

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
STAVEBNÁ FAKULTA

Ing. Soňa Medvecká

Autoreferát dizertačnej práce

EXPERIMENTÁLNA A NUMERICKÁ ANALÝZA
SÚČiniteľa VONKAJŠIEHO TLAKU
NA VÝŠKOVÉ BUDOVY

Na získanie akademického titulu philosophiae doctor – PhD.
v doktorandskom študijnom programe: 5.1.7. aplikovaná mechanika.

Bratislava, 2018

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre stavebnej mechaniky, Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

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

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

Oponenti: **Prof. Ing. Jozef Melcer DrSc.**
Katedra stavebnej mechaniky a aplikovanej matematiky,
Stavebná fakulta ŽU v Žiline
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina

Doc. Ing. Eva Kormaníková, PhD.
Ústav inžinierskeho staviteľstva,
Stavebná fakulta TU v Košiciach
Vysokoškolská 4, 042 00 Košice

Ing. Vladimíra Michalcová, PhD.
Katedra stavebnej mechaniky
Stavebná fakulta, VŠB v Ostrave
L. Poděštné 1875/17, Ostrava – Poruba

Autoreferát bol rozoslaný:

**Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňaohod.
na Katedre stavebnej mechaniky Stavebnej fakulty STU v Bratislave.**

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

Obsah

1 Úvod	2
2 Ciele záverečnej práce	3
3 Metodika práce	4
4 História a súčasný stav riešenej problematiky	4
5 Základné teoretické princípy prúdenia.....	5
6 Experimentálne meranie a pracovný postup pri jednotlivých metódach skúmania ..	7
7 Porovnanie súčiniteľov vonkajšieho tlaku c_{pe} pre valec	9
8 Porovnanie experimentu a EN pre objekt atypického pôdorysu.....	11
9 Vzájomné pôsobenie výškových budov	12
10 Záver.....	14
11 Zoznam použitej literatúry	18
12 Publikačná činnosť autora	19

1 Úvod

Vietor je termín používaný pre pohyb vzduchu a zvyčajne sa používa pre prirodzený horizontálny pohyb atmosféry. Jeho účinky je pomerne ťažko charakterizovať, pretože nie je konštantný v čase, výške a nie je rovnaký ani na náveternej ani na záveternej strane skúmaného objektu. Pri pôsobení vetra na budovu existuje viacero možností obtekania okolo nej, pričom vznikajú nasledujúce silové účinky: tlak, sanie, vztlak a klopiace účinky. Pri návrhu budovy od zaťaženia vetrom postupujeme v súčasnosti v zmysle európskej normy (Eurokódu 1 – Časť 1-4), v ktorej sa nachádzajú hodnoty súčiniteľov vonkajšieho tlaku pre objekty s pravouhlým pôdorysom a tiež tvaru valca. Boli stanovené z experimentálnych a empirických postupov (do určitej výšky a rozpätia) ako obálka extrémnych hodnôt.

Experimentálne meranie vo veternom tuneli, počítačová simulácia na princípe FEM alebo meranie in situ sú pri budovách s atypickým pôdorysom jediným schodným postupom, nakoľko táto problematika nie je normovo obsiahnutá ani zadefinovaná.

Faktorom, ktorý zásadne vplýva na silové pôsobenie vetra na budovu, je okolitá zástavba s prihliadnutím na rozloženie okolitých objektov, a typ terénu. To je v súčasnosti aj trendom pri experimentálnom overovaní, či už numerickým postupom alebo pomocou BLW tunelov.

Ťažiskom práce je analýza distribúcie tlakov vetra prostredníctvom súčiniteľa vonkajšieho tlaku pre objekty valca a budovu s atypickým pôdorysom v tvare „S“ ako samostatne stojaceho objektu a pri ich vzájomnom pôsobení. Výsledkom je vyhodnotenie hodnôt získaných z experimentálnych meraní s hodnotami z počítačovej simulácie a Eurokódom.

2 Ciele záverečnej práce

Ciele dizertačnej práce môžeme rozdeliť do týchto bodov:

- Získanie teoretické znalosti v oblasti veterného inžinierstva.
- Experimentálne meranie v BLWT a analýza otekania pre valec a porovnanie súčiniteľov vonkajšieho tlaku s hodnotami v Eurokóde.
- Kalibrácia valca v simulačnom programe Ansys Fluent s experimentom a finálne vyhodnotenie hodnôt súčiniteľov vonkajšieho tlaku pre valec.
- Analýza otekania vetra pri objekte s atypickým pôdorysom (Esíčkom) pomocou experimentu vo veternom tuneli a simuláciu CFD.
- Porovnanie súčiniteľov vonkajšieho tlaku pre „esíčko“.
- Posúdenie vplyvu susediaceho objektu na účinky vetra experimentálnym meraním, CFD simuláciou a následným porovnaním hodnôt.
- Vyhodnotenie a stanovenie extrémnych hodnôt súčiniteľa vonkajšieho tlaku pre valec a „esíčko“.

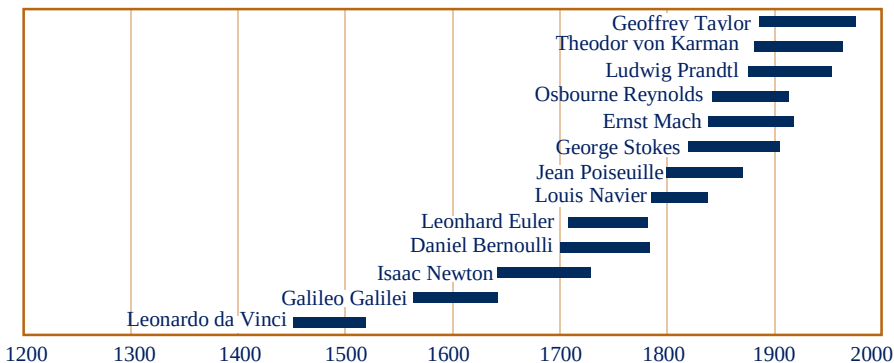
3 Metodika práce

Pri vypracovaní predkladanej dizertačnej práce bola použitá nasledovná metodika:

- Získanie teoretických poznatkov z oblasti prúdenia tekutín z dostupnej literatúry, pričom dbať na jej aktuálnosť.
- Experimentálne merania súčiniteľov vonkajšieho tlaku c_{pe} na valci a porovnanie s Eurokódom, ktoré slúži na oboznámenie sa s veterným tunelom a meracou technikou.
- Experimentálne meranie súčiniteľov vonkajšieho tlaku c_{pe} pre objekt atypického pôdorysu.
- Experimentálne meranie súčiniteľov vonkajšieho tlaku c_{pe} pre dva susediace objekty a určenie ich vzájomného vplyvu na tieto hodnoty.
- Overenie hodnôt súčiniteľov vonkajšieho tlaku c_{pe} pomocou simulácie v programe Ansys Fluent pre všetky zrealizované experimenty
- Analýza získaných výsledkov.

4 História a súčasný stav riešenej problematiky

Veterné inžinierstvo a charakteristika správania vetra sa posunuli z relatívne jednoduchých, priamočiarych postupov stanovenia silových účinkov smerom k sofistikovanejšiemu modelom, ktoré v sebe komplexne zahŕňajú aj klimatické,



Obr. 4.1 – Časová línia najvýznamnejších predstaviteľov z mechaniky tekutín

meteorologické účinky (so zreteľom na spoľahlivosť). Na obr. 4.1 je časová línia najvýznamnejších osobností, ktoré ovplyvnili vedný odbor mechaniky tekutín.

V našich podmienkach sú práce venované aerodynamike budov a analýze vetra sústredené najmä okolo experimentálnych meraní vo veternom tuneli Slovenskej technickej univerzity s medznou vrstvou, nachádzajúci sa v Centrálnych laboratóriách Stavebnej fakulty v Bratislave-Trnávke. Skúšobná prevádzka začala v roku 2012. S týmto veterným tunelom sú späté aj práce tímu okolo doc. Hubovej (Lobotka, Bujdáková Konečná, Olekšáková a iné).

V súčasnosti prebiehajú experimentálne merania a analýza účinkov vetra pre pripravované developerské projekty (výškové budovy a mrakodrapy), ktoré sa budú nachádzať v Bratislave. Aj naďalej očakávame stúpajúci záujem o experimentálne merania v aerodynamickom tuneli pri významných stavbách, čo optimalizuje celkový návrh zaťaženia od vetra ako aj umiestnenie budovy v rámci aglomerácií (okolitej zástavbe).

5 Základné teoretické princípy prúdenia

Vzhľadom k veľmi rozsiahlej tematike je hlavným zámerom tejto kapitoly pochopenie elementárnych fyzikálnych dejov pomocou numerických riešení (rovníc) pri prúde vetra.

Rovnováha síl pri prúde reálnej tekutiny je vyjadrená Navier-Stokesovými rovnicami pre Newtonové tekutiny, vyjadrujúcimi vzťah, kedy zotrvačná sila je rovná súčtu hmotnostnej, tlakovej a trecej sily. Rozdiel oproti Eulerovskej rovnici, ktorá popisuje prúde ideálnej tekutiny, je zahrnutie trecej sily. Trecie sily sú zapríčinené viskozitou tekutiny. Navier-Stokesové rovnice majú nasledujúce vyjadrenie:

$$\text{Pre smer } x: \quad \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5.1)$$

$$\text{Pre smer } y: \quad \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5.2)$$

$$\text{Pre smer } z: \quad \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5.3)$$

Vo vektorom zápise sa vyjadrujú pomocou operátora nabla ∇ , ktorého definícia je zapísaná pomocou Laplaceovho operátora Δ nasledovne:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \Delta \quad (5.4)$$

Navier-stokesove rovnice vo vektorom zápise:

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} \right) = p \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (5.5)$$

Tieto nelineárne parciálne diferenciálne rovnice nie sú vo všeobecnosti riešiteľné. Pri jednoduchších prípadoch laminárneho prúdenia sa používa analytické riešenie. V súčasnosti sú rovnice riešené numerickými metódami (metóda konečných objemov a metóda konečných prvkov), pričom pomocou týchto metód môžeme riešiť i zložité prípady prúdenia.

V mechanike tekutín sú definované základne typy prúdenia reálnej tekutiny:

- Laminárne prúdenie – vrstvy tekutiny sa pohybujú hladko a pravidelne sa posúvajú pozdĺž susediacich vrstiev rovnobežne so smerom prúdu. Jednotlivé vrstvy sa vzájomne nepremiešavajú, pričom ich prúdnice majú formu hladkých spojitých kriviek. Rýchlosť je funkcia súradníc x, y, z a času t , difúzia je zanedbateľná a straty disipácie (strata časti energie nezvratnou premenou) sú malé.
- Turbulentné prúdenie – ide o veľmi komplikovaný fyzikálny jav. Je charakterizovaný ako trojrozmerný časovo závislý pohyb, pri ktorom rozpínajúce sa vírenie spôsobuje kolísanie rýchlosti, šíriace sa do všetkých vlnových dĺžok medzi minimálnou hodnotou determinovanou viskóznymi silami a maximálnou hodnotou determinovanou hraničnými podmienkami prúdu. Rýchlosť je náhodná funkcia súradníc x, y, z a času t , difúzia a straty disipácie sú oveľa väčšie.
- Prechodné prúdenie – je prechodové prúdenie medzi laminárnym a turbulentným, nakoľko k tejto zmene prúdenia nedochádza okamžite.

Britský vedec a matematik O. Reynolds ako prvý rozlíšil a klasifikoval prúdenie tekutiny pomocou jednoduchého experimentu, pri ktorom vstrekol farbivo do

potrubia s vodou pomocou sklenenej trubky. Reynoldsovo číslo je relevantným ukazovateľom pri prúde tekutín a medzi prvé kroky pri výpočtoch spadá jeho matematické vyjadrenie.

6 Experimentálne meranie a pracovný postup pri jednotlivých metódach skúmania

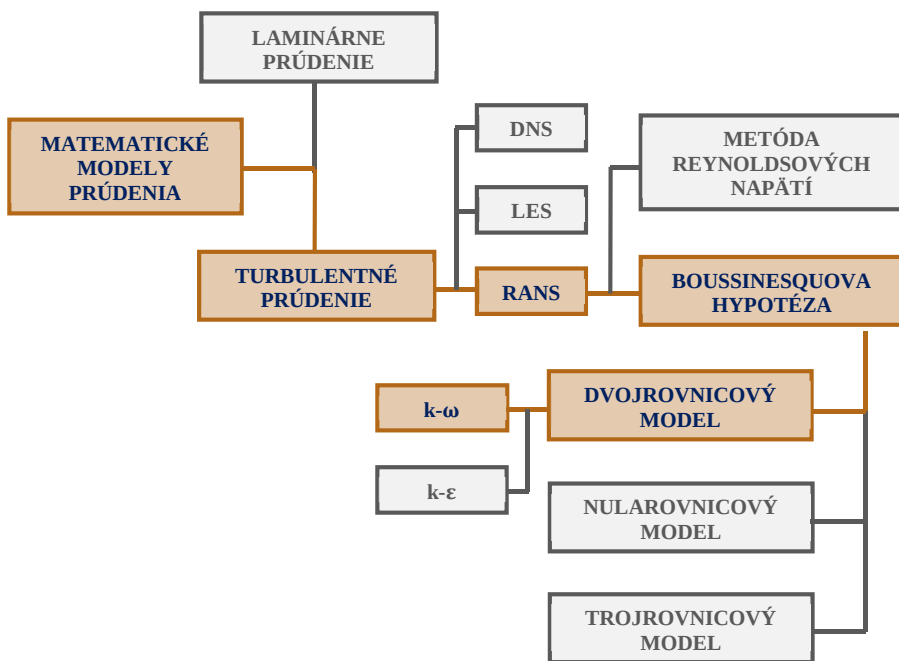
Realizácia experimentálnych meraní prebiehala v laboratóriách Stavebnej fakulty nachádzajúcich sa v Trnávke v Bratislave, ktorých súčasťou je nízkorýchlostný veterný tunel so simulovanou atmosférickou vrstvou, ďalej BLWT (obr. 6.1). Do prevádzky bol uvedený v roku 2012.



Obr. 6.1 – a) Pohľad na BLWT, b) Interiér tunelu – medzná vrstva

V dizertačnej práci sme použili pri simuláciách všetkých experimentov metódu RANS. V prostredí Fluent bol zvolený turbulentný model SST $k - \omega$ (Shear Stress Transport), založený na Boussinesquovej hypotéze turbulentnej viskozity za pomoci dvojrovnícového modelu diferenciálnych rovníc. Turbulentný model SST $k - \omega$ je vyjadrený strednou rýchlosťou vetra $v_m(z)$ a nasledujúcimi vzťahmi na výpočet turbulentnej kinetickej energie $k(z)$, rýchlosti disipácie turbulentnej kinetickej energie $\varepsilon(z)$ a špecifickej disipácie turbulentnej kinetickej energie $\omega(z)$. Exaktné opísanie ABL v simulácií, a tým podobnosť nabiehajúceho prúdenia vetra, sme zabezpečili prostredníctvom okrajovej podmienky pri vstupe do výpočtovej oblasti (INLET) a drsnosťou poľa (terénu). Pri vstupe a tiež vo vnútri výpočtovej oblasti, sme použili turbulentný model SST $k - \omega$, vyjadrený logaritmickým priebehom zvislého rýchlostného profilu a turbulencie vetra pre tieto oblasti. Pri výstupe

z výpočtovej oblasti sme použili okrajovú podmienku OUTFLOW. Podmienku symetrie sme využili pri bočných stenách a hornej stene. Na hranách modelu a spodnej steny sme použili okrajovú podmienku WALL. V druhom kroku sme určili drsnosť pri spodnom povrchu vo výpočtovej oblasti, kde základnou charakteristikou je určenie skutočnej výšky drsnosti.



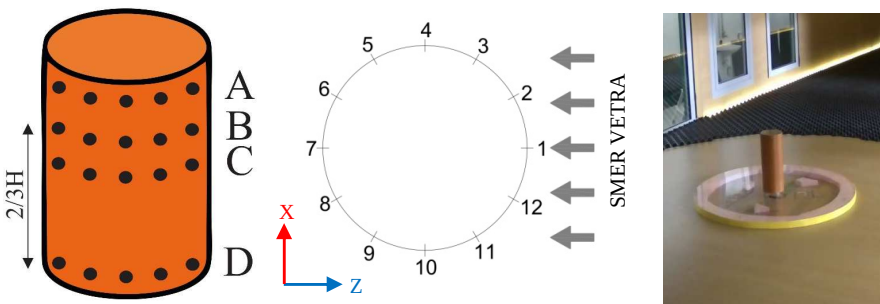
Obr. 6.2 - Schéma výberu metód riešenia prúdenia

7 Porovnanie súčiniteľov vonkajšieho tlaku c_{pe} pre valec

V Eurokóde sa nachádza postup pre zaťaženie vetrom len pre objekty pravouhlého pôdorysu a v tvare valca. Preto sme najprv našu metodiku overili na objekte tvaru valca. Porovnali sme súčiniteľ vonkajšieho tlaku c_{pe} získaný:

- z experimentálneho merania,
- počítačovej simulácie CFD,
- výpočtom podľa postupu uvedeného v Eurokóde.

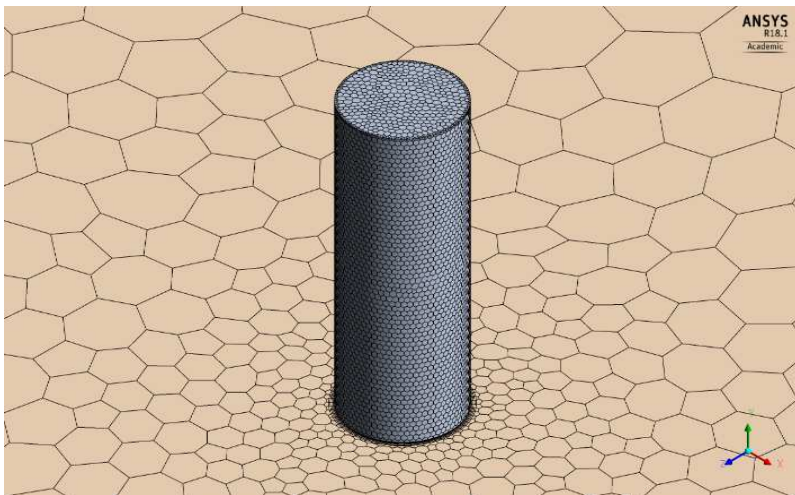
Rozmerové charakteristiky modelu valca boli výška 0,30 m a priemer 0,11 m (obr. 7.1), čo zodpovedá pri mierke 1:350 budove s výškou 105 m a priemerom 40 m. Výšku objektu sme zvolili s prihliadnutím na aktuálne výškové budovy nachádzajúce sa v Bratislave. Na základe rozmerových charakteristík sme vyjadrili pre model Reynoldsové číslo a jeho hodnota po vyčíslení je 1×10^5 .



Obr. 7.1 - Model a schéma umiestnenia tlakových senzorov

Experiment bol realizovaný v zadnom priestore s turbulentným prúdením, kde referenčná rýchlosť v_{ref} bola 11,53 m/s (24 Hz). Pomocou 12 tlakových skenerov sme odmerali hodnoty tlakov pre štyri úrovne: pri hornom povrchu (A), v referenčnej výške (B), v strede (C) a pri dolnom povrchu (D), obr. 7.1. Z týchto tlakov sme následne vyjadrili súčiniteľa vonkajšieho tlaku c_{pe} . Tlak dosiahol maximálnu hodnotu 0,76 v bode 1 pri hornom okraji, naopak sanie bolo extrémne v bode 4 v referenčnej výške s hodnotou -0,95.

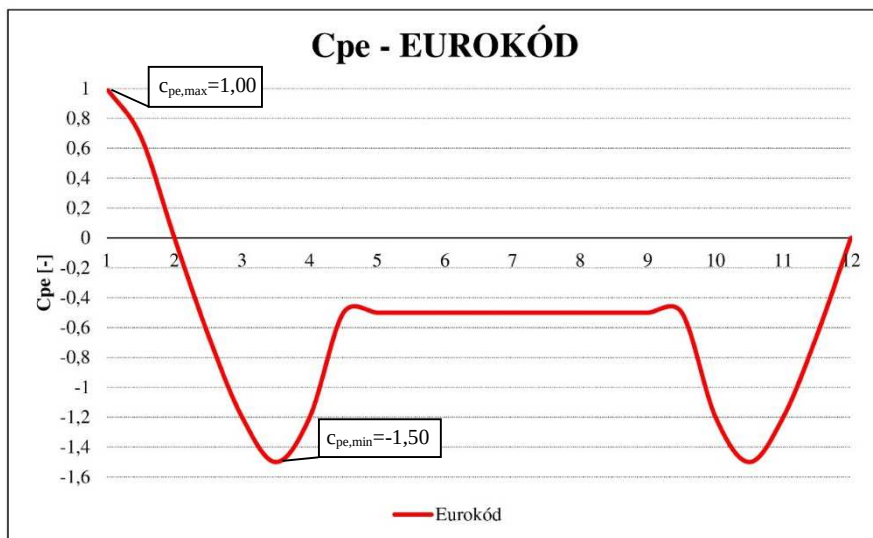
Pri CFD simulácií v programe ANSYS Fluent 18.2 vstupné hodnoty, ako rozmery objektu a charakteristiky veterného tunela, sme prevzali z experimentu. Metódu sieťovania sme zvolili Polyhedral, pričom bolo vygenerovaných 108 924 elementov s 40 489 uzlami, obr. 7.2.



Obr. 7.2 - Detailný pohľad na výpočtovú sieť

Z týchto výsledkov sme zaznamenali extrémnu hodnotu pre tlak 0,98 v bode 1 nachádzajúcom sa pri hornom okraji a pre sanie -1,50 v bode 4 situovanom v úrovni B. Extrémne sanie s hodnotou -2,02 na streche modelu sa nachádzalo mimo rozsah skúmaných bodov.

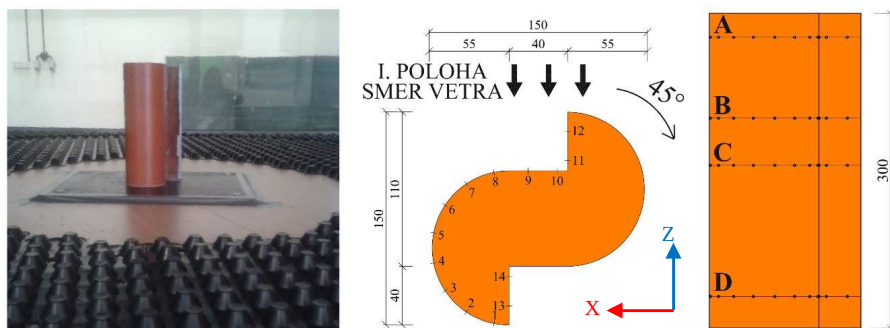
Postup na určenie súčiniteľa vonkajšieho tlaku c_{pe} pre objekt tvaru valca, ako aj jednotlivé kroky výpočtu sú opísané v Eurokóde. Na základe rozmerových charakteristík sme vyjadrili jeho hodnoty pre 12 bodov, ktoré sú znázornené v grafe 7.1 - po zohľadnení účinkov koncov a pre Re s hodnotou 1×10^7 . Minimálna hodnota c_{pe} je v norme stanovená -1,5 (sanie), ktorá sa nachádza medzi bodmi 3 a 4 (75°). Maximálna normová hodnota c_{pe} je 1,0 (tlak) pre bod 1.



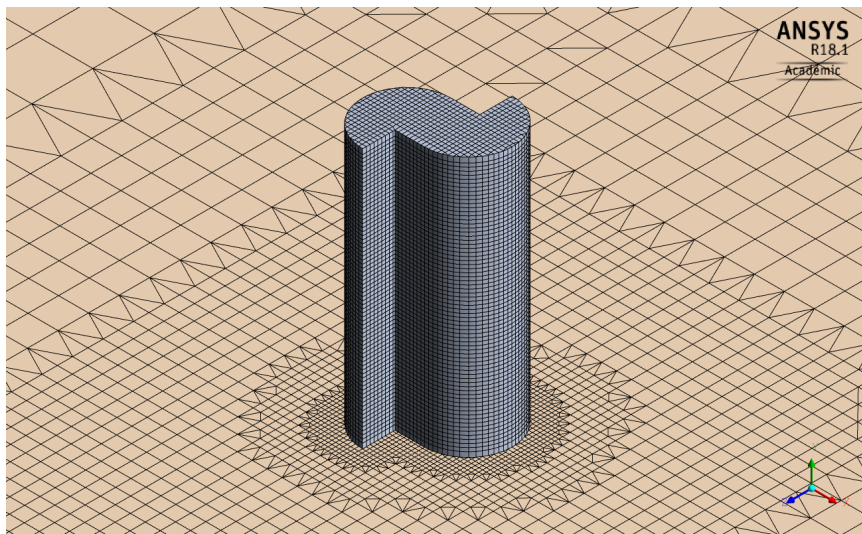
Graf 7.1 - Hodnoty súčiniteľa vonkajšieho tlaku c_{pe} podľa Eurokódu.

8 Porovnanie experimentu a EN pre objekt atypického pôdorysu

Postup pri experimentálnom meraní ako aj vyhodnocovanie boli totožné ako pri meraní valca v predchádzajúcej kapitole a bol realizovaný vo veternom tuneli (BWLТ). Model mal rozmerové charakteristiky podľa obr. 8.1. Pôdorysne mal rozmery 150x150 mm a výšku 300 mm. Účinky vetra sme snímali pomocou 14 senzorov nachádzajúcich sa v štyroch úrovniach: A (horný okraj), B (referenčná výška – 2/3H), C (stred) a D (dolný okraj). Experimentálne meranie sme realizovali v turbulentnom prúde v zadnom priestore veterného tunela pri referenčnej rýchlosti $v_{ref} = 13,54$ m/s (28 Hz). Prvá poloha experimentu bola podľa obr. 8.1, a potom sme model otočili vždy o 45°, teda spolu 8 meraní pre každú úroveň umiestnených senzorov. Pootočením sme boli schopní určiť jednotlivé hodnoty tlakov po celom obvode, aj keď senzory boli umiestnené iba na časti obvodu. Taktiež sme realizovali CFD simuláciu v programe ANSYS, obr. 8.2.



Obr. 8.1 – Rozmerové charakteristiky modelu



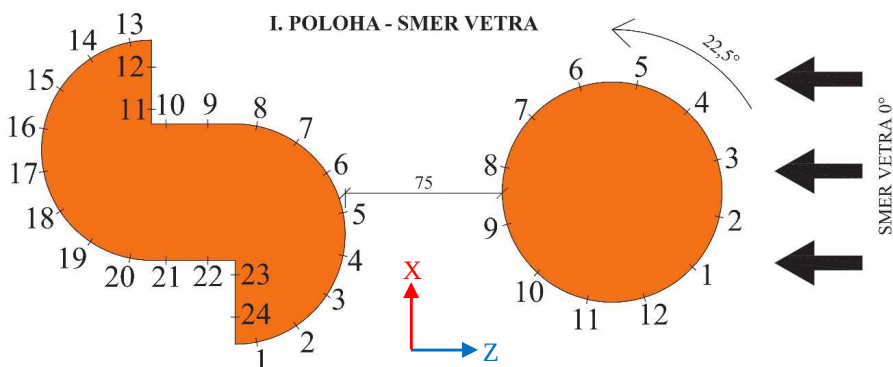
Obr. 8.2 - Pohľad na výpočtový model s jemnou hustotou výpočtovej siete

9 Vzájomné pôsobenie výškových budov

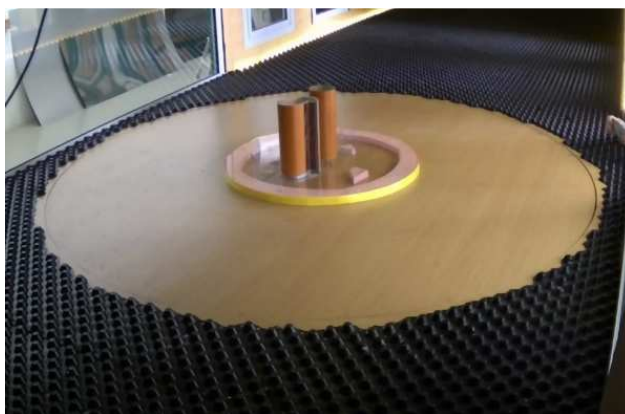
V záverečnom experimente sme preto skúmali vplyv vzájomného pôsobenia susediacich objektov na hodnotu súčiniteľa vonkajšieho tlaku c_{pe} , pričom boli použité objekty z predchádzajúcich kapitol – valec a „esičko“. Vzďialenosť medzi týmito budovami sme zvolili 25 m, čo predstavuje hodnotu nachádzajúcu sa napríklad v predpisoch (pokynoch) mesta Toronto pre návrh výškových budov.

Podobnú vzdialenosť uvádzajú vo svojich príručkách aj iné mestá ako napr. Croydon, Burlington a iné.

Metodika merania, vyhodnocovanie výsledkov a modelové charakteristiky boli zhodné s predchádzajúcimi experimentmi a realizovali sa vo veternom tuneli – BWLT. Východisková poloha umiestnenia modelov a snímačov je znázornená na obr. 9.1, 9.2. Model sme otočili vždy o $22,5^\circ$, tzn. spolu 16 zaznamenaných meraní pre každú úroveň umiestnených senzorov (pri hornom, dolnom povrchu, v referenčnej výške a v strede modelu). Referenčná rýchlosť turbulentného prúdenia bola $v_{ref} = 13,62 \text{ m/s}$.

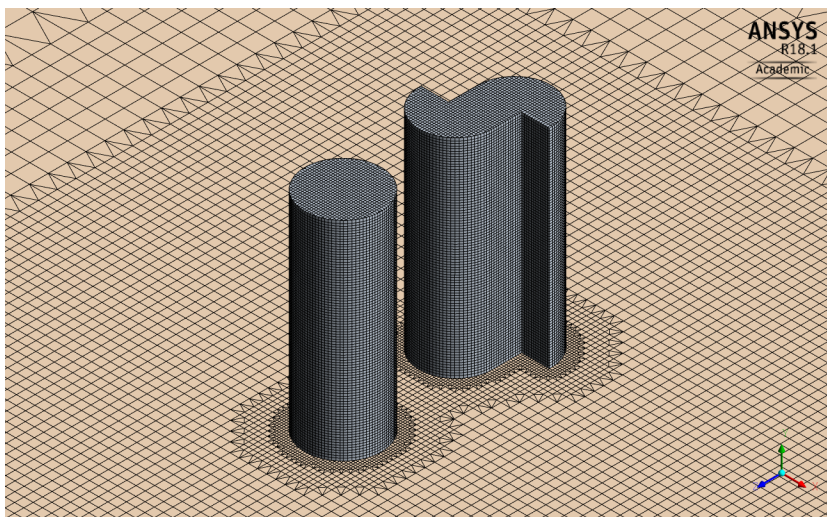


Obr. 9.1 – Schéma počiatočného umiestnenia modelov a tlakových snímačov



Obr. 9.2 – Experimentálne meranie v BWLT – počiatočná poloha modelov

Pre účely počítačovej simulácie CFD sme použili program ANSYS Fluent vyhládzajúc s nastavení z predchádzajúcich výpočtov, obr. 9.3.



Obr. 9.3 – Pohľad na výpočtový model pri vzájomnom pôsobení

10 Záver

V úvodných kapitolách (1. až 4.) dizertačnej práce sme prostredníctvom historického vývoja a súčasného stavu predstavili aktuálne trendy a smerovanie veterného inžinierstva. V piatej kapitole sme poukázali na základné matematické postupy pri popise prúdení vetra a definovanie jeho účinkov v Eurokóde. V šiestej kapitole sme opísali metodiku experimentálnych meraní vo veternom tuneli s medznou vrstvou a počítačovej simulácie CFD v programe ANSYS.

V siedmej kapitole sme porovnali hodnoty súčiniteľa vonkajšieho tlaku pre valec, ktorého hodnoty sme získali pomocou experimentálneho merania, CFD simulácie a z postupu v Eurokóde. Na základe porovnania dosiahnutých výsledkov môžeme konštatovať, že experimentálne hodnoty nepresiahli normové, naopak hodnoty zo simulácie prevýšili normové cca o 10% v oblasti sania.

V ôsmej kapitole sme po overení metodiky na valci skúmali objekt s pôdorysom v tvare S, ktorý bol odvodený z valca. V tomto prípade sme dostali uspokojivú zhodu

experimentálneho merania s počítačovou simuláciou pri definovaní súčiniteľa vonkajšieho tlaku. Dôležitým zistením tiež bolo, že aj malá zmena geometrie (z valca na „esíčko“) má výrazný vplyv na celkovú aerodynamiku prúdenia vetra na objekt, najmä pri smere vetra na kolmé hrany (veľká závislosť od polohy telesa voči prúdenia vetra). V tomto prípade by bolo použitie normových hodnôt nepostačujúce a nedostatočné, aj keď je blízka podobnosť objektov.

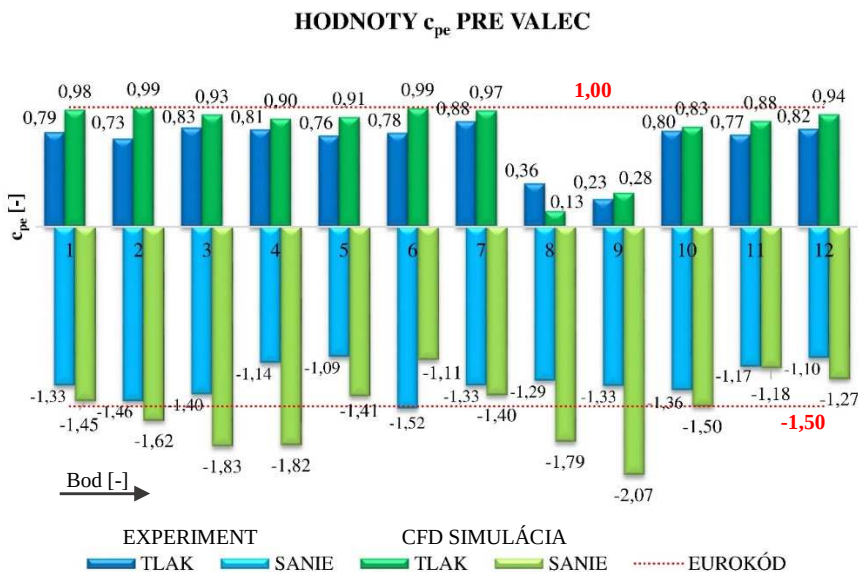
V deviatej kapitole sme skúmali zmenu prúdenia vetra pre tieto objekty pri ich vzájomnom pôsobení. Osobitnú pozornosť treba venovať pri návrhu lokálne namáhaných prvkov (opláštenie a pod.) najmä v medziľahlom priestore medzi telesami.

Štatistické spracovanie extrémnych hodnôt zo všetkých realizovaných meraní (experiment, CFD simulácia) pre valec s 12 bodmi a „esíčko“ s 24 bodmi sú zobrazené na grafoch 10.1 a 10.2. Zároveň sú grafy doplnené o extrémne normové hodnoty c_{pe} , ktoré predstavujú hodnotu 1,0 pre tlak a -1,5 pre sanie (pre valec, $Re = 10^7$). Z grafu 10.1 vyplýva, že Eurokód zabezpečuje spoľahlivú obálku extrémnych hodnôt v tlaku a saní. Pri počítačovej simulácii sú hodnoty sania väčšie v porovnaní s Eurokódom. Pre objekt v tvare S sú taktiež tlakové hodnoty menšie v porovnaní s Eurokódom. K prekročeniu hranice extrémneho normového sania nastáva iba v dvoch bodoch získaných z počítačovej simulácie.

Pre prax a rozvoj vedy máme nasledovné závery:

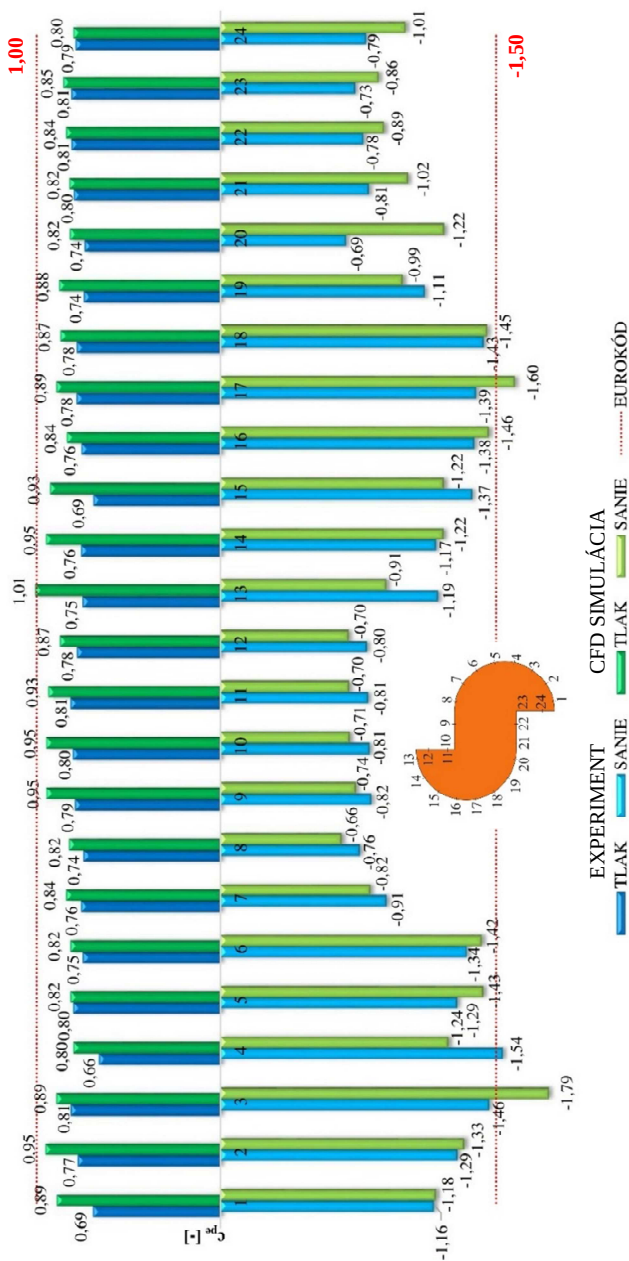
- Eurokód poskytuje globálne spoľahlivú obálku extrémnych hodnôt pre tlak a sanie pre objekty v tvare valca. Avšak je potrebné lokálne účinky riešiť individuálne.
- Nakalibrovaná počítačová simulácia poskytuje relevantné výsledky s výnimkov oblastí s ťahovým účinkom (saním). Preto môže veľmi účinne slúžiť na predikciu slabých miest, pred realizáciou experimentálnych meraní.

- Výsledky z našej analýzy poukazujú, že extrémne hodnoty sa nenachádzali iba v úrovni B (2/3 H), ale vo veľ'a prípadoch pri hornom porvchu (sporadicky v strede). Odporúčame preto pri meraniach skúmať aj tieto časti objektov.
- Neodporúčame použitie normových hodnôt ani pri tvarovo podobných objektov, ako v našom prípade „esíčko“ a valec. Nakoľko aj malé zásahy do geometrie objektu (valca, kvádra) diametrálne modifikujú celkovú aerodynamiku prúdenia vetra okolo budovy.
- Vzájomná vzdialenosť dvoch budov 25 m sa preukázala ako bezpečná s ohľadom na vzájomné pôsobenie pri účinkoch vetra.
- Zadefinovanie obálky extrémnych hodnôt súčiniteľa vonkajšieho tlaku pre objekt v tvare „S“.



Graf 10.1 – Minimálne a maximálne hodnoty súčiniteľa vonkajšieho tlaku zo všetkých realizovaných meraní pre valec.

HODNOTY c_{pe} PRE ESÍČKO



Graf 10.2 - Minimálne a maximálne hodnoty súčiniteľa vonkajšieho tlaku zo všetkých realizovaných meraní pre „esíčko“.

11 Zoznam použitej literatúry¹

1991-1-4, STN EN. Eurokód 1. Zaťaženie konštrukcií. Časť 1-4: Zaťaženie vetrom. miesto neznáme : Slovenský ústav technickej normalizácie, 2006.

BAKER, C. J. Wind engineering - Past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 95, 2009, stránky 843-870.

DAVENPORT, A. G. Past, present and future of wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2002, 90, stránky 1371-1380.

IRMINGER, J. O. V. a NOKKENTVED, C. *Wind pressure on Buildings, Experimental Researches*. miesto neznáme : GAD, 1936. str. 85. Sv. 2.

VON KARMAN, T. a EDSON, L. *The Wind and Beyond*. Boston : Little, Brown & Company, 1967. str. 376.

CERMAK, J. E. Wind-tunnel development and trends in applications to civil engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2003, 91, stránky 355-370.

HUBOVÁ, O. a KONEČNÁ, L. Experimental Determination of Wind Flowing Around a Building Configuration. *Procedia Engineering*. 2016, 191, stránky 1845-1851.

MACÁK, M., HUBOVÁ, O. a KONEČNÁ, L. Modeling of Turbulent Wind Flow around High-rise Building Verified by Results from Test in Wind Tunnel Laboratory. *Aplimat 2017: proceedings of the 16th conference on Applied Mathematics*. 2017, stránky 941-951.

DAVENPORT, A. G. Note on the distribution of the largest value of random function. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 28, 1964, Sv. 6739, 2, stránky 187-196.

BLOCKEN, B. 50 years of Computational Wind Engineering: Past, present and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 129, 2014, stránky 69-102.

¹ Kompletný zoznam použitej literatúry sa nachádza v dizertačnej práci

12 Publikačná činnosť autora

Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

MEDVECKÁ, Soňa - IVÁNKOVÁ, Oľga - KONEČNÁ, Lenka [Konečná, Lenka]. Impact of Columns' Inclination on a High-Rise Building under Wind Load. In *Interdisciplinarity in theory and practice [elektronický zdroj]*. No. 11 (2016), online, s. 158-161. ISSN 2344-2409.

Vedecké práce v ostatných domácich časopisoch

IVÁNKOVÁ, Oľga - DROBNÝ, Dušan - MEDVECKÁ, Soňa. Effects of Bracing of High-Rise Buildings upon their Static and Dynamic Behavior. In *Civil and environmental engineering*. Vol.10, Iss. 1 (2014), s. 10-14. ISSN 1336-5835.

Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

MEDVECKÁ, Soňa - IVÁNKOVÁ, Oľga - MACÁK, Marek. Pressure Coefficients Acting upon the Cylinder Obtained by Numerical and Experimental Analysis. In *Civil and environmental engineering*. Vol. 13, iss. 2 (2017), s. 149-155. ISSN 1336-5835. V databáze: WOS: 000417331300010 ; DOI: 10.1515/cee-2017-0020.

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

MEDVECKÁ, Soňa - IVÁNKOVÁ, Oľga. Impact of Stiffening Core and Columns Inclination on Change of Stiffness of High-Rise Building = Vplyv stužujúceho jadra a šikmých stĺpov na celkovú zmenu tuhosti výškovej budovy. In *Juniorstav 2015 : 17. odborná konferencia doktorského studia*. Brno, ČR, 29. 1. 2015 [elektronický zdroj]. 1. vyd. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2015, CD-ROM, [5] s. ISBN 978-80-214-5091-2.

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

JENDŽELOVSKÝ, Norbert - MEDVECKÁ, Soňa. Analýza výškovej budovy od horizontálnych síl. 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.77-80. ISBN 978-80-227-4040-1.

MEDVECKÁ, Soňa - IVÁNKOVÁ, Oľga. Vplyv sklonu stĺpov na celkovú zmenu tuhosti výškovej budovy. 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, [4] s. ISBN 978-80-227-4259-7.

MEDVECKÁ, Soňa. Analýza vplyvu triedy betónu a sklonu stĺpov na celkovú zmenu tuhosti výškovej budovy. 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. 112-117. ISBN 978-80-227-4301-3.

MEDVECKÁ, Soňa - IVÁNKOVÁ, Oľga. Effect of Inclination of Columns on the Change of the Stiffness of a High-Rise Building. 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. 9-12. ISSN 1660-9336.

MEDVECKÁ, Soňa - IVÁNKOVÁ, Oľga. Analýza vplyvu sklonu stĺpu na redukciu horizontálneho premiestnenia výškovej budovy. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj]*

: *proceedings of 13th International Conference. Bratislava, Slovakia, 15. - 16. 10. 2015*. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2015, CD-ROM, [4] s. ISBN 978-80-227-4463-8.

MEDVECKÁ, Soňa. Vplyv šikmých stĺpov na výškovú budovu. In *Advances in architectural, civil and environmental engineering [elektronický zdroj] : 25rd Annual PhD Student Conference on Architecture and Construction Engineering, Building Materials, Structural Engineering, Water and Environmental Engineering, Transportation Engineering, Surveying, Geodesy, and Applied Mathematics*. Bratislava, SR, 28. 10. 2015. 1. vyd. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015, CD-ROM, s. 121-125. ISBN 978-80-227-4514-7.

MEDVECKÁ, Soňa - IVÁNKOVÁ, Oľga - KONEČNÁ, Lenka [Konečná, Lenka]. Effects of External Pressure Cpe on the High-rise Building Obtain from Numerical Analysis and Experimental Measurement. In *ESaT 2016 [elektronický zdroj] : proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. Tatranské Matliare, Slovak Reublic, 29th of June - 1st of July 2016*. Košice : Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, 2016, CD-ROM, [4] s. ISBN 978-80-553-2564-4.

MEDVECKÁ, Soňa - IVÁNKOVÁ, Oľga - KONEČNÁ, Lenka [Konečná, Lenka]. Výpočet súčiniteľa vonkajšieho tlaku CPE pomocou normy a experimentu. In *New Trends in Statics and Dynamics of Buildings [elektronický zdroj] : conference proceedings. 14th International Conference*. Bratislava, Slovakia, 13. - 14. 10. 2016. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2016, CD-ROM, [4] s. ISBN 978-80-227-4613-7.

MEDVECKÁ, Soňa - IVÁNKOVÁ, Oľga - KONEČNÁ, Lenka [Konečná, Lenka]. Comparison of Wind Pressure on High-Rise Building Obtained by Numerical Analysis and Experimental Measurements. In *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II : proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. High Tatras Mountains, Tatranské Matliare, Slovak Republic, 29 June - 1 July 2016*. 1. vyd. London : Taylor & Francis Group, 2017, S. 555-560. ISBN 978-1-138-03224-8. V databáze: SCOPUS.

MEDVECKÁ, Soňa - BUJDÁKOVÁ KONEČNÁ, Lenka [Konečná, Lenka]. Experimentálne meranie súčiniteľa vonkajšieho tlaku pre objekt atypického pôdorysu. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 27th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Geodesy and Cartography, Landscaping, Building Technology, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Theory and Environmental Technology of Buildings, Water Resources Engineering*. 25. October 2017, Bratislava, Slovakia. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2017, CD-ROM, s. 90-94. ISBN 978-80-227-4751-6.