

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA

Ing. Ivana OLEKŠÁKOVÁ

Autoreferát dizertačnej práce

ANALÝZA ÚČINKOV VETRA A MODELOVÉ SKÚŠKY VO
VETERNOM TUNELI BLWT STU

pre získanie akademického titulu *philosophiae doctor* (PhD.)
v doktorandskom študijnom programe:

Aplikovaná mechanika

Bratislava 2016

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktoradského štúdia na Katedre stavebnej mechaniky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Ivana OLEKŠÁKOVÁ**
Katedra stavebnej mechaniky
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: **Doc. Ing. Oľga HUBOVÁ, PhD**
Katedra stavebnej mechaniky
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti: **Doc. Ing. Vladimíra MICHALCOVÁ, PhD.**
Katedra stavební mechaniky
Fakulta stavební, VŠB – Technická universita Ostrava
L.Podéště 1875/16, Ostrava – Poruba

Prof. Ing. Ján BENČAT, PhD.
Katedra stavebnej mechaniky
Stavebná fakulta ŽU v Žiline
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Doc. RNDr. Peter FROLKOVIČ, PhD.
Katedra matematiky a deskriptívnej geometrie
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný.....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná o.....h.
na Katedre stavebnej mechaniky Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity
v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan Stavebnej fakulty STU v Bratislave

OBSAH

1.	ÚVOD	1
1.1.	MOTIVÁCIA DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	1
1.2.	CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	1
2.	STRUČNÝ PREHĽAD PROBLEMATIKY	1
3.	ZÁKLADNÉ ROVNICE PRÚDENIA	2
4.	SIMULÁCIE A TURBULENTNÉ MODELY	3
5.	EXPERIMENTY VO VETERNOM TUNELI	4
6.	ČIASTOČNÉ VÝSLEDKY	6
7.	VÝŠKOVÁ BUDOVA	12
7.1.	SIMULÁCIA CFD	13
7.2.	EXPERIMENT VO VETERNOM TUNELI STU V TRNÁVKE	14
8.	ZÁVER	16
	SUMMARY	18
	PREHĽAD PUBLIKÁCIÍ AUTORA	19
	LITERATÚRA.....	21

1. Úvod

Predkladaná práca sa venuje vplyvu vetra na budovy a možnosti využitia aerodynamiky v inžinierskej praxi. Práca sa zaoberá matematickým modelovaním prúdenia, vysvetleniu základných pojmov v prúdení tekutín ako aj opisom modelom turbulencie a ich možnosťami použitia. Prínosom tejto práce je vytvorenie simulačného modelu ako aj experimentu a porovnanie týchto výsledkov.

1.1. Motivácia dizertačnej práce

Klíma a vplyv vetra na budovy je problém riešený od dávnych dôb. Už prvé staroveké civilizácie ukazujú, že už veľmi dávno existovali štúdie zaoberajúce sa vplyvom vetra. Egypťania, Číňania ale aj filozofi antického Grécka sú dôkazom, že táto téma bola veľmi dôležitá. Dodnes je však vietor resp. prúdenie vzduchu sčasti neprebádanou oblasťou a to predovšetkým turbulencia a turbulentné prúdenie, ktoré vzniká aj na povrchu zeme. Tento odbor sa v posledných rokoch veľmi rozvíja a mnoho vedcov a matematikov sa zaoberá práve matematickým zápisom turbulencie a jeho čo najpresnejším opisom rôznymi formami turbulentných modelov. Na tomto základe dnes existuje mnoho softvérov, ktoré sú schopné simulovať prúdenie tekutín a teda aj vzduchu a tieto výsledky veľmi jasne a názorne vizualizovať.

1.2. Ciele dizertačnej práce

- Nadobudnúť znalosti z veterného inžinierstva, prúdenia tekutín a CFD pre využitie v odbore stavebníctva. Predovšetkým na určovanie tlakov a tlakových koeficientov, prípadne riešenia pohody chodcov.
- Vytvoríť základný model prúdenia pre problém obtekania objektov a analýza tlakov a tlakových koeficientov pre dané modelované tvary.
- Namodelovanie atmosférickej medznej vrstvy s použitím zvoleného simulačného programu.
- Experiment obtekania stavebného objektu a získavanie tlakov a tlakových koeficientov z meraní vo veternom tuneli.
- Namodelovanie obtekania zvolených objektov v simulačnom softvéri v 3D a porovnanie týchto výsledkov s výsledkami z experimentu z veterného tunela B.T.W.T STU v Bratislave.

2. Stručný prehľad problematiky

Posledné obdobie je charakteristické rozmachom matematického modelovanie prúdenia okolo objektov a to hlavne vďaka rozvoju počítačov a sústredenie sa na tvorbu softvérov na báze CFD. Veľkou udalosťou bola konferencia Conference of

Computational Wind Engineering v Tokiu v roku 1992, ktorá bola zameraná na rozvoj matematických modelov a ich aplikácie v oblasti aerodynamiky [1].

Murakami, Mochida a jeho tím predstavili svoje otestované numerické metódy užitočné pre riešenie prúdenia a to k-ε, DSM model, ASM (Algebraic Stres Model), LES modelu. Model LES veľmi dobre odráža vplyv turbulencie, ale na druhej strane je náročný na výkon počítača. Ďalším dôležitým bodom bolo porovnanie numerickej analýzy takýchto experimentov s reálnymi hodnotami, čo bolo hlavným centrom záujmu Wrighta a Easona. Ročne sa konajú ohľadom tejto problematiky prúdenia medzinárodné konferencie, kde sú prezentované dôležité novinky z odboru veterného inžinierstva [2], [3].

Vývoj v tejto oblasti stále prebieha v experimentálnej sfére ako aj v zlepšovaní matematických modelov a ich aplikácií na jednotlivé problémy v oblasti prúdenia tekutín. Turbulencia sama o sebe je tak zložitý problém, ktorý nie je stále plne doriešený a hľadajú sa lepšie spôsoby výpočtu a simulácií tohto problému.

3. Základné rovnice prúdenia

Hlavnou úlohou dynamiky tekutín je nájsť rýchlostné pole popisujúce prúdenie v danej doméne. Spôsob, akým je to možné urobiť, je použitie základných rovníc prúdenia tekutín, ktorých odvodenie je uvedené v nasledujúcej časti. Najdôležitejšie sú tieto 3 zákony (podrobnejšie v [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]):

- Zákon zachovania hmotnosti (rovnica spojitosti - kontinuity)
- Zákon zachovania hybnosti
- Zákon zachovania energie

Konečná rovnica kontinuity vo vektorovom zápise [3]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad \text{alebo} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

Ak je tekutina nestlačiteľná $\rho = \text{konštanta}$, je nezávislá na priestore a čase, takže $\partial \rho / \partial t = 0$. Rovnica kontinuity sa potom redukuje:

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

v zápise karteziánskych súradníc:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Tieto rovnice je možné odvodzovať pre časticu tekutiny pohybujúcu sa s prúdiacou tekutinou (Lagrangiov prístup) alebo pre element tekutiny pevne fixovanej v priestore (Eulerovský prístup). Pre použitie CFD potrebujeme tieto rovnice získať v Eulerovskej forme, ale je zvyčajne ľahšie ich odvodiť v prístupe podľa Lagrangea [12].

Výsledná rovnica zachovania hybnosti potom v smere x vyzerá nasledovne:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

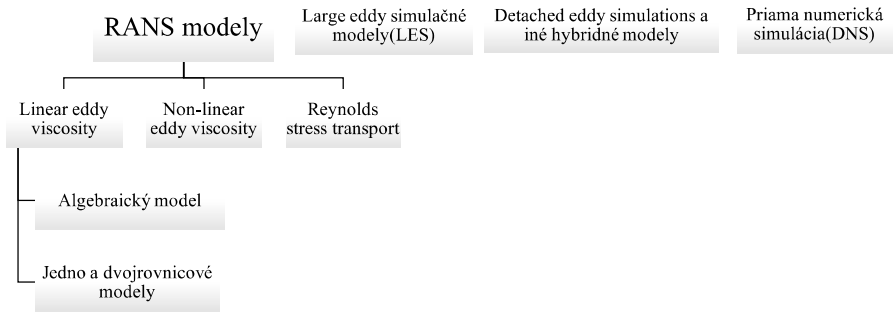
Vo vektorovom zápise ako Navier-Stokesove rovnice:

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} \right) = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (7)$$

kde $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \Delta$ je Laplacov operátor

4. Simulácie a turbulentné modely

Analýza a výber turbulentných modelov je kľúčovou otázkou pre CFD simulácie. Laminárne prúdenie na povrchu zeme je veľmi zriedkavé a pri určitých rýchlostiach takmer nemožné a riešenie rovníc prúdenia pomocou CFD softvérov zahŕňa rôzne modely turbulencie. Podľa literatúry býva zvyčajne nasledovné rozdelenie turbulentných modelov (obr. 1.)



Obr. 1: Rozdelenie turbulentných modelov

Priama numerická simulácia (DNS) je forma simulácie v CFD, kde sú riešené Navier-Stokesové rovnice numericky bez akéhokoľvek modelu turbulencie. To znamená, že celý rad priestorových i časových merítok turbulencie musí byť vyriešený priamo matematicky analytickými metódami. Všetky priestorové intenzity turbulencie musia byť vyriešené vo zvolenej výpočtovej sieti, od tých najmenších disipatívnych merítok (Kolmogorove merítka) a až do integrálnej dĺžky turbulencie L , spojené s pohybmi, ktoré obsahujú najviac kinetickej energie.

RANS typ je momentálne najčastejším typom simulácie turbulencií. Pre získanie stredných hodnôt premenných pri pohybe tekutiny, musia byť odvodené rovnice pre stredné hodnoty priemerovaním Navier-Stokesových rovníc. Rýchlosti a iné veličiny sú nahradené do priemerov a fluktuáčnych zložiek. [1].

$$\mathbf{u}_i(\mathbf{x}_i, t) = \overline{\mathbf{u}_i}(\mathbf{x}_i) + \mathbf{u}_i'(\mathbf{x}_i, t) \quad (8)$$

kde stredná rýchlosť sa určí ako:

$$\overline{\mathbf{u}}_i(\mathbf{x}_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}_i(\mathbf{x}_i, t) dt, \quad (9)$$

T je priemerovací interval a musí byť dostatočne veľký v porovnaní s typickou časovou mierkou fluktuácií [13].

5. Experimenty vo veternom tuneli

Pre potvrdenie výsledkov CFD je vhodné použiť meranie in situ alebo merania v aerodynamickom tuneli. Veterný tunel je nástroj používaný vo výskume alebo v praxi pre štúdium účinkov prúdenia a obtekania pevných predmetov. Veterný tunel sa skladá z uzatvoreného priechodu s testovaným objektom v strede tunela. Vo veternom tuneli je možné merať rýchlosti vetra, tlaky, sily, momenty či zrýchlenie. S rýchlym rozvojom prístrojov a technického vybavenia laboratórií sa možnosti merania stále zlepšujú.

Štandardné techniky a modelové experimenty vo veterných tuneloch sú závislé od účelu a dostupných zdrojov. Najbežnejšie druhy experimentov v tuneloch [14]:

- **Lokálne tlaky** – Vyšetrovanie lokálnych tlakov na zmenšených statických modeloch, ktoré majú tlakové odbery.
- **Zaťaženie vetrom na konštrukcie** – Skúšky zaťaženia vetrom použité v konkrétnych oblastiach v podobe tlakových modelov, kde lokálne tlaky sú priemerované v priestore či čase.
- **Vysokofrekvenčné spektrálne váhy** – priame merania zaťaženia vetrom na statických modeloch vrátane experimentu s vysokofrekvenčnými váhami pre výškové budovy.
- **Úsekové modely** – s využitím dynamiky uchytенých modelov sú veľmi vhodné pre výpočet dynamiky mostov.
- **Aerodynamické štúdie** – dynamické experimenty, ktoré sú potrebné predovšetkým pre mosty a výškové budovy.
- **Vplyv vetra na chodcov** – experimenty pre stanovenie rýchlosti vetra v úrovni chodcov, predovšetkým pri vplyve okolitej zástavby so statickými modelmi.
- **Znečistenie vzduchu** – experimenty na stanovenie kvality ovzdušia v mestách alebo v jeho blízkosti nebezpečných zdrojov znečistenia.
- **Terénne a topografické štúdie** – experimenty s topografickými modelmi v malých mierkach s využitím vizualizácie obtekania. Meranie sa najčastejšie rieši anemometrom s horčicím vláknom, je vhodné aj pre odhad veterného potenciálu územia (veternej turbíny)

Veterný tunel BLWT STU je otvorený podtlakový tunel, kde sa nachádzajú dve testovacie sekcie. Tunel má dĺžka 26,3 m, prierez tunela je 2,6 x 1,6 m. Zadný

modelový priestor je pre riešenie problémov, kde je potrebné modelovať medznú vrstvu. Pre vývoj takejto medznej vrstvy slúži 14,35 m dĺžky tunela, ktorá pri vhodnej drsnosti terénu modeluje prirodzený vietor pre konkrétny typ terénu podľa príslušných noriem (napr. STN EN 1991-1-4).

V súčasnosti je v tuneli pomocou drsnosti nopovej fólie a bariéry namodelované turbulentné prúdenie, ktoré sa podľa normy STN EN približuje kategórií III. až IV., čo je kategória, ktorá definuje hustú mestskú zástavbu v centrách miest. Turbulentné prúdenie medznej vrstvy vo veternom tuneli v porovnaní s atmosférickou medznou vrstvou na zemskom povrchu je v mierke 1:300 až 1:380 pri dodržaní všetkých podobnostných charakteristík. Predovšetkým ide o zachovanie podobnosti profilu strednej hodnoty pozdĺžnej zložky vektora rýchlosti, profilu intenzity turbulencie ako aj spektrálnu hustotu vírov. Možnosť merania a nastavovania rýchlosti prúdenia vetra v tuneli je od 0,2 po 32 m/s.



Obr. 2: Fotky veterného tunela BLWT STU v Bratislave

V súčasnosti vo veternom tuneli STU BA v Bratislave sme schopní merať rýchlosti a tlaky. Prístrojové vybavenie tunela obsahuje:

- *2x Prandtlóva trubica* - nachádzajúce sa v prednej i zadnej časti tunela na kontrolu rýchlosti prúdenia vzduchu v meracích priestoroch.
- *15x diferenciálne tlakové snímače* – nachádzajúce sa pozdĺž tunela, slúžia na kontrolu vyrovnaného tlaku v tuneli nad medznou vrstvou.
- *Anemometer miniCTA typ 54T42* (Dantec Dynamics) – anemometer so žeravým vláknom na meranie strednej rýchlosti, smerodajnej odchýlky, intenzity turbulencie a meranie spektra turbulentného prúdenia.
- *Almemo typ MA25902* s termín-anemometrickou sondou typu FVA935TH5K2 s možnosťou merania veľmi malých rýchlostí prúdenia s krokom 0,2 m/s.
- *Tlakový skener DnSA 3217 Samisatex* na meranie lokálnych tlakov v odberných miestach na modeli.
- *Trojkomponentné váhy* na báze tenzometrov na meranie odporu, vztlaku a klopiaceho momentu.

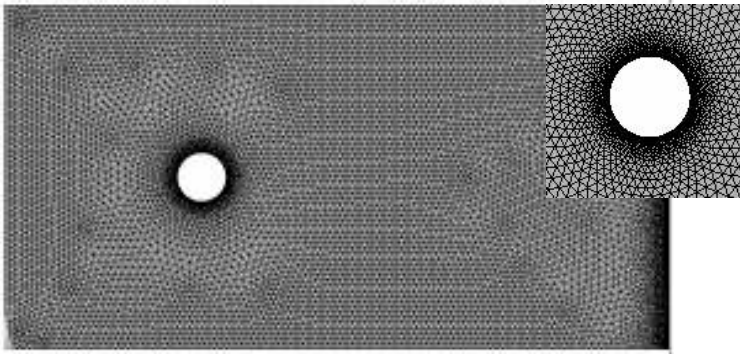
6. Čiastočné výsledky

Ako príprava pre riešenie danej problematiky sa zvolili úvodné simulácie ako aj experimenty, ktoré boli dôležitou súčasťou práce. V tejto sú teda uvedené v skratenej forme iba niektoré projekty, ktoré boli počas štúdia realizované:

- 2D obtekania valca a iných objektov
- Porovnávanie eurokódu so simuláciou
- Simulácia atmosférickej medznej vrstvy (ABL)
- Modelovanie obtekania kocky
- Experiment samostatne stojacej kocky
- Experiment vplyvu objektu pred kockou pre účely umiestovania veterných turbín

2D obtekania valca a iných objektov

Prvým modelom pre riešenie a overovanie simulácie s Eurokódom, či experimentom bol príklad obtekania valca. Táto simulácia bola riešená v programe Ansys Fluent ako 2D model. Bol to úvodný pokus simulácií, kde sa riešilo použitie spôsobu meshovania resp. vytváranie siete ako aj možnosti softvéru.



Obr. 3: Riešenie siete pri simulácii obtekania valca

Pre danú simuláciu boli skúmané nasledovné turbulентné modely:

- $k-\epsilon$ turbulентný model (NKE),
- nelineárny model Girimaji (GIR),
- Shih, Zhu, Lumley model (SZL),
- $k-\omega$ turbulентný model,
- shear-stress transportný model (SST).

Všetky tieto špeciálne typy turbulентných modelov sú opísané v literatúre [15], [16], [17] ako aj v pomôčke pre použitie softvéru Ansys [18]. Výsledné grafy a tabuľka zobrazujú výsledky pre všetky skúmané modely.

Turbulentný model	Max. Rýchlosť	Tlaky (kPa)	
	m/s	Tlak	sanie
$k-\varepsilon$	10,213	18,185	-43,448
<i>RNG model</i>	11,123	16,213	-42,506
<i>New k-ε</i>	10,125	17,064	-40,434
$k-\omega$	10,705	18,528	-40,431
<i>Girimaji</i>	10,079	16,956	-42,892
<i>Shi-Zhu</i>	10,663	16,783	-40,307
<i>Shear stress</i>	9,819	18,714	-42,185

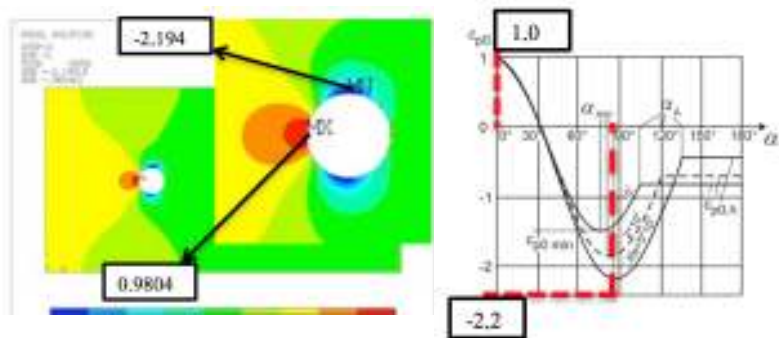
Tab. 1: Výsledky 2D modelovania obtekania valca frízne turbulentné modely.

Výsledkom tohto modelovania bolo, že turbulentné modely sa od seba odlišujú v prípade 2D modelovania takéhoto typu obtekania iba minimálne, v prepočte pre rýchlosti bola odchýlka medzi najväčšou ($k-\omega$) a najmenšou hodnotou (*Shear stress*) 8,2765 %. Pre naše potreby do ďalších výpočtov je dôležitý model $k-\varepsilon$, ktorý sa líši od minimálnej hodnoty o 3,858%, od priemernej hodnoty zo všetkých modelov o 1,694%.

Porovnanie eurokódu so simuláciou

Jednou z dôležitých častí práce bola simulácia pre porovnanie hodnôt tlakov na povrchu valca s Eurokódom, čím je možné si overiť na jednoduchých prípadoch presnosť simulácie. Pri simulácii bol použitý $k-\varepsilon$ model.

Vstupná rýchlosť bola zvolená 15m/s pre daný rozmer 5 m a pre doménu rozmerov 270x140m. Dôležitým parametrom je Reynoldsovo číslo, ktoré môžeme vyrátať ako: $Re = \frac{uL}{\nu} = \frac{15.5}{15.10^{-6}} = 5 \cdot 10^5$. To slúži na opis turbulencie prúdenia ale aj pre získanie hodnôt tlakových koeficientov z EN.

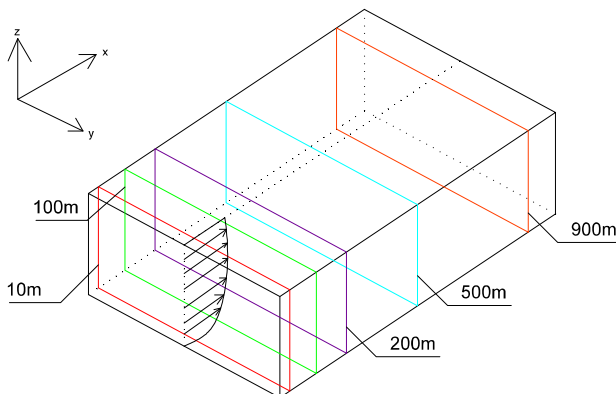


Obr. 4: Porovnanie výsledkov tlakových koeficientov zo simulácie a Eurokódu

Ako je jasné z obrázku pre výpočet tlakových koeficientov, hodnoty C_{pe} sú veľmi podobné a pre jednoduchý 2D prípad je zvolený turbulentný model veľmi presný a odlišuje sa od výpočtu podľa európskej normy iba minimálne.

Simulácia atmosférickej medznej vrstvy

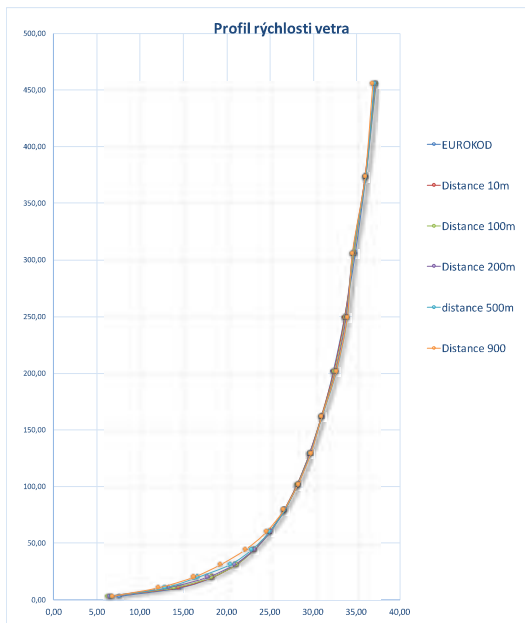
Simulácia atmosférického prúdenia nad zložitým terénom je veľmi dôležitá a to nie len pre vyhodnotenie zaťaženia vetrom na budovy. Táto problematika simulácie ABL je zložitý problém a zaoberajú sa ňou viacerí autori [19], [20]. Je najdôležitejšie nasimulovať skutočný „inflow“, čiže vstup vetra do domény pre simulácie, ktoré majú kopírovať reálne situácie. Na nasledujúcom obrázku je zobrazená testovacia doména, ktorá mala rozmery 1000 x 1000 x 500m, bola rozdelená rovnomerne, čo je možné vidieť na obrázku.



Obr. 5: Testovacie linie ABL v simulácii v OpenFOAMe

Spôsobom riešenia hlavnej domény bez akýchkoľvek vnútorných objektov bol riešený príkazom *blockMesh*. Vytvorený profil bol riešený pomocou inletového vstupu v skripte *atmBoundaryLayerInletVelocity*. Tieto vstupné hodnoty sú zadané v zhode s modelovaným profilom v Eurokóde pre danú kategóriu terénu. V našom prípade pre väčšinu simulácií bola použitá kategória terénu III.

Ako píše aj iní autori [21], [22], je veľmi ťažké dosiahnuť úplnú homogenitu profilu rýchlosti vetra v celej doméne. Modelované objekty sa vždy umiestňujú do stredu domény, čiže do tejto vzdialenosti je dôležité zachovávať čo možno najpresnejší profil, zhodný s profilom v eurokóde, alebo s experimentom.

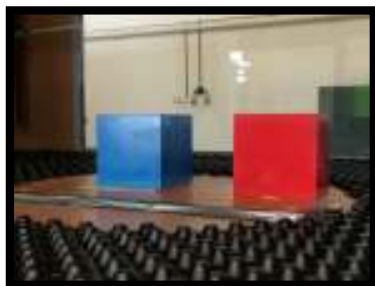


Obr. 6: Testovanie homogenity profilu rýchlosti vetra

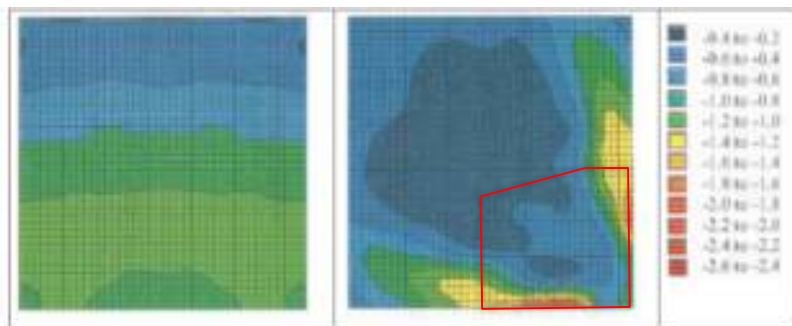
Experiment samostatne stojacej kocky

Prvým experimentom je riešenie tlakov a saní na streche kocky a mala by vykazovať rovnaké hodnoty ako známa kocka Silsoe od iných autorov [23], [24], [25], a s touto literatúrou boli výsledky porovnávané.

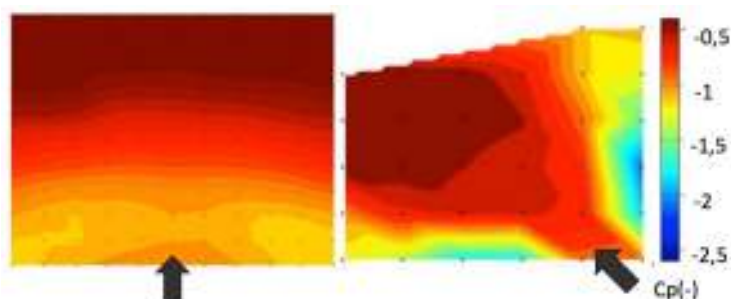
Kocka bola osadená v zadnej časti tunela, kde je vyvinutá medzná vrstva a bola natáčaná po 15° od uhla 0 až po 45° , pričom pri samostatnej kocke boli namerané aj uhly 90° , 180° a 270° , aby bolo možné rekonštruovať tlaky na celej streche pre hlavný (0°) smer pôsobenia vetra.



Obr. 7: Testovanie kocky bez a s vpredu stojacim objektom



Obr. 8: Rozptyl hodnôt tlakových koeficientov podľa Richardsa [23]



Obr. 9: Experimentálne získané sania na streche kocky a) 0° , b) uhol 45°

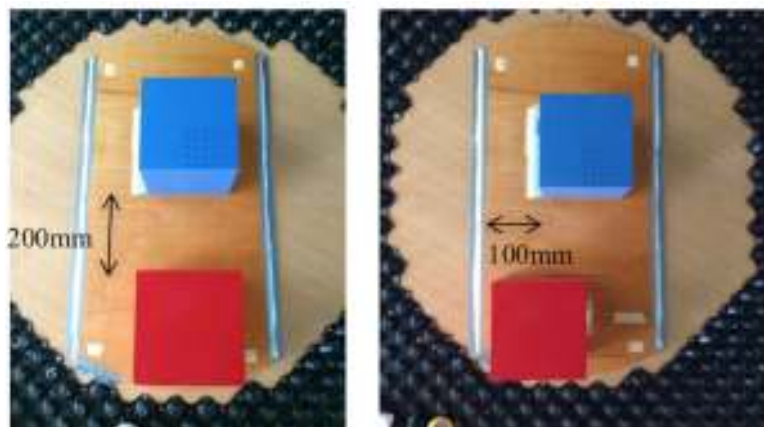
Na predchádzajúcich obrázkoch je viditeľná zhoda s experimentom od Richardsa pre prúdenie vzduchu kolmo na hranu budovy, kde maximálne hodnoty tlakového koeficientu na kocke dosahujú hodnotu $-1,2$. V našom prípade maximálna hodnota tlakového koeficientu dosiahla veľkosť $-1,1237$ s daným rozložením izočiari. Omnoho zaujímavejšie sú však hodnoty sania v prípade prúdenia vetra pod uhlom 45° . V tomto prípade udáva Richards hodnoty tlakového koeficientu okolo $-2,4$ a v našom experimente maximálna hodnota dosahovala veľkosť $-2,405$, čo je takmer dokonalá zhoda.

Na základne tohto experimentu sme si overili správnosť nášho experimentu s dostupnou literatúrou a inými experimentami v iných veterných tuneloch.

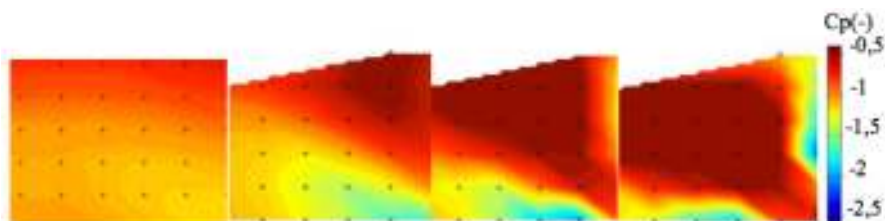
Experiment vplyvu objektu pred kockou pre účely umiestovania veterných turbín

Zisťované boli polohy podľa obr. 10, kde vzdialenosť oboch kociek bola presne 200mm , ako ich rozmery a v druhej polohe bola kocka posunutá na ľavú stranu o 100mm .

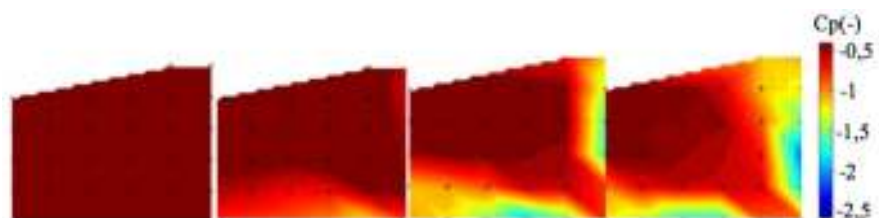
V takejto polohe boli kocky rotované opäť po 15-tich stupňoch na uhly 15 , 30 a 45° .



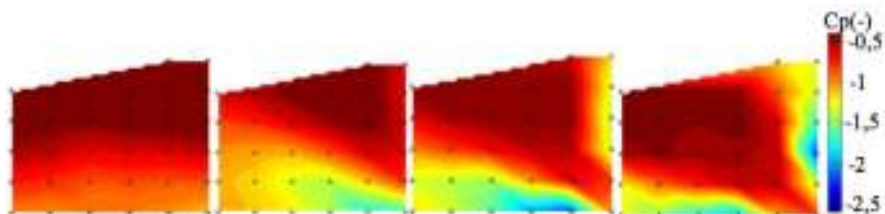
Obr. 16: Polohy kociek M1 a M2 pri meraní (v polohe 0°),



Obr. 11: Izočítary C_p pre samostatne stojacu kocku pre uhly $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ a 45°



Obr. 12: Izočítary C_p pre kocku v polohe M1 pre uhly $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ a 45°

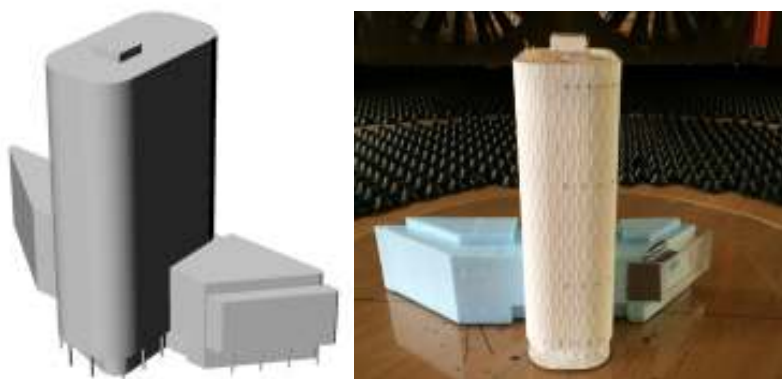


Obr. 13: Izočítary C_p pre kocku v polohe M2 pre uhly $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ a 45°

Z daných experimentov je možné vyvodiť záver, že najväčšie hodnoty sania vznikajú v prípade, ak budova resp. kocka stojí samostatne a vzduch prúdi pod uhlom 45° , kde hodnota sania dosiahla maximálnu hodnotu tlakového koeficienta $-2,404$. Tá korešponduje aj s výsledkami iných autorov [23], [24], [25]. Hodnota získaná experimentálne odpovedá hodnote, ktorá sa dá získať z eurokódu, kde je maximálne sanie pre kocku pri polohe 45° uvádzané ako $-2,5$. Experimentom sa podarilo zistiť, že ak pred testovanú budovu položíme budovu rovnakých rozmerov bude ovplyvňovať sanie na streche kocky a daná hodnota tlakového koeficientu sa bude znižovať. Jedine pri polohe MC2, a to pri 15° a 30° došlo k zväčšeniu sania oproti samostatne stojacej kocke. Zníženie pri polohe MC1 došlo pri všetkých uhloch a to v priemere asi o $C_p = 0,4$, čo je priemerne o 16%. Samotný experiment nepotvrdil zvyšovanie sania vplyvom okolitého objektu rovnakých rozmerov. Z tohto dôvodu je nutné experiment rozšíriť aj na vpredu stojace objekty iných rozmerov a je tu predpoklad, že so zmenou výšky objektu (nižší objekt pred budovou) bude možnosť nárastu sania pri určitých polohách a teda zlepšenie podmienok na umiestnenie mikroturbíny na streche kocky.

7. Výšková budova

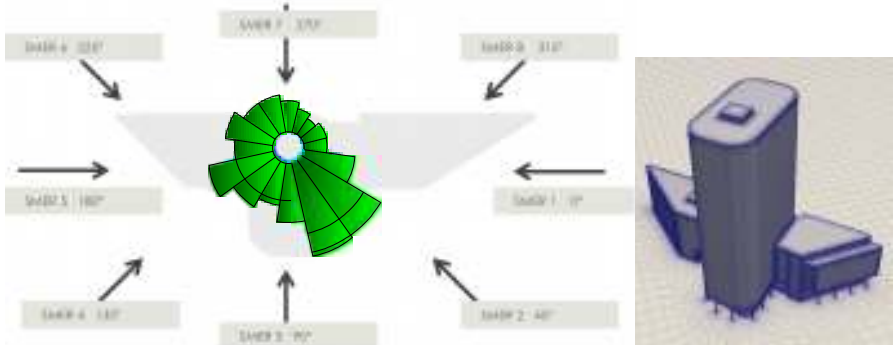
Záverečnou časťou práce je analýza zaťaženia na fasáde vysokej budovy, ktorá bude v nasledujúcich rokoch vystavaná v hlavnom meste Slovenska, Bratislave. Osadenie a situácia je na nasledujúcich obrázkoch. V inžinierskej praxi je veľmi dôležité určenie zaťaženia vetra na fasádach budov nepravidelných tvarov, ktorý nie je v uvádzaný v normách platných na Slovensku (Eurokóde). V takomto prípade máme možnosť získavať hodnoty, ktoré potrebujeme na návrh budovy dvoma metódami ešte pred postavením stavby: experimentom alebo matematickou simuláciou [15].



Obr. 14: Pohľad na simulačný a experimentálny model budovy

7.1. Simulácia CFD

Simulácia CFD bola riešená pre výpočet a získanie tlakov na fasáde výškovej budovy v programe OpenFOAM $k-\varepsilon$ turbulентným modelom. Riešenie simulácie sa robilo v ôsmich základných smeroch pre natočenia vŕdzy o 45 stupňov. Modelovanie vstupných údajov sa riešilo zadaním ABL pre terén kategórie medzi 3 podľa normy EN, čo zodpovedá zastavanosti a kategórií terénu v lokalite Bratislavy.



Obr. 15: a) Riešené smery pre simuláciu výškovej budovy, b) sieť (mesh) budovy

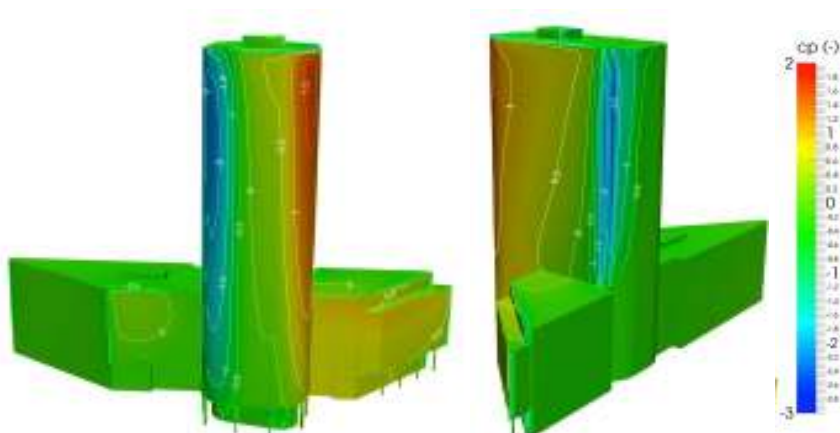
Vyhodnocovanie výsledkov je riešené vo forme obrázkov pomocou softvéru Paraview (multi-platforma pre analýzu a vizualizáciu výsledkov) v podobe izokontúr a grafov, ktoré hovoria o maximálnych hodnotách tlakov na fasáde.

Vyhodnocovanie sa robilo vo viacerých rezových rovinách vo výške: 35, 45, 55, 65, 75 a 85m, ktorá by podľa predpokladu mala obsahovať najvyššie hodnoty tlakov a saní. Na pravej strane sú znázornené body po obvodu výškovej budovy, ktoré boli zvolené pre vyhodnotenie a rovnomerne rozmiestnené po obvodu budovy a vyhodnocované do grafov. Na tieto rozmiestnenia bol použitý súbor *sampleDict*, kde je možnosť v post-processingu vyhodnotiť vypočítané hodnoty vo zvolených bodoch, líniách, či celých povrchoch.

V práci boli vyhodnocované a spracovávané výsledky viacerými spôsobmi:

- Maximálne a minimálne hodnoty tlakov a tlakových koeficientov pre referenčnú rýchlosť vo výške 85 m.
- Izočiarly tlakov na fasádach a tlakové histogramy.
- Tlakové koeficienty pre budovu – izočiarly.
- Grafy tlakov pre zvolenú výšku a pre všetky výšky v skúmaných bodoch.

Obrázok 16 veľmi názorne zobrazuje izočiarly a ich rozloženie po celej ploche budovy. Uvádzame iba jeden smer pre ilustratívnosť, ten, ktorý je podľa veternej ružice rozhodujúci pričom je možné zistiť extrémny tlakov na povrchu fasády budovy.



Obr. 16: Isočiarly tlakových koeficientov pre smer 2

Táto informácia môže byť veľmi dôležitá pre zložité objekty, pri návrhu fasád a ich úchytných častí, ktoré musia vydržať určitý tlak alebo sanie. Pre lokálne extrémny potom môže byť zvolené iba prídavné vystuženie, ak sa tieto hodnoty nevyskytujú na celej konštrukcii, čo je ekonomickejšie ako navrhovať celú fasádu na tento extrém.

7.2. Experiment vo veternom tuneli STU v Trnávke

Experiment vo veternom tuneli BLWT STU bol realizovaný tímom veterného tunela pod vedením doc. Ing. Olgy Hubovej, PhD, na modeli v mierke 1:300., ktorý bol osadený v zadnom meracom priestore tunela s vyvinutou medznou vrstvou. Samotné merania medznej vrstvy a iných charakteristík boli uskutočnené pri zmene drsnosti terénu (vloženie nopyovej fólie), aby sa dosiahol mestský terén zodpovedajúci kategórii medzi III. až IV. Táto hodnota bola navrhovaná podľa Wieringa, ktorý uvádza, že veľké mestá majú dĺžku drsnosti z_0 zodpovedajúcej hodnote 0,7 - 1,5 m. V našom prípade bola dĺžka drsnosti okolo 0,7m, čo zodpovedná zastavanosti a drsnosti v Bratislave a táto modelovaná medzná vrstva spĺňala kritéria pre priebeh strednej rýchlosti vetra, intenzity turbulencie, integrálnej dĺžky turbulencie ako aj spektrálnu hustotu. Všetky merania boli vedené v súlade s ASCE (American Society of Civil Engineers) [20].

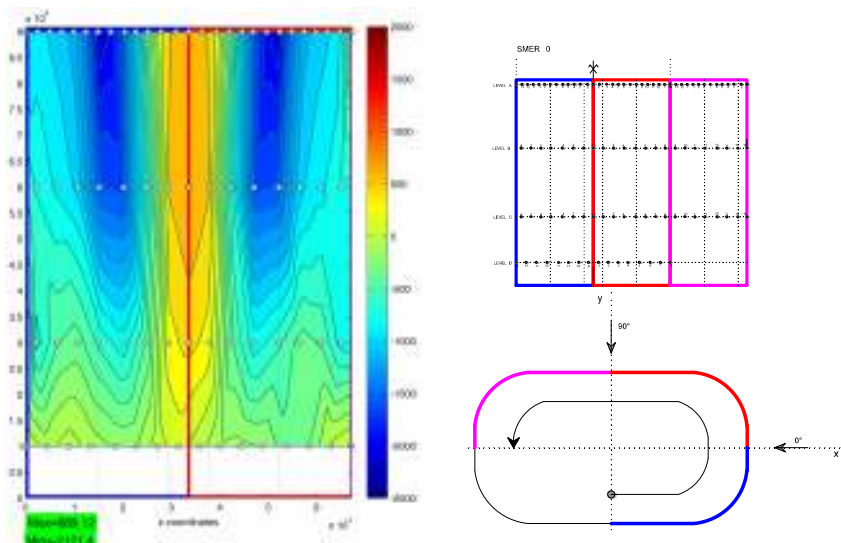
Budova nebola riešená v plnej zástavbe, jediná budova v okolí, ktorá bola braná do úvahy, bola budova VÚB. Model budovy sa nachádzal na otočnom stole a postupne sa natáčal po 15 stupňoch. Vyhodnotením množstva dát sa stanovila najnepriaznivejšia poloha budovy vzhľadom k prúdeniu vetra, kde boli stanovené maximálne hodnoty tlaku a sania na budovu. Meranie sa uskutočňovalo pri frekvenciách meniča od 18 Hz do 26 Hz, čo odpovedá rýchlostiam od 8 do 14 m/s.

Meranie tlakov sa riešilo v súlade so zásadami spomínanými v práci. Na meranie tlakov sa používalo meracie zariadenie Scanivalve. Meranie sa vykonávalo v štyroch hlavných výškach, ktoré boli vyhodnocované pomocou programu MatLAB.



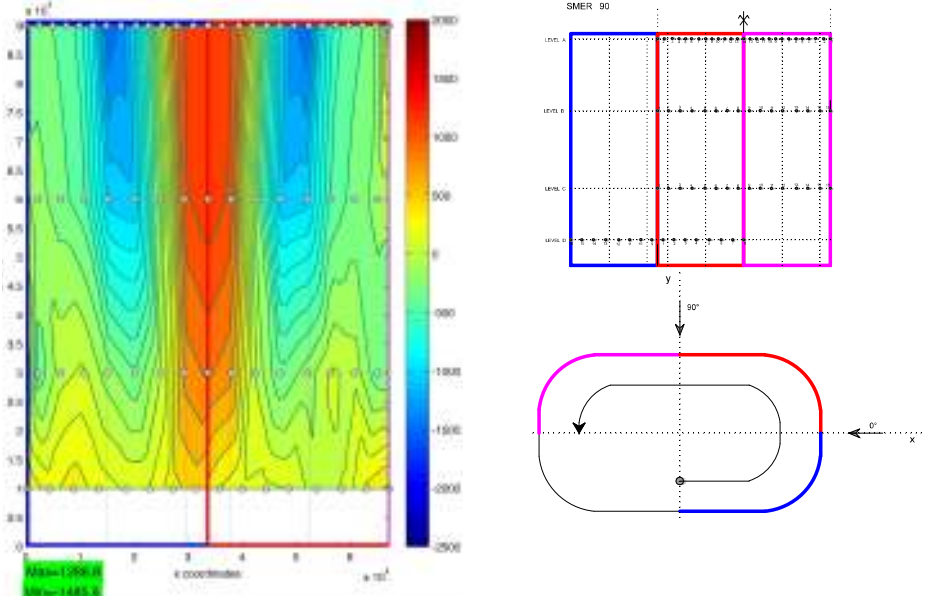
Obr. 17: a) Objekty v tuneli, b) samostatná budova v tuneli

Výsledkom experimentu sú tlaky v odberných miestach, ktoré je možné zobrazit' buď ako samotné hodnoty, alebo vo forme izokontúr. V tomto prípade sa použila lineárna interpolácia medzi susednými bodmi pre vytváranie máp. Tvar budovy je rozvinutý do 2D obrázka ako aj spôsob jeho rozvinutia. Taktiež sa z množstva dát, ktoré boli namerané pre viacero rýchlostí (18Hz = 7,5m/s, 24Hz=10,8m/s a 26Hz=11,2m/s) vždy aspoň v dvoch opakovaniach, zobrali priemerné hodnoty. Tie boli ďalej upravované podľa smerovosti a taktiež sa zarátavali interné tlaky.



Obr. 18: Tlaky na fasáde pre smer 0 pri zarátaní vnútorného tlaku 0,2

Na jednotlivých plochách podľa priradenej schémy sa na fasáde nachádzajú oblasti s maximálnym tlakom a maximálnym saním. Na zaoblených hranách budovy vznikajú veľké sania a v čelnej časti pri náraze vetra vznikajú vysoké tlaky. Tieto hodnoty z experimentov sú upravované ako so smerovosťou, tak aj so započítaním interných tlakov podľa normy EN.



Obr. 19: Tlaky na fasáde pre smer 0 pri zarátaní vnútorného tlaku -0,3

8. Záver

Záver obsahuje porovnanie odchýliek hodnôt nameraných experimentom (bez úpravy so zarátavaním smerovosti a interných tlakov) a získaných simuláciou v softvéri OpenFOAM pre $k-\varepsilon$ turbulentný model pre maximálne hodnoty z rozhodujúcich smerov získaných z experimentu.

Z tabuľky vidieť, že odchýlky sú pomerne veľké. Vznikajú omnoho menšie odchýlky pri saní, pričom dostupná literatúra zvyčajne uvádza, že použitý model $k-\varepsilon$ má väčšinou problémy s nepresnosťou pri záporných hodnotách tlakov (saniach).

V tomto prípade sa to nepotvrdilo. Vidíme veľký rozdiel tlakov a saní v najnižšej meranej hladine 30m, kde sanie pre experiment a simuláciu vyšlo s najmenším rozdielom, no tlak sa odlišoval až viac ako 60%. V najvyššej meranej hladine sa rozdiel zase zmenšil oproti strednej úrovni B.

	Experiment		Simulácia Max. tlak a sanie	Percentuálny rozdiel
	Max.hodnoty	smier		
ÚROVEŇ A – výška 90m				
Extrém	1487,08	90 stupňov	2135,19	30,35
	-2235,06	90 stupňov	-1993,1428	10,82
ÚROVEŇ B – výška 60m				
Extrém	1034,04	75 stupňov	1880,196	45,01
	-2492,77	90 stupňov	-2979,5027	19,526
ÚROVEŇ C – výška 30m				
Extrém	863,54	90 stupňov	1432,24	65,85
	-1935,71	90 stupňov	-2089,05	7,92

Tab. 2: Porovnanie simulácie s experimentom pre rovnaký smer pôsobenia vetra

Predpokladom pre takéto veľké rozdiely v tlaku je to, že simulovaná medzná vrstva v OpenFOAME bola braná z Eurokódu a bola použitá kategória terénu III. V experimente je simulovaná vrstva medzi III. a IV.

Tieto výsledky potvrdzujú nutnosť overovania si vypočítaných hodnôt zo simulácie a porovnávať ich s experimentom. Pri nezhode je teda nutné analyzovať možnosti vzniknutých chýb. Túto odchýlku, ktorá vznikla pre daný model, môžeme rozanalyzovať a zhrnúť do viacerých nasledujúcich bodov:

- Vhodnosť použitia turbulentného modelu je nutné zväziť z hľadiska možnosti využitia CPU počítača, ako aj z hľadiska nasimulovania skutočných podmienok.
- Dôležitosť okolitých objektov, ktoré môžu v určitých prípadoch značne ovplyvniť obtekanie v okolí fasády budovy.
- Ďalším dôležitým faktorom môže byť zarátanie smerovosti ako aj vnútorných tlakov alebo saní.
- Detailnosť fasády a fasádnych prvkov môže sčasti taktiež ovplyvniť výsledky.
- Výsledky môžu byť skreslené nedostatočnou jemnosťou siete, prípadne nevhodným namodelovaním okrajových podmienok t.j. dodržanie homogénosti ABL v celej dĺžke domény je takmer nemožné.
- Pri simulácii bol profil porovnávaný s Eurokódom pre terén kategórie III., no v tuneli BLWT STU je momentálne terén kategórie medzi III. a IV., čo môže spôsobiť pomerne veľký rozdiel hodnôt v nižších vrstvách atmosférickej medznej vrstvy.
- Dôležitá je taktiež podrobná analýza veľkého množstva dát získavaných vo veternom tuneli. Dôležitosť ich podrobnej analýzy a to predovšetkým odchýlok stredných hodnôt, prenosové funkcie ako aj ich autokorelačné funkcie.

Odporúčanie pre ďalší rozvoj v tejto problematike je využitie možností modelu LES, prípadne iných viac-rovnícových RANS turbulentných modelov, ktoré by podstatu

prúdenia mohli opísať presnejšie. Taktiež je dôležité sa podrobnejšie venovať analýze dôvodu veľkých odchýlok priemerných hodnôt z meraní vo veternom tuneli pre rôzne rýchlosti, vytvoriť určitý koncept počtu meraní a podrobnejšie analyzovať výsledky experimentov z hľadiska signálnej analýzy.

Hlavným zistením práce je, že hoci simulačný model $k-\varepsilon$ pri daných nastaveniach nepostačoval na presný opis a nezhodoval sa s experimentom, vďaka možnosti vizualizácie dáva skvelú možnosť v návrhovej fáze získať obraz o prúdení v okolí objektu. To môže slúžiť napr. na vhodné umiestnenie tlakových odberov pre experiment, získanie obrazu o možnosti zjednodušenia modelu, či definovať dôležitosť vplyvu okolitých objektov.

Summary

The aim of this dissertation thesis was to gain knowledge of wind engineering, ascertain the current state of the problem and build on current trends. The main part was make a simulation using CFD (Computational Fluid Dynamics) with the chosen software and the verification of these results according to applicable standards or known experiments.

To achieve the proper results, at the beginning there was used the theoretical knowledge, which formed the basis for an overview of the status issue. Besides the study it was extremely useful to attend for six months the university University degli Studi di Firenze in Florence under the guidance of prof. Claudia Borriho and prof. Gianni Bartoli, where evidence was collected from measurements in the wind tunnel and signal analysis.

An important part of this work was paying attention to the specific simulation software, especially software OpenFOAM and Ansys, which were also used at work. Detailed studying turbulent model was necessary to choose the most suitable type of model for the simulation of flow around structures. For several reasons, such as the complexity of the model, the accuracy of the model and others, was eventually chosen turbulence model k , which is the most widely used models of different authors in wind engineering, although not very strongly to the fore LES model. This model has been more difficult and requires a much better technical equipment for computer simulation.

Particular attention was also paid to the experimental evidence, since the measuring instruments to the very experiments in the wind tunnel. Experiments were performed as in a tunnel BLWT STU, as well as wind tunnel in Prato-Florence in Italy. Experiments were also sequentially compared with the available literature or Eurocodes. Different from a cylindrical shape, a semi-cylinder, or cube, which were actions covered knowledge and practical experience in the next phase of experimentally verified and prepared the construction of tall buildings in Bratislava in 1: 300.

The final part of this work was to compare the results of the experiment and the simulation for high-rise buildings where there were found some disagreement between the simulation and experiment.

The results of this dissertation describes in detail the possibility of modeling using simulation programs, their use in the field of construction and architecture, as well as the possibility of using experimental methods.

Comparing the results for the high-rise building in Bratislava it has been found that a very important factor is the method of analysis of data from an experiment, a well-defined points of delivery and the set of measuring instruments. They were also found certain discrepancies used turbulent model that consistently not copy turbulent flow around the building and thus the value of simulation and experiment differed.

Recommendations for further development on this issue is to use the possibilities of LES model, or other multi-turbulent RANS models that can describe the nature of the flow precisely. Also, further to the analysis result of major deviations from the mean values measured in the wind tunnel for different speeds it is necessary to create a concept of the number of measurements and fuller analysis of the experimental results in terms of signal analysis.

The main finding of the paper is that although simulation model $k-\epsilon$ under the current settings do not satisfy the precise description and disagreements with the experiment, through visualization options give a great opportunity in the design phase to obtain a picture of the flow in the area. This could serve, for instance, a suitable location for sampling the pressure experiment, informing about possibility of simplifying the model and define the importance of the influence of surrounding objects.

Since this research area is progressing very quickly, it is necessary to follow current trends and to establish connections with mathematics and physics in Slovakia and abroad, specifically dealing with fluid flow and experiments for obtaining the most accurate values from simulations and experiments, thereby enabling development wind tunnel BLWT STU in Bratislava.

Prehľad publikácií autora¹

▪ ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

MAGÁT, Marek - OLEKŠÁKOVÁ, Ivana - ŽILINSKÝ, Juraj. Development of Boundary Layer in CRIACIV in Florence (Prato) and Comparison with CFD. In *Applied Mechanics and Materials: Advanced Architectural Design and Construction*. Vol. 820, (2016), s. 359-364. ISSN 1660-9336.

OLEKŠÁKOVÁ, Ivana - MAGÁT, Marek. Influence of the Wind in Passages. In *Applied Mechanics and Materials: Advanced Architectural Design and Construction*. Vol. 820, (2016), s. 365-370. ISSN 1660-9336.

¹ Kompletný zoznam publikácií autora počas PhD. štúdia je uvedený v dizertačnej práci.

OLEKŠÁKOVÁ, Ivana - HUBOVÁ, Oľga - KONEČNÁ, Lenka. Influence of Nearby Structure on the Wind Flow around the Cube Structure. In *Roczniki inżynierii budowlanej. Zesz.* 15, (2015), s. 29-35. ISSN 1505-8425.

■ **AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách**

OLEKŠÁKOVÁ, Ivana - HUBOVÁ, Oľga. Effect of the Wind on Circular Cylinder. In *ATF 2013 [elektronický zdroj] : 2nd Conference on Acoustics, Light and Thermal Physics in Architecture and Building Structures. Book of proceedings. Leuven, Belgium 2.-3.5.2013.* Leuven : Katholieke Universiteit Leuven, 2013, s.CD-ROM, p.99-103. ISBN 978-90-8649-637-2.

OLEKŠÁKOVÁ, Ivana - HUBOVÁ, Oľga. CFD Simulations for Obtaining Pressure Coefficient on Structures. In *14th International Scientific Conference VSU/2014. Volume II. : Proceedings. Sofia, Bulgaria, 5. - 6. 6. 2014.* Sofia : University of Structural Engineering and Architecture "L.Karavelov", 2014, P. 119-124. ISSN 1314-071X.

OLEKŠÁKOVÁ, Ivana - MAGÁT, Marek. CFD Simulations for Evaluation of Pedestrian Comfort. In *ATF 2014 [elektronický zdroj] : e-book of reviewed papers. 3rd Conference on Building Physics and Applied Technology in Architecture and Building Structures, Vienna, Austria, 6. - 7. 5. 2014.* 1. vyd. Viedeň : TGM - Federal Institute of Technology, 2014, CD-ROM, s. 104-109. ISBN 978-3-200-03644-4.

■ **AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách**

HUBOVÁ, Oľga - KONEČNÁ, Lenka - OLEKŠÁKOVÁ, Ivana. Experimentálne a numerické stanovenie rozloženia tlaku vetra na objekte v tvare štvrtkruhu. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : proceedings of 12th International Conference. Bratislava, SR, 16. - 17. 10. 2014.* 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014, CD ROM, [7] s. ISBN 978-80-227-4259-7.

HUBOVÁ, Oľga - KONEČNÁ, Lenka - OLEKŠÁKOVÁ, Ivana. Experimental and Numerical Determination of Wind Pressure Distribution on an Object with Atypical Form. In *Applied Mechanics and Materials : Trends in Statics and Dynamic of Construction - selected, peer reviewed papers from the 12th International Conference, Bratislava, SR, 16. - 17. 10. 2014.* Vol. 769, (2015), s. 185-191. ISSN 1660-9336.

MAGÁT, Marek - OLEKŠÁKOVÁ, Ivana - ŽILINSKÝ, Juraj. Development of the boundary layer in the rear section in BLWT STU - Trnávka. In *Advanced Materials Research : Advanced Building Construction and Materials 2013*

OLEKŠÁKOVÁ, Ivana - MAGÁT, Marek. Modeling of 2D circular cylinder in ANSYS by using turbulence models. The experiment preparation. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings : proceedings of 11th International Conference. Bratislava, SR, 3. - 4. 10. 2013.* 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology, 2013, s.157-160. ISBN 978-80-227-4040-1

OLEKŠÁKOVÁ, Ivana. Modeling of Atmospheric Boundary Layer with CFD. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 23rd Annual PhD student conference. Bratislava, SR, 30. 10. 2013.* Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2013, s.CD-ROM, p.126-131. ISBN 978-80-227-4102-6.

OLEKŠÁKOVÁ, Ivana. Pressure coefficient on circular cylinder from Eurocode and CFD. In *Advances in architectural, civil and environmental engineering [elektronický zdroj] : 24rd Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics.* 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2014, CD-ROM, s. 118-123. ISBN 978-80-227-4301-3.

■ **BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)**

HUBOVÁ, Oľga - OLEKŠÁKOVÁ, Ivana. Wind Effects on Circular Cylinders. In *13th International scientific conference VSU/2013. Volume 1 : Proceedings. Sofia, Bulgaria, 6.-7.6.2013.* Sofia : L.Karavelov Civil engineering higher school Sofia, 2013, s.286-291.

OLEKŠÁKOVÁ, Ivana - HUBOVÁ, Oľga. Comparison of Various Turbulence Models. In 13th International scientific conference VSU' 2013. Volume 1 : Proceedings. Sofia, Bulgaria, 6.-7.6.2013. Sofia : L.Karavelov Civil engineering higher school Sofia, 2013, s.145-149

Literatúra²

- [1] G. TRYGGVASON, „Computational Fluid Dynamics: Classical Turbulence Modeling,“ Fall 2011. [Online]. Available: <http://www3.nd.edu/~gtryggva/Turbulence-Intro.pdf>. [Cit. 15 January 2014].
- [2] A. L. BRAUN a A. M. AWRUCH, „Aerodynamics Analysis of Buildings Using Numerical Tools from Computational Wind Engineering,“ *Mecánica Computacional*, zv. XXVI, pp. 1236-1251, October 2007.
- [3] A. BAKKER, „Applied Computational Fluid Dynamics, Lecture 1 - Introduction to CFD,“ 2006. [Online]. Available: <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/01-intro.pdf>. [Cit. 26 5 2015].
- [4] S. FIELDING, „The basic equations of fluid dynamics,“ Durham University, October 2013. [Online]. Available: <http://www.dur.ac.uk/suzanne.fielding/teaching/BLT/sec1.pdf>. [Cit. 10 January 2014].
- [5] G. BAR-MEIR, „Basics of Fluid Mechanics,“ 17 March 2013. [Online]. Available: <http://www.potto.org/downloads.php>. [Cit. 11 December 2013].
- [6] L. BARBA, „Computational Fluid Dynamics (Lecture "zero") electronic lectures from www.youtube.com,“ Boston, 2012.
- [7] R. K. BANSAL, A Textbook of Fluid Mechanics, 1. ed., Boston: Laxmi publications LTD., 2008.
- [8] A. DE SOUZA, „How to Understand Computational Fluid Dynamics,Jargon,“ NAFEMS Ltd, 2005.
- [9] P. K. KUNDU a I. M. COHEN, Fluid Mechanics, second edition ed., San Diego, California: Elsevier, 2002.
- [10] F. A. MORRISON, An Introduction to Fluid Mechanics, New York: Cambridge, 2013.
- [11] J. H. SPURK, Fluid Mechanics: Problems and Solutions, Springer, 1997, p. 605.
- [12] A. BAKKER, „Computational Fluid Dynamics,“ 3 February 2008. [Online]. Available: <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/>. [Cit. 20 January 2014].
- [13] E. FURBO, „Evaluation of RANS turbulence models for flow problems with significant impact of boundary layers,“ UPPSALA Universitet, Uppsala, 2010.
- [14] J. E. CERMAK, „Wind Tunnel Design for Physical Modeling of Atmospheric Boundary Layers,“ *J.Eng.Mech.*, 1981.
- [15] G. IACCARINO, „Simulation of Turbulent Flows, Lecture from Stanford University,“ Stanford University, Spring 2004. [Online]. Available: <http://www.stanford.edu/class/me469b/handouts/turbulence.pdf>. [Cit. 13 January 2014].
- [16] A. KAREEM, Advanced Structural Wind Engineering, Springer, 2013.
- [17] D. WILCOX, Turbulence Modeling for CFD, La Canada, California: DCW Industries, Inc., 1998.

² Komplettný zoznam citovanej literatúry sa nachádza v dizertačnej práci.

- [18] ANSYS, „Fluids analysis guide,“ 2010.
- [19] D. M. HARGREAVES a N. G. WRIGHT, „On the use of the k- ϵ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer,“ *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, zv. 95, %1. vyd.5, pp. 355-369, May 2007.
- [20] M. BALOGH, A. PARENTE a C. BENOCCI, „RANS simulation of ABL flow over complex terrains applying and Enhanced k- ϵ model and wall function,“ *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Zv. %1 z %2104-106, pp. 360-368, May-July 2012.
- [21] B. BLOCKEN, T. STATHOPOULOS a J. CARMELIET, „CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems,“ *Atmospheric Environment*, zv. 41, pp. 238-252, 15 August 2006.
- [22] B. BLOCKEN a T. STATHOPOULOS, „CFD simulation of pedestrian-level wind conditions around buildings: past achievements and prospects,“ Eidhoven, 2012.
- [23] P. J. RICHARDS, R. P. HOXEY a L. J. SHORT, „Wind pressures on a 6m cube,“ *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, zv. 89, pp. 1553-1564, 2001.
- [24] P. RICHARDS a R. P. HOXEY, „Quasi-steady theory and point pressures on a cubic building,“ *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, zv. 92, pp. 1173-1190, 2004.
- [25] P. J. RICHARDS, R. P. HOXEY, B. D. CONNELL a D. P. LANDER, „Wind tunnel modeling of the Silsoe Cube,“ *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 1384-1399, October 2007.
- [26] R. SCANLAN, „Aeroelastic Modeling of Bridges,“ *Wind Tunnel Modeling for Civil Engineering Applications*, pp. 440-456, 1982.
- [27] J. E. CERMAK, J. E. DAVENPORT, F. H. DURGIN, P. A. IRWIN, N. ISYUMOV, J. A. PETERKA, S. R. RAMSAY, T. A. REINHOLD, R. H. SCANLAN, T. STRATHOPOULOS, A. C. STECKLEY, H. TIELEMAN a P. J. VICKERY, „Wind tunnel studies of buildings and structures,“ *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice*, 1999.

Granty:

Predložené výsledky boli dosiahnuté vďaka podpore Grantovej agentúry Slovenskej republiky - VEGA (grant. reg. č. 1/0480/13) ako aj grantu v rámci projektu *Program na podporu mladých výskumných pracovníkov* Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Citovanie práce:

OLEKŠÁKOVÁ Ivana: *Analýza účinkov vetra a modelové skúšky vo veternom tuneli BLWT STU*, Dizertačná práca. Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra stavebnej mechaniky, Bratislava, 2016, 143 strán