz populárnejšie. Ich výstavbou dochádza k vytváraniu relatívne úzkych priechodov medzi budovami, čo má za následok zrýchlenie prúdenia vzduchu s negatívnym vplyvom na veternú pohodu a bezpečnosť chodcov.

Pre zistenie očakávaného účinku a vplyvu vetra na budovy a chodcov sú v súčasnosti čoraz viac využívané CFD simulácie, ktoré predstavujú v porovnaní s meraniami v aerodynamických tuneloch výrazne lacnejšiu a rýchlejšiu metódu. Tieto prednosti majú za následok, že najmä v posledných dvoch desaťročiach došlo v prudkém rozvoji vednej oblasti vetrového inžinierstva (Computation Wind Engineering).

Výsledky vetrovej štúdie realizovanej v predprojektovej fáze môžu značne ovplyvniť konštrukciu a celkový vzhľad navrhovanej budovy. Štúdie však môžu byť realizované aj v neskorších fázach, kedy vietor spôsobuje problémy a je nevyhnutné vykonať opatrenia pre elimináciu negatívnych efektov.

POSUDZOVANIE VETERNEJ POHODY A BEZPEČNOSTI CHODCOV

V rámci štátov Európskej únie, s výnimkou Holandska, neexistuje formálna norma, ktorá by definovala kritériá pre posúdenie účinkov vetra na chodcov. Veternú pohodu a veterné riziko chodcov preto posudzujeme na základe požiadaviek stanovených holandskou normou NEN 8100:2006 [4], ktorá stanovuje pravdepodobnosť, že počas roka bude prekročená kritická hodnota:

1. $U_{krit} = 5$ m/s pre hodinovú priemernú rýchlosť vetra (kritérium veternej pohody) – na základe hodnoty pravdepodobnosti prekročenia definuje norma päť tried kvality veternej pohody A až E. Trieda kvality určuje dobré, dostatočné alebo nedostatočné podmienky pre tri typy aktivít – rýchly prechod, prechádzku a sedenie (tab. 1).

2. $U_{krit} = 15$ m/s pre hodinovú priemernú rýchlosť vetra (kritérium veternej bezpečnosti) – vzhľadom na hodnotu pravdepodobnosti prekročenia môže byť stupeň veternej bezpečnosti definovaný ako bez rizika, s čiastočným rizikom alebo ako nebezpečenstvo (tab. 2).

Tab. 1 Kritériá pre veternú pohodu podľa NEN 8100:2006 [4]

Veterná pohoda				
Prekročenie rýchlosti $U_{krit} > 5$ m/s (% hodín počas roka)	Kategória	Činnosť		
		Rýchly prechod (ulica, parkovisko)	Prechádzanie (pešia zóna, postávanie)	Sedenie (terasy, parky)
< 2,5	A	dobrá	dobrá	dobrá
2,5 - 5,0	B	dobrá	dobrá	dostatočná
5,0 - 10,0	C	dobrá	dostatočná	nedostatočná
10,0 - 20,0	D	dostatočná	nedostatočná	nedostatočná
> 20	E	nedostatočná	nedostatočná	nedostatočná

Tab. 2 Kritériá pre veterné riziko podľa NEN 8100:2006 [4]

Veterné riziko		
Prekročenie rýchlosti $U_{krit} > 15$ m/s (% hodín počas roka)	Stupeň rizika	
< 0,05	Bez rizika	WR
0,05 - 0,3	Čiastočné riziko	LR
> 0,3	Nebezpečenstvo	D

MODELOVANIE HRANIČNEJ VRSTVY ATMOSFÉRY

V oblasti vetrového inžinierstva sa v oblasti CFD pre modelovanie atmosférickej hraničnej vrstvy používa relatívne často štandardný výpočtový $k-\varepsilon$ model turbulencie. Bežne používaný komerčný softvér využíva pri modelovaní drsnosti povrchu predvolené štandardné stenové funkcie. Pri použití takejto stenovej funkcie a umiestnení vhodného vetrového profilu na začiatok domény, kde je drsnosť modelovaná implicitne, dochádza k javu, že kým vetrový profil narazí na fyzicky modelovanú prekážku, teda posudzovanú budovu, dochádza k jeho značnej deformácii [1], [2], [3].

Richards a Hoxey [3] skúmali možnosti zamedzenia vzniku takýchto deformácií. Pri modelovaní 2D atmosférickej hraničnej vrstvy vychádzali z nasledujúcich predpokladov:

1. Vertikálna rýchlosť je nulová.
2. Tlak je konštantný vo vertikálnom smere, aj v smere prúdu.
3. Šmykové napätie τ_0 je konštantné v celej hraničnej vrstve:

$$\mu_t \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_0 = \rho u_*^2 \quad (1)$$

kde je:

- μ_t turbulentná viskozita,
- u zložka rýchlosti v smere prúdu vetra,
- ρ hustota vzduchu,
- u_* trecia rýchlosť.

4. Kinetická energia turbulencie k a disipácia ε vyhovujúce príslušným rovniciam, ktoré skraccujú na:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G_k \frac{\varepsilon}{k} - \rho \varepsilon = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{\varepsilon 1} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} = 0 \quad (3)$$

kde produkcia kinetickej energie turbulencie je daná ako:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (4)$$

a turbulentná viskozita μ_t je daná ako:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

a σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ a C_μ sú modelové konštanty, so zvyčajne používanými hodnotami 1.0, 1.3, 1.44, 1.92 a 0.09.

Vyššie uvedené rovnice sú splnené nasledovnými vzťahmi [2], [3]:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{Z + Z_0}{Z_0} \right) \quad (6)$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa(Z + Z_0)} \quad (8)$$

kde je:

- κ Karmanova konštantna,
- Z_0 drsnosť povrchu.

Rovnica (6) štandardne reprezentuje rýchlostný profil atmosférickej hraničnej vrstvy. Richards a Hoxey [3] zistili, že rovnice (6) – (8) splňajú rovnicu (2) automaticky, ale rovnicu (3) len v prípade, že:

$$\sigma_\varepsilon = \frac{\kappa^2}{(C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}) \sqrt{C_\mu}} \quad (9)$$

čo dáva hodnotu 1.11 pre σ_ε keď $\kappa = 0.4$.

Bolo preukázané, že pri použití štandardnej stenovej funkcie a rýchlostného a turbulentného profilu predpísaného na vstupe atmosférickej hraničnej vrstvy, nie je možné takýto vetrový profil udržať. Dôvody sú nasledovné:

Štandardná stenová funkcia bola pôvodne určená pre hladké steny alebo elementy s veľmi malou drsnosťou zodpovedajúcou zrnku piesku. Keď je definovaná vhodná hodnota drsnosti, predvolená stenová funkcia sa približuje prístupu Richardsa a Hoxeyho.

Atmosférická hraničná vrstva je riadená geostrofickým vetrom. Prístup, kedy je jednoducho aplikovaný rýchlostný profil na začiatku domény a spoliehanie sa na to, že jeho energia bude zachovaná a nebude vplyvom trenia povrchu deformovaná, nie je správny. Prúd musí byť poháňaný šmykovým napätím na hornom okraji. Predovšetkým vplyvom tohto šmykového napätia nedochádza k rozpadu rýchlostného profilu.

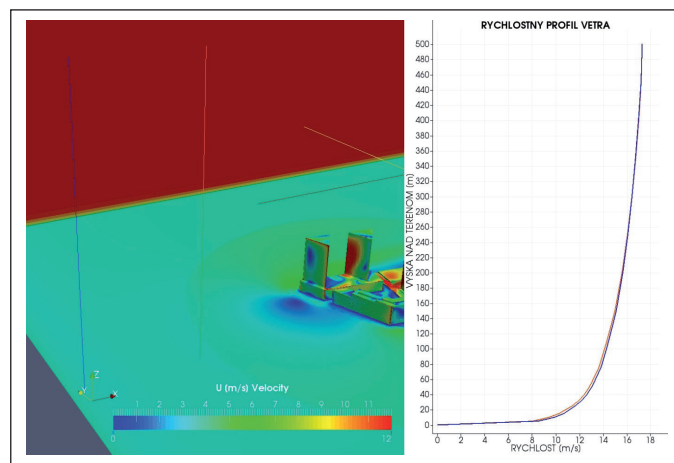
Nadprodukcia kinetickej energie turbulencie v bunkách najbližšej steny, kde sú vyššie gradienty rýchlosti, produkuje špičky kinetickej energie turbulencie.

Na odstránenie tohto problému navrhli Richards a Hoxey [3] modifikáciu okrajových podmienok.

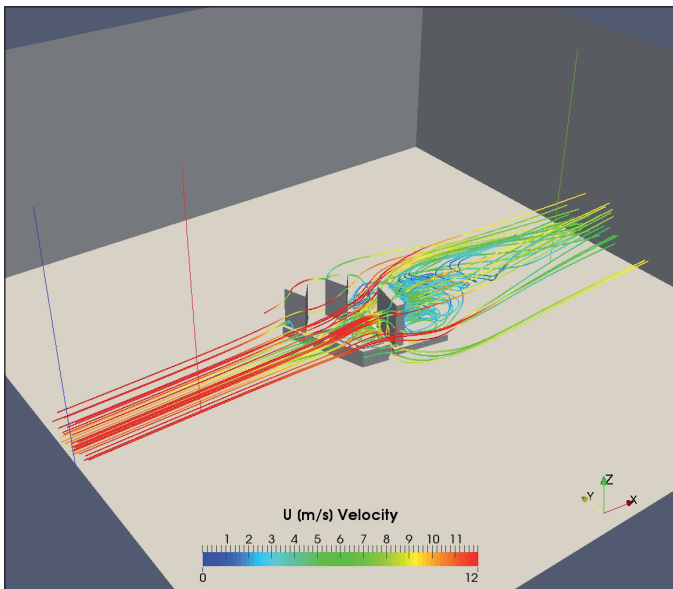
V programe OpenFOAM, ktorý využívame pre našu štúdiu, je táto modifikácia aplikovaná pomocou funkcie „nutkAtmRoughWallFunction“, ktorou sú zadefinované tri typy drsnosti povrchu z_0 [m] pre:

- výpočtovú doménu – rýchlostný profil $z_0 = 0,05$,
- centrálnu časť domény $z_0 = 0,03$,
- budovy (aerodynamicky hladké) $z_0 = 0$.

Na obrázku 1 vidíme, že vďaka aplikácii funkcie „nutkAtmRoughWallFunction“ nedochádza k výraznejšej deformácii vetrového profilu zadefinovaného na začiatku výpočtovej domény (obr. 1, modrá) pred tým,



Obr. 1 Rýchlostný profil vetra



Obr. 2 Prúdnice a ich deformácia pri prekážke

ako vietor narazí na fyzicky modelované prekážky – centrálnu časť domény (obr. 1, červená). Za objektami dochádza k deformácii vetrového profilu (obr. 1, zelená) v dôsledku toho, že prúd vzduchu je náveternou stranou budov zastavený, na bokoch zrýchlený a následne dochádza na záveternej strane k jeho zvráteniu (obr. 2).

Takmer pri všetkých CFD simuláciách v spodnej časti atmosférickej hraničnej vrstvy je potrebný presný opis prúdenia v blízkosti terénu. Rovnako v prostredí OpenFOAM využívame na popis drsnosti stien dva parametre, konštantu C_s , ktorá je všeobecne nastavená na predvolenú hodnotu 0,5, a k_s , ktorá predstavuje ekvivalentnú aerodynamickú drsnosť povrchu.

V takýchto prípadoch, keď je drsnosť steny vyjadrená drsnosťou ekvivalentnou drsnosti zrnka piesku k_s v stenových funkciách, musia byť súčasne splnené štyri podmienky [2]:

1. sieť v spodnej časti výpočtovej domény musí mať v zvislom smere dostatočné rozlíšenie,
2. horizontálne prúdenie je homogénne v spodnej i hornej časti domény,
3. vzdialenosť y_p od stredu bunky po stenu susediacej bunky (na spodku domény) musí byť väčšia ako je fyzikálna drsnosť povrchu k_s na teréne

$$k_s < y_p \quad (10)$$

4. poznanie vzťahu medzi drsnosťou ekvivalentnou drsnosti zrnka piesku k_s a zodpovedajúcej aerodynamickej drsnosti z_0

$$k_s = \frac{9,793z_0}{C_s} \quad (11)$$

kde C_s je konštanta drsnosti, ktorá je volená s ohľadom na typ drsnosti, všeobecne nastavená na predvolenú hodnotu 0,5.

Po dosadení hodnôt z_0 do vzťahu (11) dostaneme hodnoty $k_s = 0,98$ pre $z_0 = 0,05$ a $k_s = 0,59$ pre $z_0 = 0,03$, čo znamená, že hodnota y_p by mala byť rovná aspoň týmto hodnotám, čím by bola požadovaná minimálna výška bunky $h = 2$ m pre $z_0 = 0,05$ a $h = 1,2$ m pre $z_0 = 0,03$.

Z tabuľky 3 vidíme, že pri splnení podmienky podľa vzťahu (10) nie je so

súčasnými metódami možné dodržať podmienku stenovej funkcie, ktorá požaduje, aby bezrozmerná veličina y^+ :

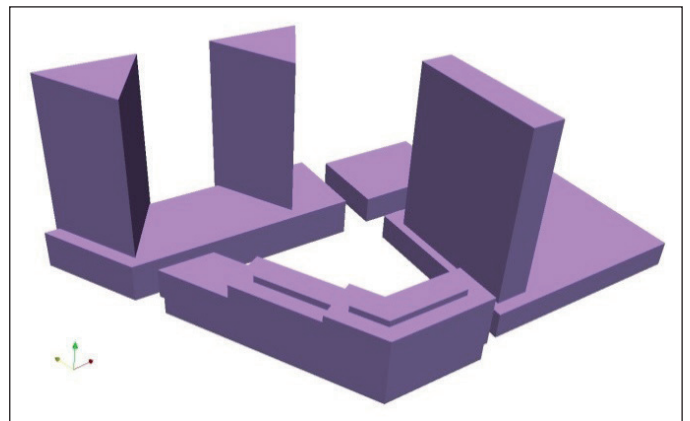
$$y^+ \cong 30 - 500 \quad (12)$$

Tab. 3 Dosahované hodnoty bezrozmernej veličiny y^+

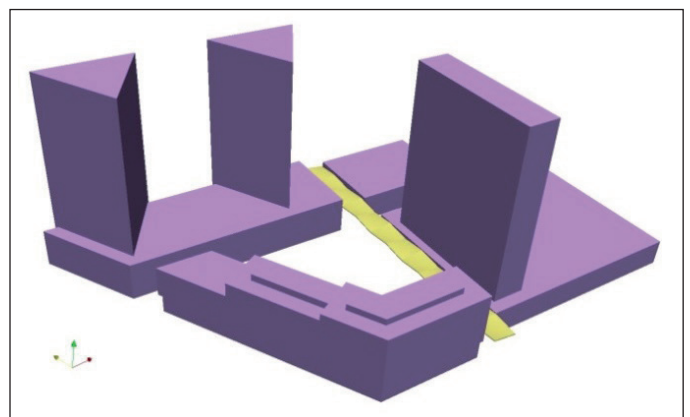
	Hodnota y^+		
	minimum	maximum	priemer
Povrch	7014,352	16311,757	15081,1
Terén	262,408	257811,414	9298,122
Budovy	90,317	144054,995	3772,24
Strecha	39,598	26095,805	1502,2

PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA

Predmetom štúdie bolo riešenie vplyvu výstavby dvoch výškových budov trojuholníkového pôdorysného tvaru v centre Bratislavy na veternú pohodu a bezpečnosť chodcov. Zo vzniknutého átria budú viesť štyri priechody, kde sa predpokladajú zvýšené rýchlosti prúdenia. Výška dvoch budov s trojuholníkovým pôdorysom je 108 m, existujúcej výškovkej budovy s obdĺžnikovým pôdorysným tvarom 115 m a výška nízkopodlažnej budovy je 35 m. Šírka priechodov medzi budovami je približne 16 m. Posudzované boli dva varianty. V prvom riešenom prípade nebolo átrium žiadnym spôsobom chránené (obr. 3). Na základe nepriaznivého účinku vetra na chodcov bolo v druhom prípade átrium chránené striedkou (obr. 4).



Obr. 3 Posudzovaný objekt – variant 1



Obr. 4 Posudzovaný objekt – variant 2

Veterná pohoda a bezpečnosť chodcov bola riešená CFD simuláciou softvérom OpenFOAM a posúdená na základe požiadaviek holandskej normy NEN 8100:2006 [4], ktorá odporúča vykonanie štúdie veternej pohody pre všetky nové budovy s výškou 30 metrov a viac. V štúdiu bola zanedbaná okolitá zástavba a bol posúdený najnepriaznivejší smer vetra pre Bratislavu (severozápadný).

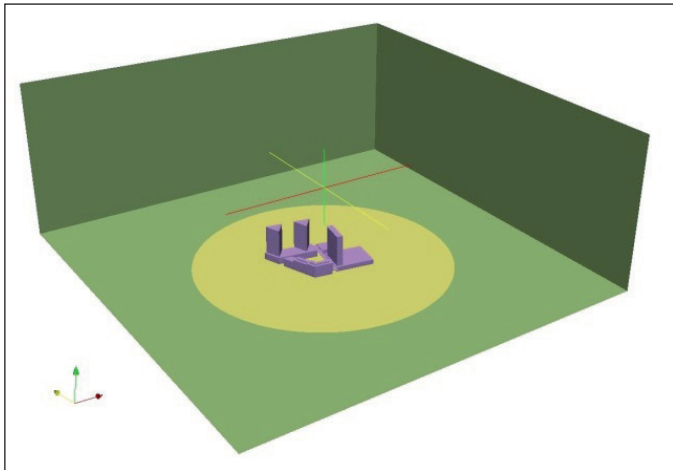
VÝPOČTOVÁ DOMÉNA A SIĚŤ

Veľkosť výpočtovej domény je $L(x) \times W(y) \times H(z) = 1300 \times 1300 \times 500$ m (obr. 5, zelená). Centrálna časť domény (obr. 4, žltá), zahŕňajúca posudzované budovy (obr. 5, fialová), sa rozkladá na ploche s priemerom $D = 800$ m.

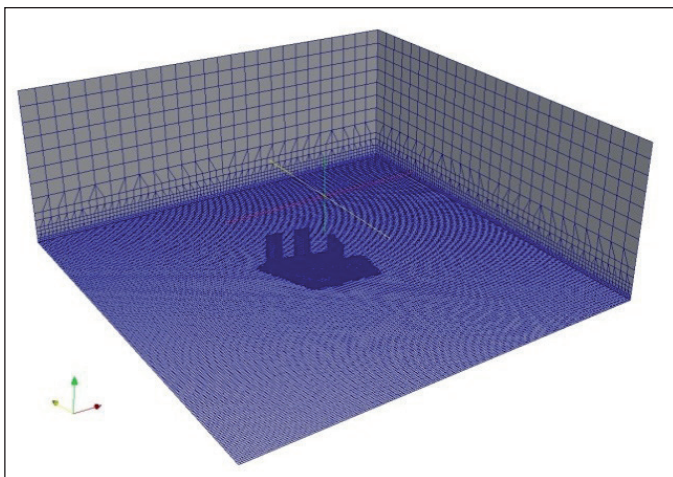
Na výpočtovej doméne bola pomocou funkcie „snappyHexMesh“ vytvorená sieť (obr. 6) s rozmermi $50 \times 50 \times 50$ m, ktorá sa od výšky 150 m nad úrovňou terénu postupne zahusťuje na požadovanú úroveň podľa typu, a to nasledovne:

- povrch (obr. 5, zelená) na úroveň (3,3),
- terén (obr. 5, žltá) na úroveň (3,6),
- budovy (obr. 5, fialová) na úroveň (4,6),
- strecha (obr. 4, žltá) na úroveň (4,8).

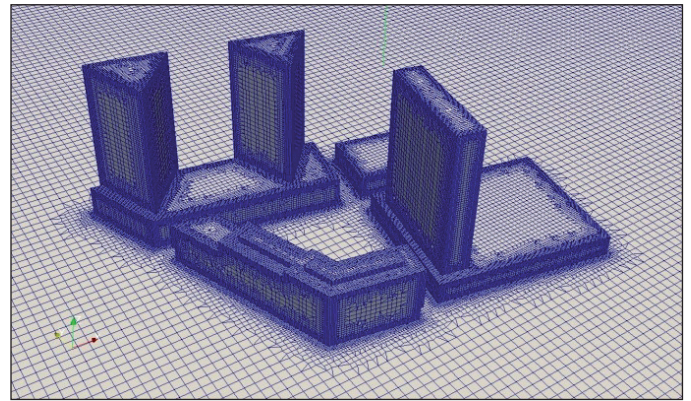
Pri prvom variante je výpočtová sieť tvorená 2 029 799 bunkami (obr. 7), pri druhom variante 3 292 356 bunkami (obr. 8).



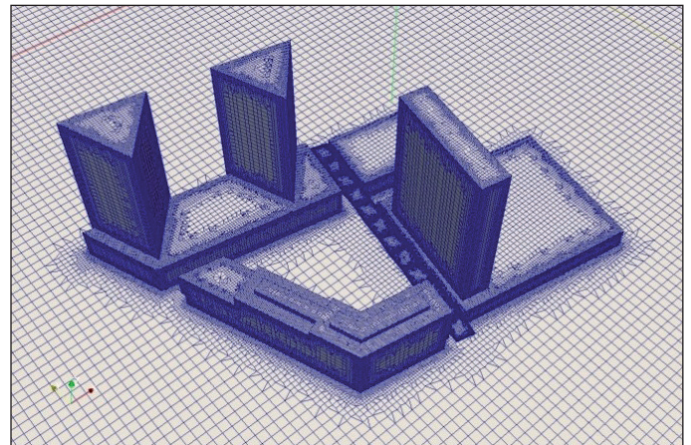
Obr. 5 Výpočtová doména (výpočtová doména – zelená, centrálna časť – žltá, fyzicky modelované budovy – fialová)



Obr. 6 Celkový pohľad na sieť výpočtovej domény



Obr. 7 Výpočtová sieť na budovách – variant 1



Obr. 8 Výpočtová sieť na budovách – variant 2

VÝSLEDKY A VYHODNOTENIE

Na obrázkoch 9 a 10 môžeme vidieť rýchlosti vetra dosahované v úrovni chodcov ($h = 1,5$ m), obrázok 11 znázorňuje maximálne rýchlosti vetra dosahované v tejto úrovni, na obrázku 12 a obrázku 13 môžeme vidieť prekročenie normou stanovených kritických hodnôt rýchlosti vetra ($U_{krit} = 5$ m/s a $U_{krit} = 15$ m/s) v hodinách a v percentách za rok. Tabuľka 4 sumarizuje triedy veternej pohody a stupeň veterného rizika pre oba varianty.

Pri prvom posudzovanom variante, kedy priestor medzi budovami nie je chránený, dosahuje maximálna rýchlosť vetra hodnotu 11 m/s. Rýchlosť vetra 5 m/s je prekročená 10,7 % hodín v roku a rýchlosť 15 m/s je prekročená 0,2 % hodín v roku. Na základe týchto hodnôt je trieda veternej pohody chodcov v prípade prvého variantu „D“, čo znamená, že táto oblasť má dostatočnú veternú pohodu pre rýchly prechod, ale nedostatočnú veternú pohodu pre prechádzanie a sedenie a stupeň veterného rizika je „čiastočné riziko“.

V druhom posudzovanom variante je priestor medzi budovami chránený striedkou. Maximálna rýchlosť vetra dosahuje hodnotu 9,3 m/s. Rýchlosť 5 m/s je prekročená rovnako ako v prvom variante 7,9 % hodín v roku a rýchlosť 15 m/s počas 0,00 % v roku. Trieda veternej pohody v druhom variante je „C“, čo znamená, že táto oblasť má dobrú veternú pohodu pre rýchly prechod, dostatočnú veternú pohodu pre prechádzanie, ale nedostatočnú veternú pohodu pre sedenie a stupeň veterného rizika je „bez rizika“.

Tab. 4 Sumarizácia výsledkov

Veterná pohoda	Variant	
	1	2
Trieda	D	C
Rýchly prechod	dostatočná	dobrá
Prechádzanie	nedostatočná	dostatočná
Sedenie	nedostatočná	nedostatočná
Veterné riziko	Variant	
	1	2
Stupeň	častočné riziko	bez rizika

ZÁVER

Cieľom tejto štúdie bola analýza a riešenie problému veternej pohody a veterného rizika chodcov v átriu a priechodoch medzi výškovými budovami.

Kombinácia CFD simulácie s následným posúdením podľa požiadaviek holandskej normy NEN 8100:2006 [4] sa javí ako použiteľná pri stanovení veternej pohody chodcov. Použitie softvéru OpenFOAM umožnilo vytvorenie výpočtovej domény s vysokým rozlíšením a podrobnou výpočtovou sieťou a zároveň umožnilo eliminovanie problému vznikajúceho pri modelovaní vetrového profilu.

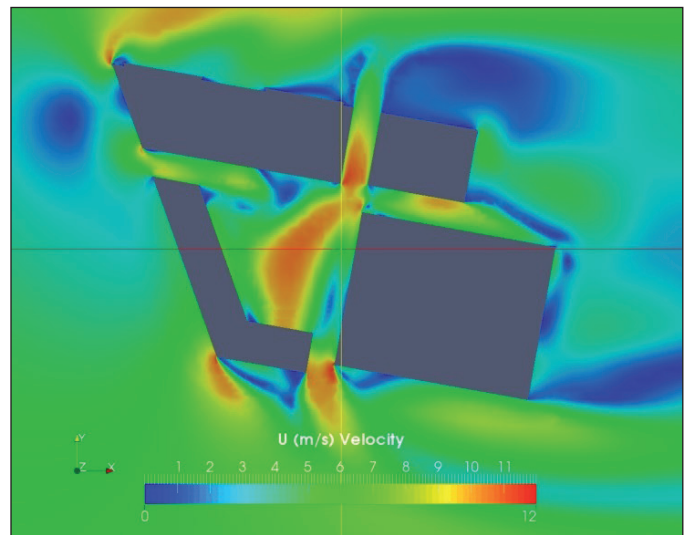
Štúdiá bola vykonaná len pre najnepriaznivejší smer vetra so zanedbanou okolitou zástavbou.

Na základe výsledkov môžeme povedať, že variant 1 bez krycej striešky predstavuje z hľadiska účinku vetra na ľudí pohybujúcich sa v blízkosti a okolí budov nepríjemnú veternú nepohodu s vyskytujúcimi sa stavmi veterného rizika. Variant 2 s krycou strieškou vytvára prijateľné podmienky veternej pohody v priestore medzi budovami a nevyskytujú sa tu stavy veterného rizika.

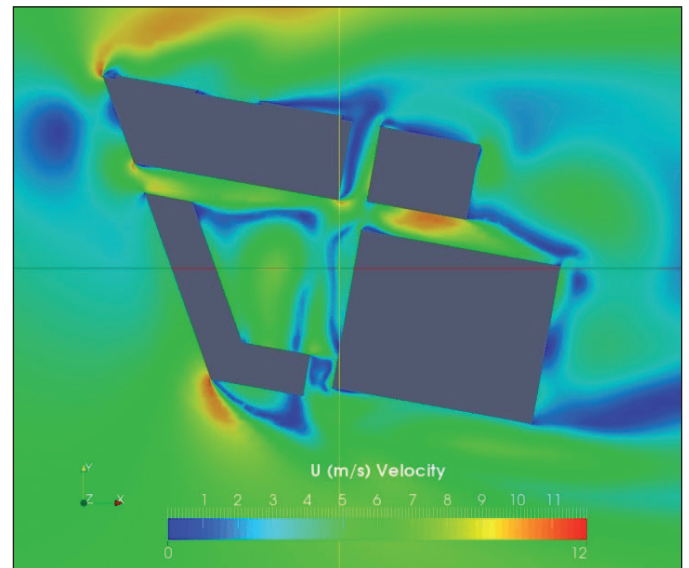
Kontakt na autora: dagmara.cehelova@stuba.sk

Použité zdroje:

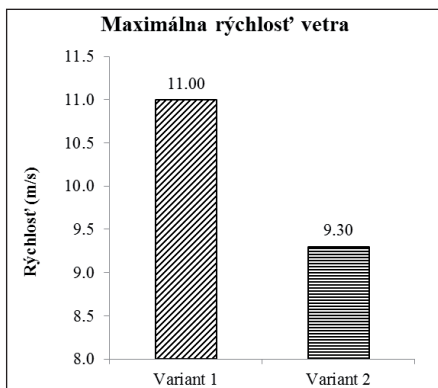
- [1] BLOCKEN, B., CARMELIET, J., STATHOPOULOS, T. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings – effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2007, č. 95, s. 941-962.
- [2] BLOCKEN, B., STATHOPOULOS, T., CARMELIET, J. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric Environment*. 2007, č. 41, s. 238-252.
- [3] RICHARDS, P.J., HOXEY, R. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering model using the *k-ε* turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1993, č. 46, 47, s. 145-153.
- [4] NEN 8100:2006: Wind comfort and wind danger in the built environment. Netherlandns, 2006. ■



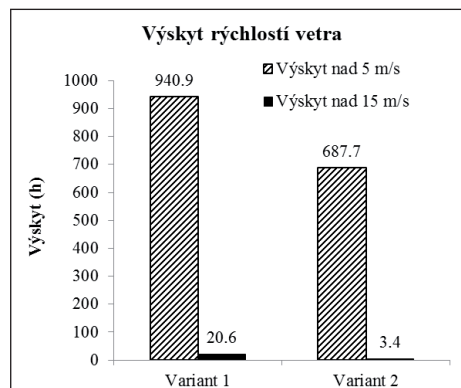
Obr. 9 Rýchlosti vetra v úrovni chodcov ($h = 1,5 \text{ m}$) – variant 1



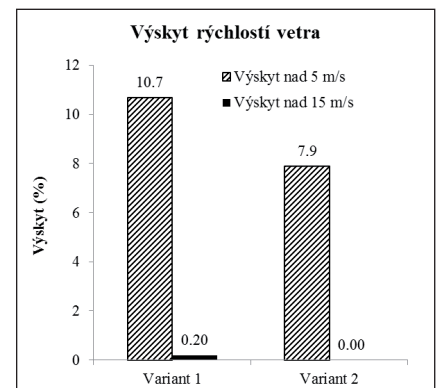
Obr. 10 Rýchlosti vetra v úrovni chodcov ($h = 1,5 \text{ m}$) – variant 2



Obr. 11 Maximálne rýchlosti vetra v úrovni chodcov pre oba varianty



Obr. 12 Výskyt rýchlostí vetra v úrovni chodcov (v hodinách) pre oba varianty



Obr. 13 Výskyt rýchlostí vetra v úrovni chodcov (v percentách) pre oba varianty