



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Stavebná fakulta

Ing. Samuel Cruz

Autoreferát dizertačnej práce
Modelovanie aerodynamickej drsnosti prostredia a stavebných
objektov

na získanie akademického titulu *philosophiae doctor, PhD.*

v doktorandskom študijnom programe:

3631 Teória a konštrukcie pozemných stavieb

v študijnom odbore: Stavebníctvo

Forma štúdia: denná

Bratislava 2025



Dizertačná práca bola vypracovaná na Katedre konštrukcií pozemných stavieb, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

Predkladateľ: **Ing. Samuel Cruz**

Katedra konštrukcií pozemných stavieb

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Radlinského 11

810 05 Bratislava

Školiteľ: **doc. Ing. et Ing. arch. Milan Palko, PhD.**

Katedra konštrukcií pozemných stavieb

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Radlinského 11

810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

(dátum rozoslania)

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa o h

na Katedre konštrukcií pozemných stavieb, Stavebná fakulta STU, Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

Dekan Stavebnej fakulty STU v Bratislave

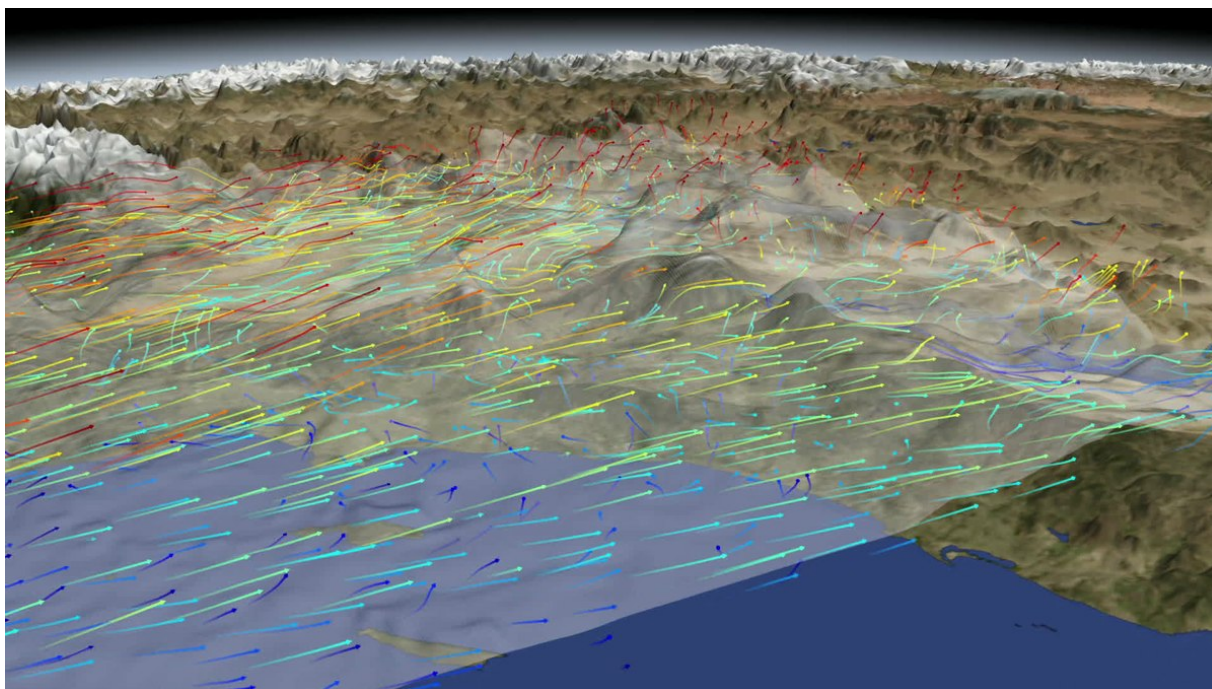
Obsah

1	Úvod	4
1.0.1	Typy obvodových plášťov	6
1.1	Geometrická a softvérová drsnosť	8
2	Tézy dizertačnej práce práce	10
2.1	Predmet dizertačnej práce	10
2.2	Cieľ dizertačnej práce	10
2.3	Metódy spracovania dizertačnej práce	11
3	Experimentálna časť	12
3.1	Nastavenie a validácia numerického modelu	12
3.2	Simulácie s drsnosťou a experiment vo veternom tuneli	13
3.2.1	Experimentálny model a meracie usporiadanie	13
3.2.2	Meracie body a technika	16
3.3	Experiment s konfiguráciou prostredia	17
3.3.1	Podrobná analýza jednotlivých situácií	18
3.4	Záver experimentálnej časti	22
3.5	Prínos práce pre prax a odporúčania	22
3.5.1	Odporúčania pre prax	22
3.6	Prínos práce pre vedu a výskum	23
3.6.1	Zlepšenie porozumenia aerodynamickej drsnosti	23
3.6.2	Definovanie hranice použiteľnosti softvérovej drsnosti	23
3.6.3	Vytvorenie metodiky validácie CFD simulácií	24
3.6.4	Dôraz na bezrozmerný tlakový koeficient C_p	24
3.6.5	Rozšírenie praktických aplikácií	24
3.6.6	Zhrnutie	24
3.6.7	Širší kontext a budúci význam	25
3.6.8	Odporúčania a návrhy na ďalší výskum	25

1 | Úvod

Vietor je neoddeliteľnou súčasťou života a prostredia. Okrem potenciálnych škôd spôsobených jeho účinkami sa stáva aj zdrojom energie a predmetom výskumu v rámci veterného inžinierstva. S rastúcou výškou budov a urbanizáciou nadobúda jeho význam v oblasti statiky, komfortu a bezpečnosti ešte väčší význam.

Kľúčovým pojmom pri modelovaní vetra v blízkosti povrchu Zeme je atmosférická hraničná vrstva (ABL), ktorá zachytáva logaritmický nárast rýchlosti vetra so stúpajúcou výškou.

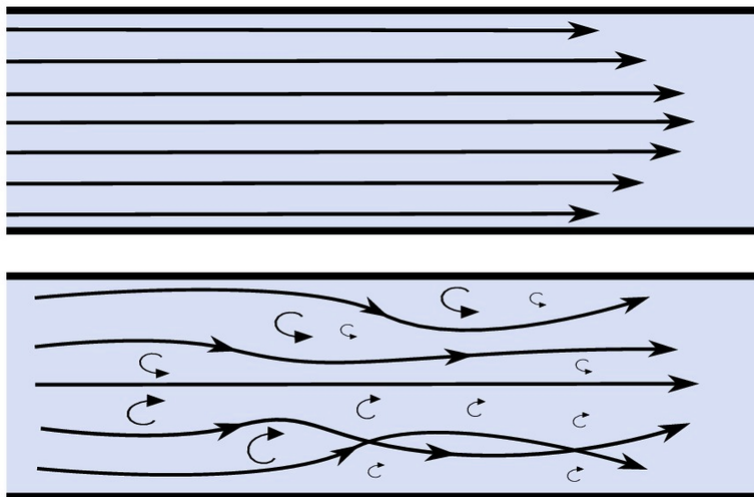


Obr. 1.0.1: Atmosférická hraničná vrstva a jej znázornenie[29].

Hraničná vrstva a charakter prúdenia

ABL je turbulentná vrstva, v ktorej vietor interaguje s povrchom. Rýchlostný profil vetra v tejto vrstve má logaritmický tvar. Charakter prúdenia (laminárne/turbulentné) závisí od Reynoldsovo čísla. Laminárne prúdenie sa vyskytuje pri nízkych rýchlostiach, pri

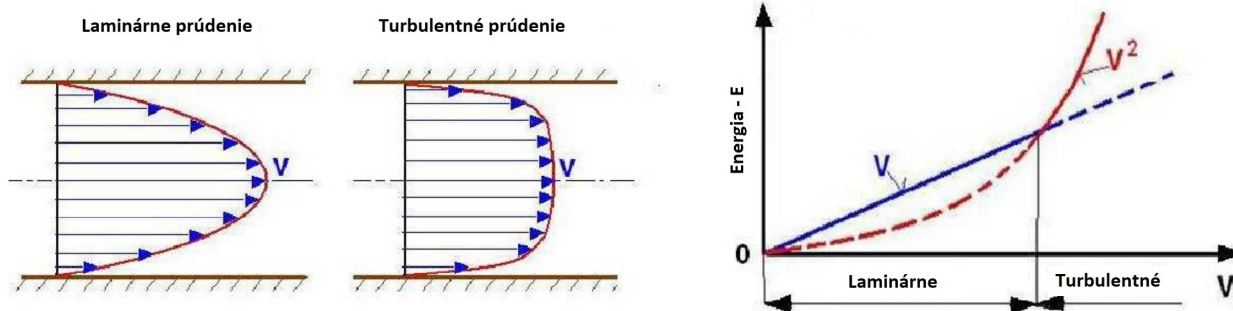
vyšších rýchlostiach prechádza do turbulentného režimu.



Obr. 1.0.2: Laminárne vs. turbulentné prúdenie[27].

Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo $Re = \frac{vL}{\nu}$ charakterizuje pomer zotrvačných a viskózných síl. Kritická hodnota $Re \approx 2320$ je hranicou medzi laminárnym a turbulentným prúdením.



Obr. 1.0.3: Profily laminárneho a turbulentného prúdenia[23].

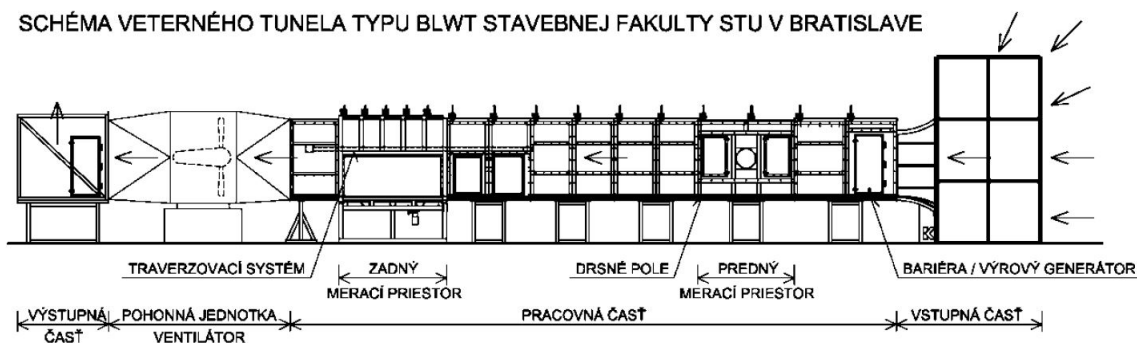
ABL a jej rozdelenie

Hraničná vrstva sa delí na povrchovú, Ekmanovu a nadpovrchovú zónu. Výška ABL závisí od drsnosti terénu – čím drsnejší terén, tým vyššia vrstva. Profil rýchlosti sa riadi logaritmickým zákonom:

$$v(z) = \left(\frac{u_*}{\kappa} \right) \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right)$$

Veterný tunel

Veterný tunel umožňuje meranie tlakových rozložení a validáciu numerických modelov. Používa sa najmä v prípade komplexných geometrických alebo urbanistických konfigurácií, kde CFD simulácie potrebujú overenie.



Obr. 1.0.4: Schéma aerodynamického tunela STU[25].

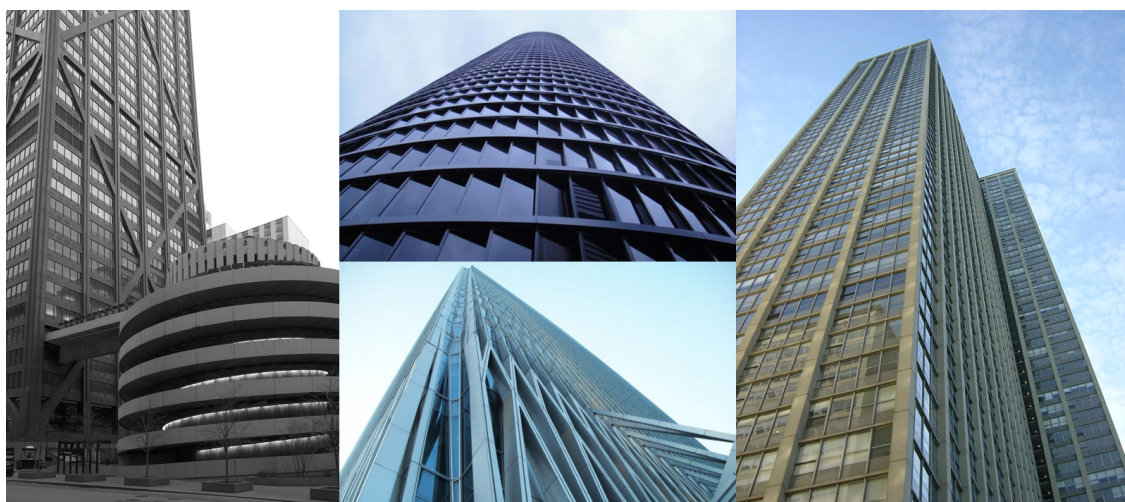
1.0.1 Typy obvodových plášťov

V dnešnej dobe nehomogénnej geometrie obvodových plášťov je vytvorenie realistického modelu v mierke WT celkom obťažná úloha a preto sa používajú rôzne zjednodušenia. Obvodové plášte si rozdelíme podľa typu povrchu do kategórií :

- S hladkým povrchom 1.0.5
- S malou štruktúrou vo forme vystúpenej konštrukcie, atď. 1.0.6
- S veľkou štruktúrou vo forme balkónov, konštrukcie, atď. 1.0.7



Obr. 1.0.5: Príklad hladkej fasády bez akýchkoľvek výstupkov [35][34][33][38].



Obr. 1.0.6: Príklad fasády s malou štruktúrou vo forme vystúpenej konštrukcie[32][33][36].



Obr. 1.0.7: Príklad fasády s veľkou štruktúrou vo forme balkónov, konštrukcie[31][37].

1.1 Geometrická a softvérová drsnosť

Pri modelovaní prúdenia vetra v urbanizovanom prostredí je nevyhnutné zvažovať mieru zjednodušenia geometrie objektov, najmä obvodových plášťov budov, ktoré sú často tvarovo zložité a obsahujú množstvo detailov ako sú výstupky, balkóny, rímasy alebo iné členité architektonické prvky. Tieto prvky významne ovplyvňujú charakter prúdenia v ich okolí a teda aj výsledné aerodynamické veličiny ako tlakové rozloženie, rýchlostné pole či súčiniteľ vonkajšieho tlaku (CPE).

Z praktického hľadiska však nie je vždy výhodné – a v niektorých prípadoch ani technicky uskutočniteľné – modelovať všetky geometrické detaily objektov. Detailné geometrie výrazne zvyšujú počet výpočtových buniek a tým aj pamäťovú a časovú náročnosť simulácie. Riešením môže byť nahradenie týchto detailov takzvanou *softvérovou drsnosťou*, ktorá sa v CFD softvéroch (napr. ANSYS Fluent) zadáva ako parametrická veličina reprezentujúca výšku ekvivalentnej drsnosti povrchu.

V prípade Fluentu sa softvérová drsnosť zadáva pomocou výšky drsnosti k_s a kon-

štanty C_s podľa vzťahu:

$$K_s = 9,973 \cdot \frac{z_0}{C_s} \quad (1.1.1)$$

kde z_0 je aerodynamická dĺžka drsnosti povrchu a C_s je konštanta drsnosti závislá od typu turbulentného modelu a aplikovaných stenových funkcií.

Táto práca sa zaoberá práve otázkou, do akej miery možno nahradiť geometrickú drsnosť (explicitné modelovanie povrchových detailov) jej softvérovou náhradou.

Odhad k_s z výšky geometrickej drsnosti

Pre úvodný odhad softvérovej drsnosti k_s možno využiť empirický vzťah medzi výškou nerovnosti h a aerodynamickou drsnosťou z_0 :

$$z_0 \approx \frac{h}{30} \Rightarrow k_s = \frac{z_0 \cdot 9,973}{C_s} \approx \frac{h \cdot 9,973}{30 \cdot C_s}$$

Pri predpoklade $C_s = 0,5$ môžeme aproximovať:

$$k_s \approx 0,67 \cdot h$$

Tento výpočet slúži ako základ pre stanovenie hodnôt k_s , ktoré sú následne validované porovnaním s experimentálnymi údajmi, ako je podrobnejšie rozpracované v kapitole 5.

Záver teoretickej časti

Vplyv vetra je komplexný a závisí od geometrie objektov, charakteru prúdenia a konfigurácie prostredia. Turbulentné modely a správne nastavenie okrajových podmienok (napr. stenové funkcie, y^+) sú kľúčom k presnému výpočtu aerodynamických síl. Cieľom tejto práce je ukázať, do akej miery možno pri CFD simuláciách nahradiť detailné geometrické modelovanie softvérovou drsnosťou bez straty presnosti výsledkov.

2 | Tézy dizertačnej práce práce

2.1 Predmet dizertačnej práce

Predmetom dizertačnej práce je simulácia budov s rôznym typom povrchu a vzťah medzi nimi. Je dôležité vedieť aký vplyv má zjednodušovanie geometrie samotných modelov na konečný výsledok. Zjednodušenia geometrie modelov nemajú stanovené žiadne hranice kedy je daný model dostatočne presný a kedy už začína zjednodušenie geometrie výrazne vplývať na výpočet. Tiež si treba uvedomiť do akej miery nám na presnosti výsledku záleží a či zmenšenie nároku na výpočtové zdroje nebude pre nás za daných podmienok dôležitejšie aj keď na úkor presnosti.

2.2 Cieľ dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce je zistiť do akej miery vieme geometriu samotného modelu zjednodušiť aby sme stále dosiahli dostatočne dobré výsledky. Tiež by sme chceli použiť na zjednodušenie štruktúry obalového plášťa softvérovú drsnosť K_s , ktorú nám Fluent ponúka. Našimi cieľmi bude :

- Návrh a modelovanie výpočtovej oblasti v súlade s platnými normami a následné nastavenie výpočtovej siete pre potreby simulácie.
- Výber vhodného modelu turbulencie a optimalizácia jeho parametrov s ohľadom na charakter prúdenia a presnosť výsledkov.
- Zabezpečenie rovnakých okrajových a vstupných podmienok v CFD simuláciách, ako boli použité pri meraní vo veternom tuneli, s cieľom umožniť vzájomnú porovnateľnosť výsledkov.
- Zostavenie zjednodušeného modelu budovy s rôznou výškou povrchových elementov drsnosti (0 mm, 0,5 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm) a experimentálne meranie súčiniteľov vonkajšieho tlaku (CPE) vo vybraných bodoch pomocou veterného tunela.
- Vykonanie CFD simulácií pre jednotlivé výšky geometricky modelovanej drsnosti (0 mm, 0,5 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm), následné vytvorenie zodpovedajúcich simulácií so softvérovo definovanou drsnosťou v prostredí ANSYS Fluent a porovnanie výsledkov medzi oboma prístupmi, ako aj s údajmi z veterného tunela.

- Vytvorenie simulácií pre rôzne konfigurácie okolia budovy s aplikovanou drsnosťou a analýza ich vplyvu na aerodynamické zaťaženie modelovanej budovy.

2.3 Metódy spracovania dizertačnej práce

V dizertačnej práci budeme používať nasledovné vedeckovýskumné metódy:

- analýza súčasného stavu, kde zhrnieme teoretickú časť.
- numerická metóda konečných prvkov a objemov - prostredníctvom počítačovej simulácie veterného tunela s medznou vrstvou a modelmi budov v programe Ansys Fluent,
- experimentálna analýza, kde budeme merať samotný model vo veternom tuneli. Zistíme a optimalizujeme spôsob zjednodušenia modelu.
- štatistická analýza, kde spracujeme získané údaje.
- vyhodnotenie výsledkov, kde porovnanáme výsledky zo simulačnej a experimentálnej časti.

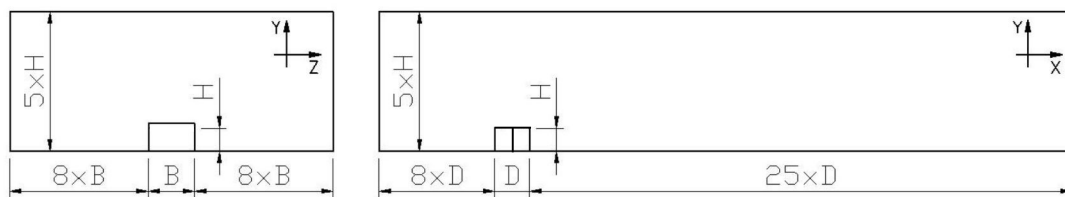
Metodické členenie dizertačnej práce bude nasledovné:

- štúdium domácej a zahraničnej vedeckej literatúry s cieľom vytvorenia si prehľadu a oboznámenia sa s témou aerodynamiky a modelovania hraničnej vrstvy a turbulentných modelov.
- osvojenie si práce v simulačných programoch, určených na simulácie počítačovej dynamiky tekutín (Fluent) - tvorba simulačného modelu veterného tunela s medznou vrstvou a modelom s konkrétnou geometriou
 - vytvorenie geometrie a optimalizovanie sieťovania simulačného modelu
 - testovanie, optimalizácia a výber najvhodnejšieho turbulentného modelu pre simulácie na základe vyhodnotenia výsledkov dosiahnutých jednotlivými turbulentnými modelmi
- Návrh vhodného postupu na simulovanie modelov s rôznou geometriou povrchu a jeho zjednodušenie.
- Realizácia experimentu vo veternom tuneli s modelom konkrétnych tvarov a typom povrchu.
- Zozbieranie získaných údajov z merania, ich analýza a verifikácia; porovnanie výsledkov simulácií s výsledkami z merania vo veternom tuneli.
- Vyhodnotenie a vyvodenie záverov, do akej miery boli ciele dizertačnej práce splnené

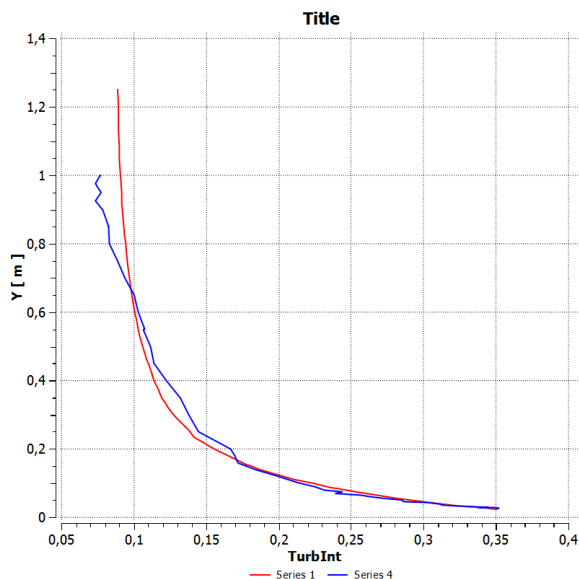
3 | Experimentálna časť

3.1 Nastavenie a validácia numerického modelu

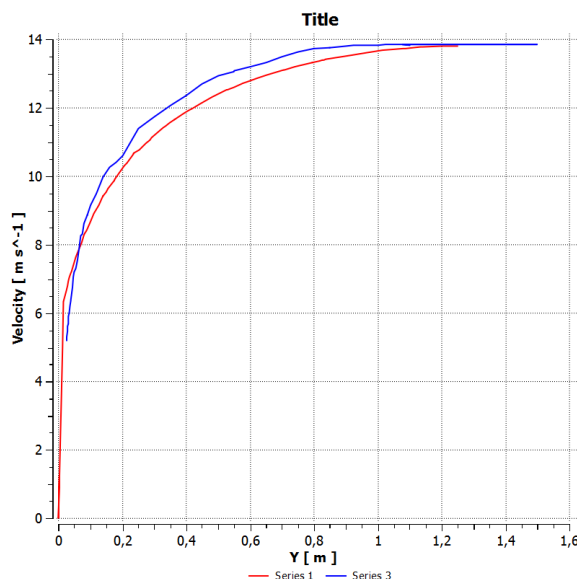
Simulácie boli realizované v ANSYS Fluent s použitím turbulentného modelu $k-\varepsilon$ a logaritmického profilu vetra definovaného UDF funkciou. Výpočtová doména bola dimenzovaná tak, aby minimalizovala vplyv okrajových podmienok (Obr. 3.1.1). Validáciou ABL profilu bez objektu bola potvrdená presnosť simulácie (Obr. 3.1.2, 3.1.3).



Obr. 3.1.1: Veľkosť výpočtovej oblasti[24].



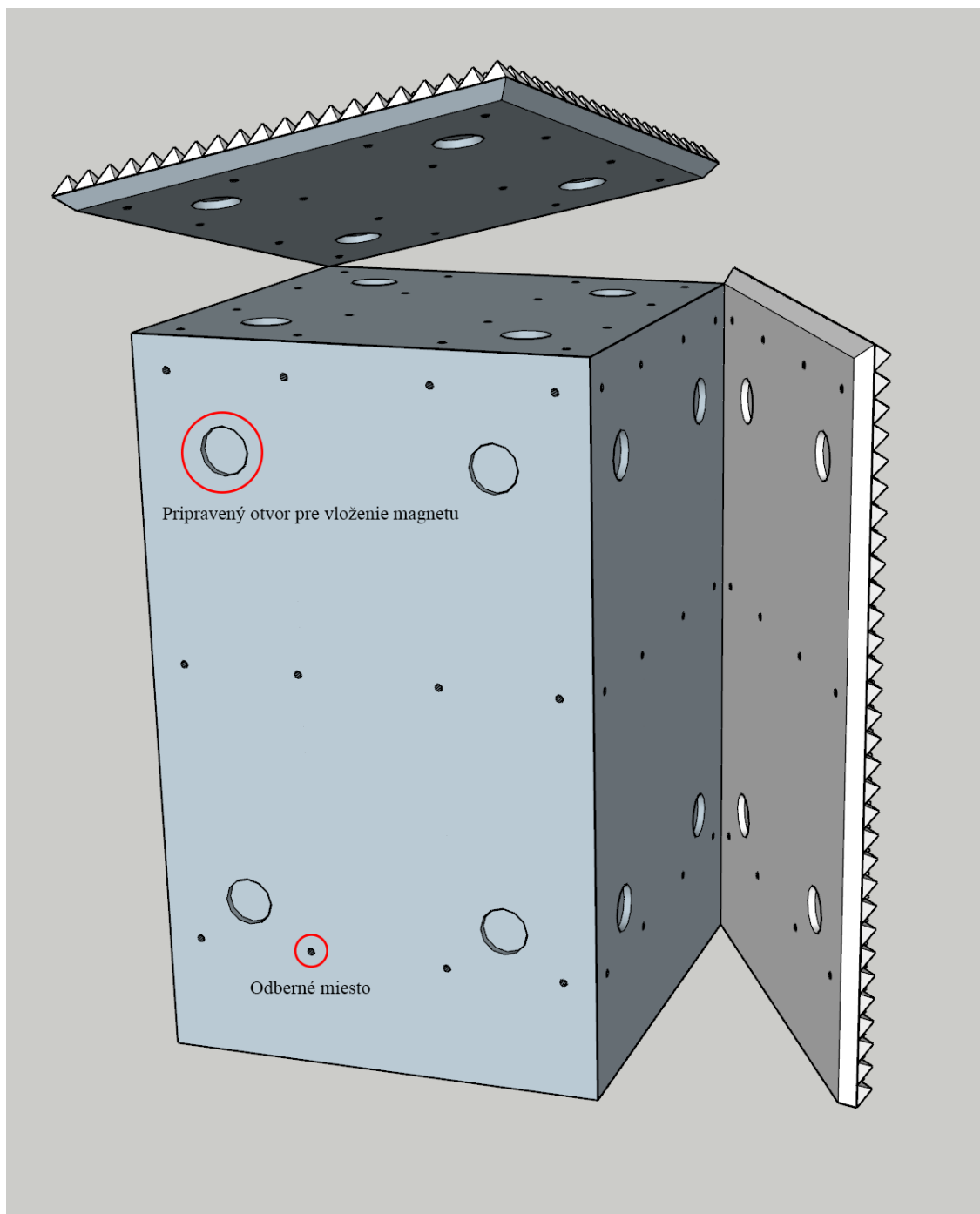
Obr. 3.1.2: Porovnanie turbulencie – model $k-\varepsilon$.

Obr. 3.1.3: Porovnanie rýchlosti – model $k-\varepsilon$.

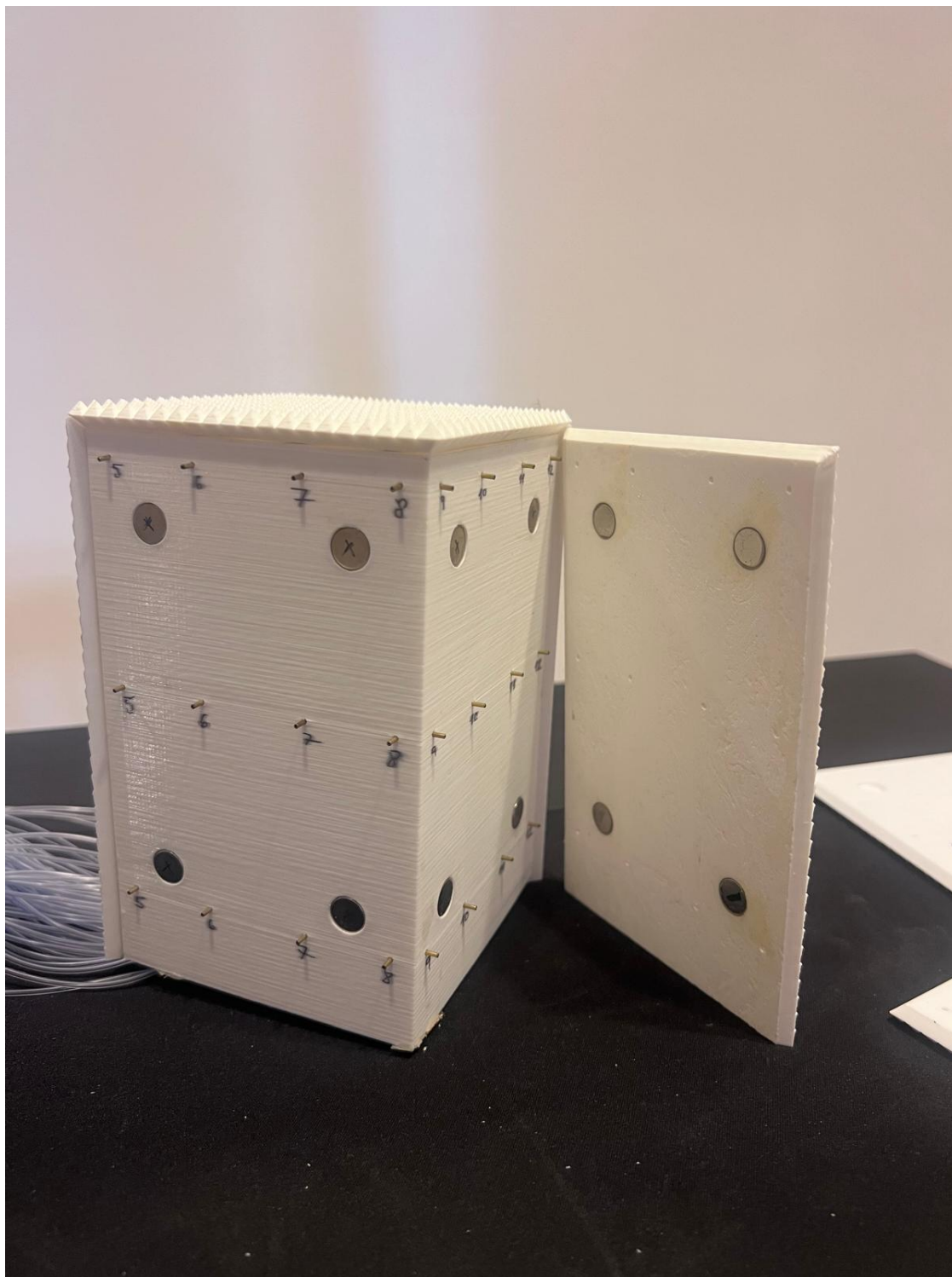
3.2 Simulácie s drsnosťou a experiment vo veternom tuneli

3.2.1 Experimentálny model a meracie usporiadanie

Experimenty boli realizované na fyzikálnom modeli kvádrového tvaru s pôdorysom 100×100 mm a výškou 150 mm, špeciálne navrhnutom pre rýchlu výmenu povrchových panelov s rôznou drsnosťou a s dôrazom na vysokú presnosť a opakovateľnosť meraní. Model bol vyrobený 3D tlačou a obsahoval integrované otvory s priemerom 1 mm v definovaných bodoch podľa návrhu simulácie, určené na pripojenie tlakovej sondy.



Obr. 3.2.1: Magnetický model s geometrickou drsnosťou steny 4 mm.



Obr. 3.2.2: Magnetický model s geometrickou drsnosťou steny 4 mm.

Modulárna koncepcia so zápusťnými magnetickými spojmi umožnila výmenu stien s rôznou výškou drsnosti (0–4 mm), čím sa výrazne skrátil čas prípravy experimentu a zabezpečila sa konzistentnosť medzi meraniami. Všetky výmenné steny boli kompatibilné

so základným telom a obsahovali identické meracie otvory a magnetické body.

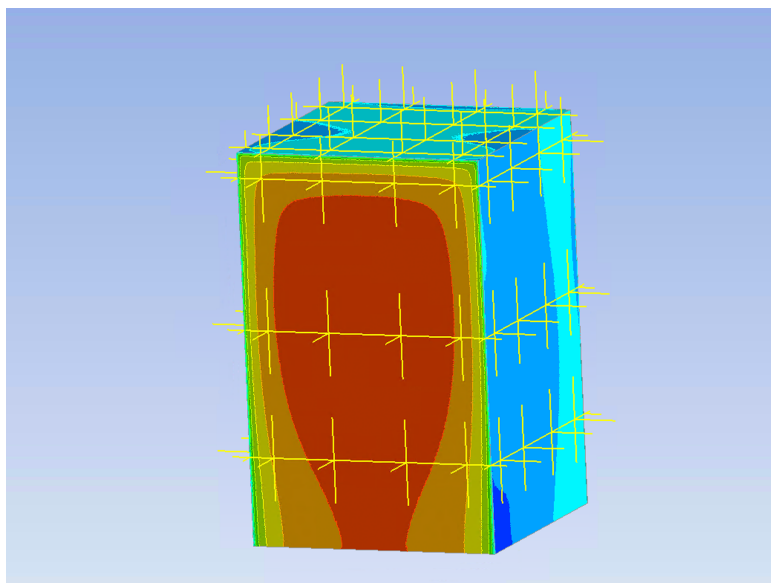
Model bol osadený na otočnom stole s nastaviteľným azimutom vetra. Pre účely experimentu bol zvolený hlavný smer prúdenia v súlade so simuláciami.

3.2.2 Meracie body a technika

Na model boli aplikované 1 mm otvory pre tlakové merania, rozmiestnené do štyroch výškových úrovní:

- A1–A16: 35 mm od základne,
- B1–B16: 75 mm (stred výšky),
- C1–C16: 10 mm pod horným okrajom,
- S1–S16: na hornej vodorovnej stene modelu.

Každá úroveň obsahovala 16 rovnomerne rozložených bodov. Merania prebiehali sekvenčne pomocou precízne kalibrovannej diferenciálnej tlakovej sondy (miniCTA), napojenej na dátový zberový systém. Každý bod bol meraný minimálne trikrát za ustálených podmienok pre zvýšenie spoľahlivosti údajov.



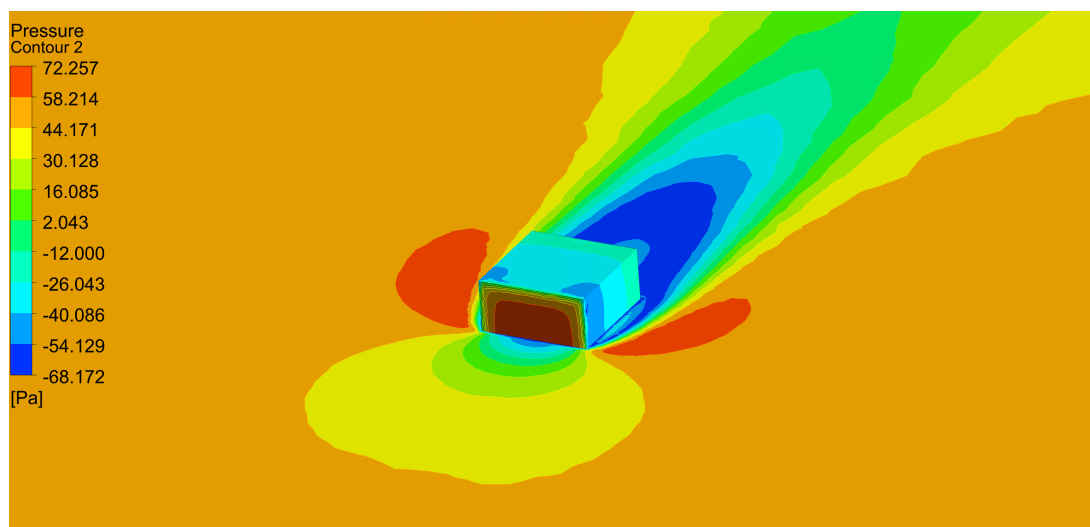
Obr. 3.2.3: Rozloženie meracích bodov na modeli.

Numerické simulácie pre objekt s rôznou povrchovou drsnosťou (0–4 mm) boli porovnávané medzi geometrickým modelovaním a softvérovým zadáním drsnosti (k_s). Hodnoty k_s boli kalibrované tak, aby replikovali účinky reálnych výstupkov (Tab. 3.1).

Tabuľka 3.1: Zvolená softvérová drsnosť k_s

Výška výstupkov [mm]	Kalibrované k_s [mm]
0,5	0,30
2,0	1,33
3,0	1,80
4,0	2,40

Experiment bol realizovaný vo veternom tuneli STU. Modulárny magnetický model umožnil rýchlu výmenu stien s rôznou drsnosťou. Merania tlakových koeficientov C_{PE} prebiehali v 64 bodoch a boli porovnané s CFD výstupmi (Obr. 3.2.4).

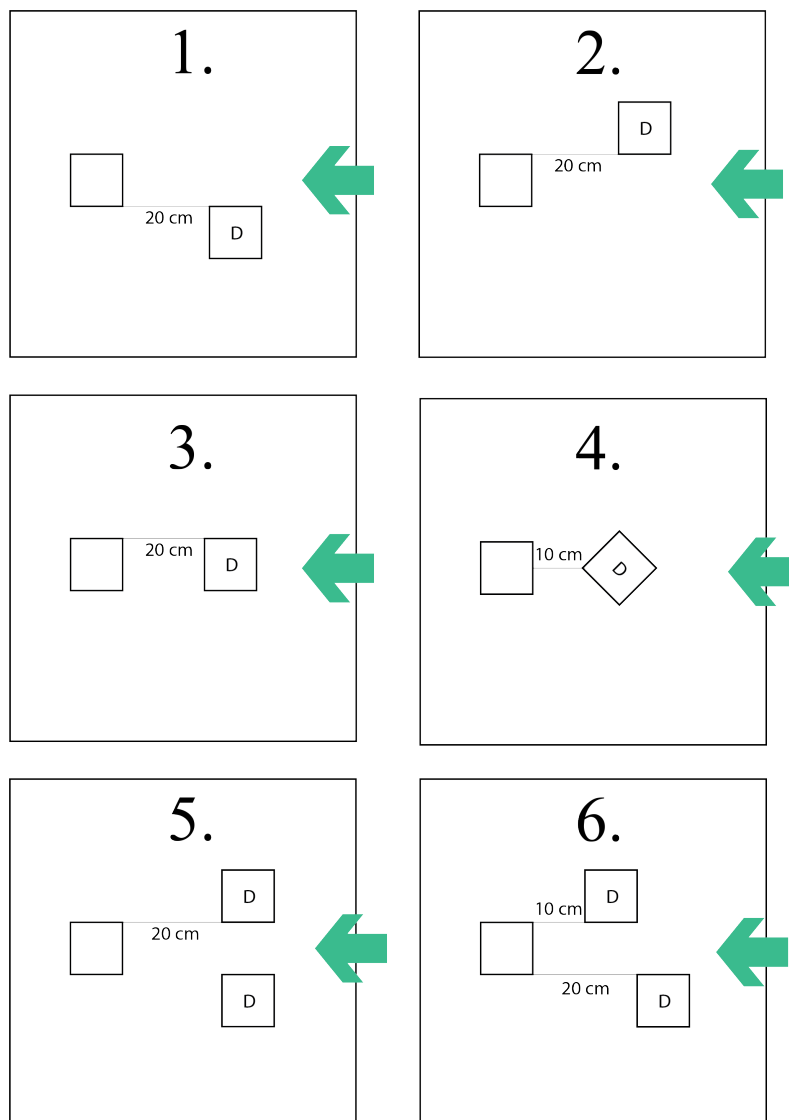


Obr. 3.2.4: Kontúry tlaku na modeli a v jeho okolí.

Štatistická analýza (t-test, korelácia, Bland-Altman) potvrdila, že medzi geometrickou a softvérovou drsnosťou nie je pri jednoduchých prípadoch významný rozdiel. Percentuálne odchýlky C_{PE} boli nižšie než 5 %.

3.3 Experiment s konfiguráciou prostredia

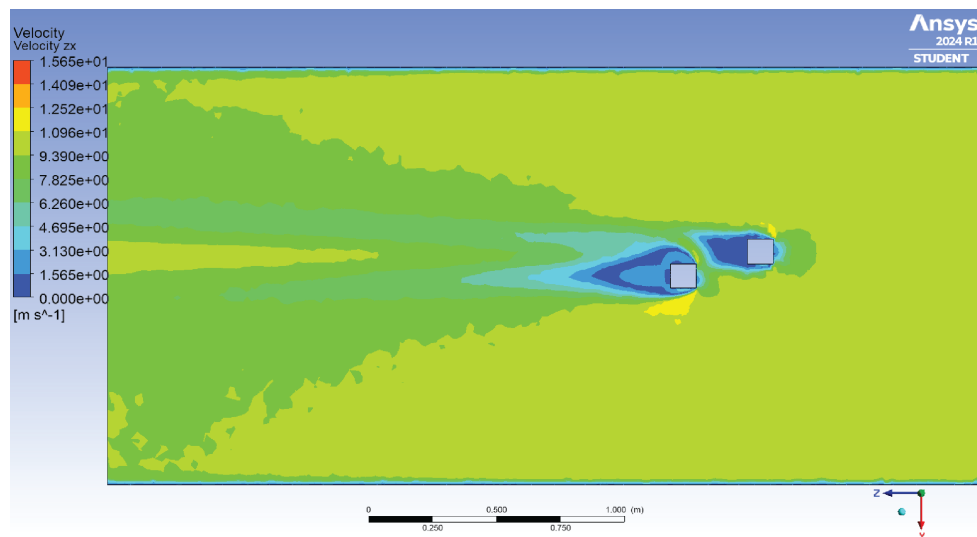
Doplňujúce simulácie overovali vplyv rozmiestnenia okolitých budov na presnosť modelovania drsnosti. Testovalo sa 6 rôznych urbanistických situácií (Obr. 3.3.1), kde sa porovnával vplyv geometrickej a softvérovej drsnosti.



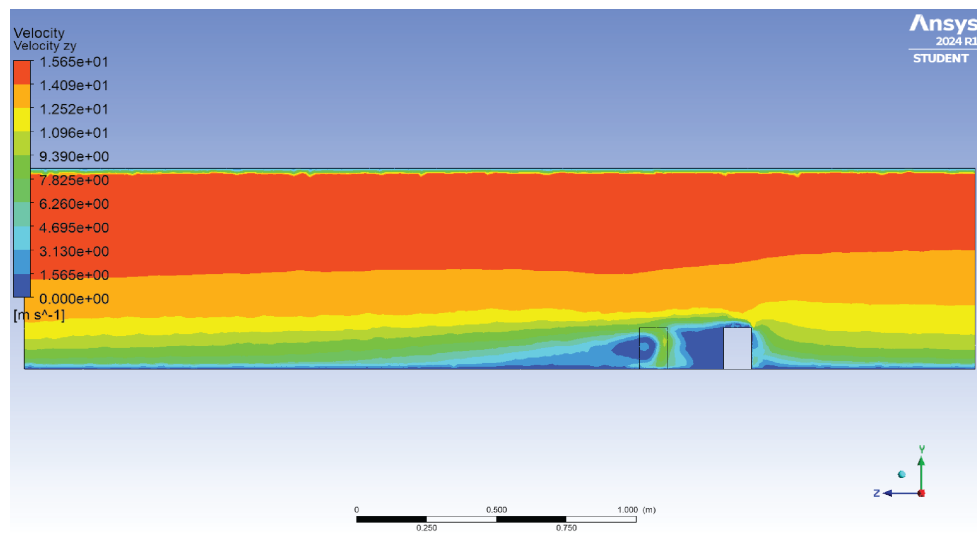
Obr. 3.3.1: Testované urbanistické situácie.

3.3.1 Podrobná analýza jednotlivých situácií

- **Situácia 1 a 2:** Priame exponovanie vetru na meraný objekt viedlo k vysokým rozdielom v rýchlosti a tlaku (okolo 23 m/s a 26 Pa), pričom aj rozdiely v CPE sú významné (15%). Tento typ konfigurácie ukazuje, že aj bez tienenia sa drsnosť významne premieta do výsledných parametrov, hlavne v oblasti tlaku.

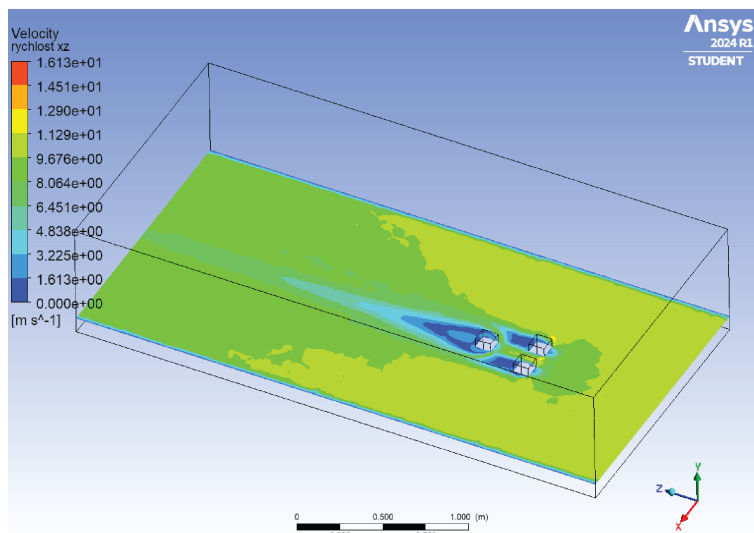


Obr. 3.3.2: Rozloženie rýchlostných polí z programu ANSYS.



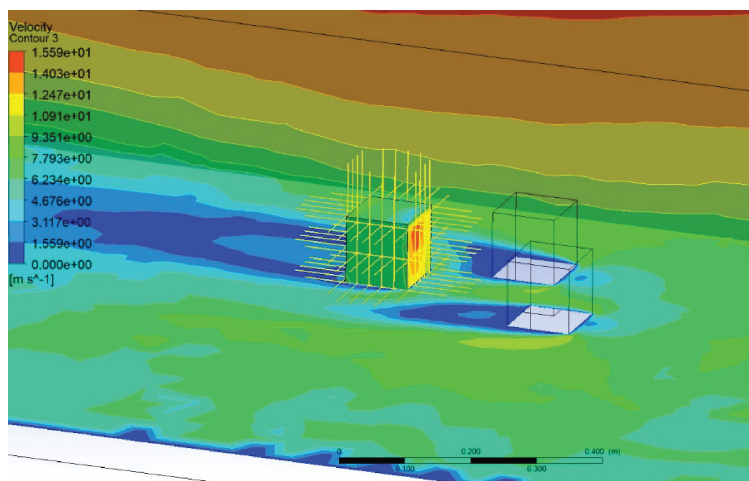
Obr. 3.3.3: Rozloženie rýchlostných polí z programu ANSYS.

- **Situácia 5:** Prítomnosť mierneho tienenia pred meraným objektom viedla k výraznému zníženiu rozdielov, hlavne v tlaku (iba 7.5%) a CPE (7.2%). Tento prípad ukazuje, že v jednoduchých urbanistických prostrediach je aplikácia drsnosti pomocou Fluent konštanty dostatočná.



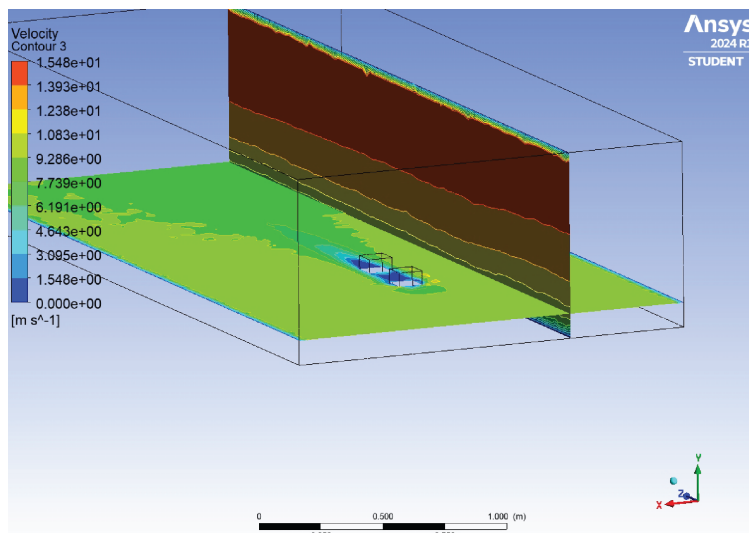
Obr. 3.3.4: Rozloženie rýchlostných polí z programu ANSYS.

- **Situácia 4 a 6:** Najvyššie rozdiely vo všetkých veličinách boli zaznamenané práve v týchto prípadoch, kde dochádzalo k výraznejšiemu tienenému prúdeniu, recirkuláciám a vzájomnému pôsobeniu prúdnice za drsnými objektmi. Rozdiely v CPE presahovali až 22%.



Obr. 3.3.5: Rozloženie rýchlostných polí z programu ANSYS.

- **Situácia 3:** V prípade jednoduchého priestoru bez významného tienenia boli rozdiely minimálne, čo opäť podporuje použiteľnosť Fluent drsnosti v takýchto konfiguráciách.

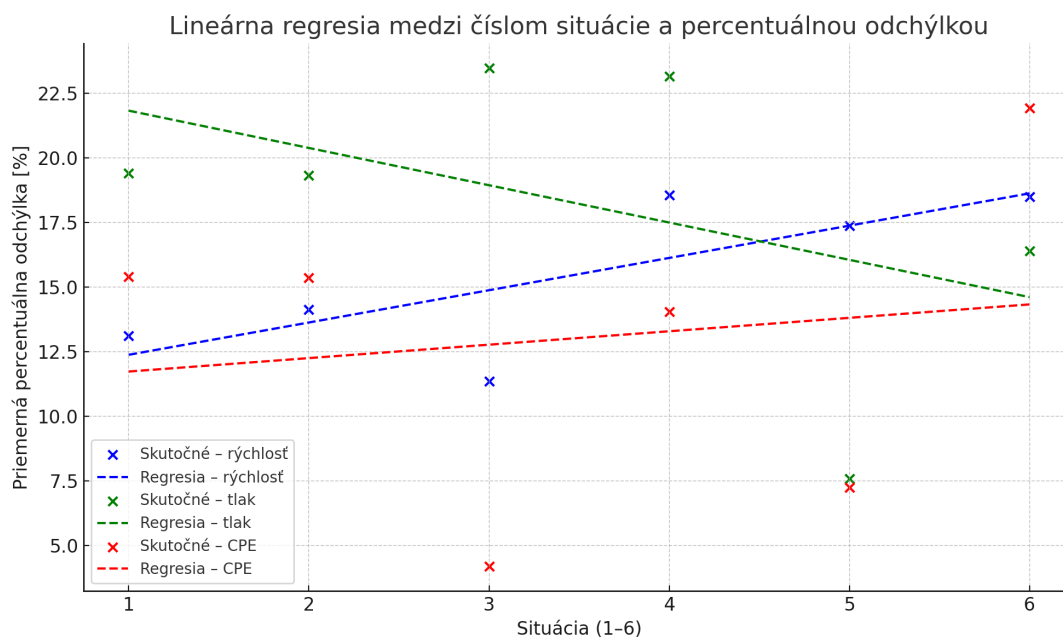


Obr. 3.3.6: Rozloženie rýchlostných polí z programu ANSYS.

Výsledky ukázali, že:

- V jednoduchých konfiguráciách boli rozdiely medzi metódami zanedbateľné.
- V zložitých konfiguráciách (tienenie, recirkulácie) odchýlky výrazne rástli (CPE až o 22 %).

Lineárna regresná analýza ukázala možnú existenciu lineárneho vzťahu medzi zložitou prostredia a veľkosťou chyby (Obr. 3.3.7).



Obr. 3.3.7: Závislosť chyby od zložitosti prostredia.

3.4 Záver experimentálnej časti

Získané výsledky podčiarkujú význam adaptívneho výberu modelovacieho prístupu v závislosti od charakteru prostredia. V prípade jednoduchých konfigurácií môže byť použitá aerodynamická drsnosť definovaná konštantou s akceptovateľnou úrovňou chyby. Avšak v komplexnejších urbanistických usporiadaniach, kde dochádza k výrazným interakciám prúdenia, sa ukazuje potreba presnejšieho geometrického modelovania drsnosti, aby sa minimalizovali predikčné odchýlky najmä v oblasti tlakov.

Tieto závery majú významné implikácie pre návrh budov, plánovanie urbanistických celkov, ako aj pre analýzy komfortu a bezpečnosti v mestskom prostredí.

3.5 Prínos práce pre prax a odporúčania

Práca významne prispela k lepšiemu pochopeniu vplyvu zvoleného modelu drsnosti na výsledky numerických simulácií. Výsledky poskytujú cenné odporúčania pre inžinierov a projektantov pri výbere vhodného modelovacieho prístupu v závislosti od charakteru prostredia.

Okrem toho práca poukazuje na potrebu dôslednej validácie CFD simulácií pomocou experimentálnych meraní, najmä v prípadoch, kde tlakové veličiny zohrávajú rozhodujúcu úlohu pri navrhovaní konštrukcií alebo posudzovaní komfortu v urbanizovanom prostredí.

3.5.1 Odporúčania pre prax

Na základe vykonanej analýzy a získaných výsledkov je možné formulovať viaceré odporúčania, ktoré majú význam pre inžiniersku prax v oblasti numerického modelovania veterného prúdenia v urbanistických prostrediach.

V prípadoch jednoduchých konfigurácií, kde hlavný prúd nie je významne narušený ďalšími prekážkami a recirkulačnými oblasťami, napríklad pri izolovaných administratívnych budovách, skladových halách alebo menších obytných komplexoch, možno použiť aerodynamickú drsnosť modelovanú prostredníctvom konštanty vo Fluent. V takýchto prípadoch je možné očakávať, že rozdiely v predikcii budú v rámci tolerancií bežných inžinierskych noriem, a výpočtová efektivita tohto prístupu predstavuje významné uľahčenie projektu.

Na druhej strane, v prípade komplexných urbanistických konfigurácií, kde sú budovy usporiadané husto, vytvárajú tienenia, úzke uličky, viacnásobné interakcie vetra a recirkulačné oblasti (typickým príkladom sú historické centrá miest, mestské administratívne komplexy alebo veľké nákupné centrá), sa ukazuje potreba presnejšieho explicitného geometrického modelovania drsnosti. Predikcia rýchlostí a najmä tlakových polí v týchto prípadoch vyžaduje zachytenie jemných detailov prúdenia, ktoré konštantná drsnosť Fluentu nedokáže presne reprodukovať.

Osobitnú pozornosť je potrebné venovať situáciám, kde tlak priamo ovplyvňuje návrh konštrukčných prvkov, ako sú fasádne obklady, okná, svetlíky, strešné plášte či billboardy a reklamné plochy. Nesprávne predikované tlakové zaťaženie môže viesť k poddimenzovaniu konštrukcií, čo predstavuje riziko porúch, alebo naopak k ich predimenzovaniu, čo vedie k zbytočnému zvyšovaniu nákladov.

Všetky projekty, kde sa vyžaduje vysoká presnosť hodnotenia lokálnych účinkov vetra (napríklad veterný komfort chodcov, presná analýza veterného zaťaženia na špecifických častiach budovy, rozptyl znečisťujúcich látok), by mali zvážiť použitie geometrického modelovania drsnosti a overenie výsledkov pomocou validácie experimentálnych alebo referenčných dát.

Percentuálna analýza rozdielov by sa mala stať štandardnou súčasťou validácie CFD štúdií, keďže priemerné hodnoty môžu maskovať významné lokálne extrémny, ktoré môžu byť v kritických oblastiach rozhodujúce pre správny návrh.

3.6 Prínos práce pre vedu a výskum

Táto dizertačná práca sa významne podieľa na rozvoji poznatkov v oblasti aerodynamiky stavebných objektov a numerického modelovania vplyvu povrchovej drsnosti. Hlavné prínosy možno zhrnúť nasledovne:

3.6.1 Zlepšenie porozumenia aerodynamickej drsnosti

Práca detailne analyzuje rozdiely medzi dvoma prístupmi modelovania drsnosti:

- geometrickým modelovaním reálnych prvkov povrchu,
- aplikáciou aerodynamickej drsnosti cez softvérovú konštantu.

Výsledky ukázali, že v jednoduchých konfiguráciách postačuje zadanie aerodynamickej konštanty, no v komplexnejších urbanistických prostrediach sú odchýlky natoľko výrazné, že presné geometrické modelovanie sa stáva nevyhnutnosťou.

3.6.2 Definovanie hranice použiteľnosti softvérovej drsnosti

Prostredníctvom experimentov a numerických simulácií bol identifikovaný jasný vzťah medzi komplexnosťou prostredia a veľkosťou chyby. Bola odvodená lineárna korelácia medzi stupňom urbanistickej zložitosti a nárastom percentuálnych rozdielov v rýchlosti, tlaku a koeficiente C_p .

Táto práca poskytuje kvantitatívne odporúčania, kedy je ešte aplikácia aerodynamickej konštanty prijateľná a kedy je nutné pristúpiť k presnejšiemu modelovaniu.

3.6.3 Vytvorenie metodiky validácie CFD simulácií

Spojením dát zo simulácií a veterného tunela bola vytvorená praktická metodika porovnávania a validácie CFD modelov:

- hodnotením absolútnych a percentuálnych rozdielov,
- využitím boxplot analýzy rozptylu,
- aplikáciou lineárnej regresie na určenie trendov nárastu chýb.

Táto metodika je univerzálne aplikovateľná aj na iné štúdie prúdenia v zastavanom prostredí.

3.6.4 Dôraz na bezrozmerný tlakový koeficient C_p

Výskum ukázal, že hodnotenie rozdielov prostredníctvom C_p je veľmi efektívne a menej citlivé na lokálne extrémny ako samotná rýchlosť alebo tlak. Týmto práca odporúča prioritu využívania C_p pri validácii a optimalizácii CFD modelov.

3.6.5 Rozšírenie praktických aplikácií

Výsledky majú praktické využitie v oblasti:

- navrhovania výškových budov v mestských aglomeráciách,
- urbanistického plánovania (tienenie vetra, ventilácia ulíc),
- modelovania veterných efektov na mosty, veže a priemyselné objekty,
- optimalizácie energetickej efektívnosti budov z pohľadu veterného zaťaženia.

Práca tiež vytvára podklad pre budúce normy a odporúčania v oblasti veterného inžinierstva a modelovania drsnosti.

3.6.6 Zhrnutie

Dizertačná práca komplexne spája experimentálne a numerické prístupy k modelovaniu aerodynamickej drsnosti a prináša nové poznatky o limitoch a presnosti jednotlivých techník. Jej výstupy majú významný prínos nielen v akademickej sfére, ale aj pre prax – najmä v oblasti CFD simulácií, urbanistického dizajnu a bezpečnosti stavieb pri veternom zaťažení.

3.6.7 Širší kontext a budúci význam

Význam presného modelovania aerodynamických javov v urbanistických prostrediach neustále rastie, najmä v súvislosti s rastom hustoty osídlenia, rozvojom konceptu smart cities a adaptáciou miest na meniace sa klimatické podmienky. Presné predikcie veterného komfortu, zaťaženia budov vetrom a správania sa prúdenia v mestách budú zohrávať čoraz väčšiu úlohu v plánovaní udržateľného a bezpečného mestského prostredia.

Vzhľadom na očakávaný nárast extrémnych meteorologických udalostí v dôsledku klimatických zmien sa potreba spoľahlivého numerického modelovania veterných javov stáva nevyhnutnou súčasťou navrhovania nových urbanistických celkov aj rekonštrukcie existujúcich štruktúr.

3.6.8 Odporúčania a návrhy na ďalší výskum

Na základe získaných výsledkov je možné formulovať nasledovné odporúčania:

- V jednoduchých urbanistických konfiguráciách je možné pre zjednodušenie modelovania a zníženie výpočtových nárokov použiť aerodynamickú drsnosť definovanú konštantou.
- Pre zložité urbanistické štruktúry s významnými interakciami prúdenia je potrebné uprednostniť geometrické modelovanie drsnosti.
- Pred začiatkom simulácie by mal byť vykonaný kvalitatívny odhad zložitosti prostredia, ktorý určí vhodný prístup modelovania.

V rámci ďalšieho výskumu sa odporúča:

- Preskúmať možnosti kombinovaného a adaptívneho zadávania drsnosti v CFD simuláciách.
- Rozšíriť analýzy na širšiu škálu typov budov a urbanistických konfigurácií vrátane nepravidelných a organických tvarov.
- Overiť výsledky na reálnych plno-škálových budovách alebo prostredníctvom dlhodobých monitorovacích kampaní v reálnom mestskom prostredí.
- Preskúmať vplyv dynamických zmien povrchovej drsnosti v čase, napríklad vplyv vegetácie, usadzovania prachu alebo degradácie povrchov.

Práca týmto vytvára pevný základ pre pokračovanie výskumu v oblasti aerodynamiky budov a urbanistických prostredí a poskytuje smerovanie pre ďalší vývoj numerických a experimentálnych metód v tejto oblasti.

Na základe výsledkov boli formulované aj odporúčania pre prax:

- V jednoduchých urbanistických prostrediach je možné pre zjednodušenie práce a zníženie výpočtových nárokov použiť softvérovú drsnosť.
- Pre komplexné oblasti s viacerými budovami, odtrhovými oblasťami alebo tienami je potrebné drsnosť explicitne modelovať geometricky.
- V praxi by mal byť pred výpočtom vykonaný kvalitatívny odhad zložitosti prostredia, ktorý určí vhodný modelovací prístup.

V rámci návrhov na ďalší výskum sa odporúča:

- Skúmať možnosti adaptívneho zadávania drsnosti kombinovaním softvérového a geometrického modelovania.
- Rozšíriť výskum na ďalšie typy terénu a rôzne meradlá modelov.
- Overiť výsledky pri vyšších rýchlostiach vetra a pri rôznych profiloch atmosférickej hranicovej vrstvy.

Záverom možno konštatovať, že práca významne prispela k lepšiemu pochopeniu limitov aplikácie softvérovej drsnosti a jej vplyvu na presnosť simulácií, čím poskytuje cenné odporúčania pre navrhovanie objektov a urbanistických celkov s ohľadom na aerodynamické vlastnosti.

Literatúra

- [1] BANERJEE, A., 2015. Validation of CFD codes for wind engineering: Case studies from the NIST aerodynamic database.
- [2] BOYLE, R., 2014. Roughness effects on wind energy performance. *Renewable Energy*, 70, 15–24.
- [3] ZHANG, W., 2020. Surface roughness effect at low Reynolds numbers. *Thermal Science*, 24(5), 267–274.
- [4] KIM, H. J., 2024. Wind flow and roughness interaction. *JAFM*, 17(1), 10–21.
- [5] REITER, S., 2008. Validation of urban CFD simulations. *Energy and Buildings*, 40(4), 676–684.
- [6] SMITH, J., 2023. Roughness characteristics and aerodynamics. *Applied Sciences*, 13(4), 1234.
- [7] ZOU, M., 2014. Effect of surface roughness on turbine blade performance. *Journal of Turbomachinery*, 136(4), 041008.
- [8] LI, D., 2013. NASA study on realistic roughness effects. NASA Technical Report 2013-216345.
- [9] LEE, S., 2024. CFD simulations of wind fields. *Atmosphere*, 15(1), 77.
- [10] CHEN, B., 2025. CFD applications in urban microclimates. *Environmental Modelling & Software*, 165, 105567.
- [11] AHN, M., 2025. Wind load prediction on ships using CFD. *Ocean Engineering*, 269, 113403.
- [12] WANG, T., 2024. Aerodynamics of bluff bodies with roughness. *Applied Sciences*, 14(7), 2919.
- [13] ZHOU, X., 2024. Selecting roughness constants for ABL. *Journal of Wind Engineering*, 234, 104812.
- [14] JONES, P., 2019. Wall-function roughness models in CFD. *Wind Energy*, 22(9), 1149–1164.

- [15] MEI, Y., 2025. Validation of CFD with experimental wind data. *Journal of Building Engineering*, 67, 106052.
- [16] GARCIA, R., 2025. Environmental wind tunnel design and validation. *Atmosphere*, 15(1), 110.
- [17] KIM, S., 2025. Roughness effects on turbine aerodynamics. ResearchGate Preprint.
- [18] ALI, R., 2022. Modeling near-wall turbulence. arXiv:2205.00352.
- [19] RAHMAN, A., 2024. Windshade roughness model for turbulent flow. arXiv:2406.05062.
- [20] LARSEN, P., 2023. Offshore wind farm roughness modeling. arXiv:2305.11817.
- [21] Cermak, J. E., 1982. Physical Modeling of the Atmospheric Boundary Layer (ABL) in Long Boundary-Layer Wind Tunnels (BLWT). In: *Proceedings of International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Application* (T. A. Reinhold, ed.). National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, and Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- [22] CRASTO, Giorgio., 2007. Numerical simulation of the Atmospheric Boundary Layer.
- [23] Hooff, van, T.A.J.. / Experimental and numerical analysis of mixing ventilation at laminar, transitional and turbulent slot Reynolds numbers. Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2012.
- [24] KRÁLIK, J., 2015. 3-D CFD Simulation of the Airflow over a Gable Roof with Different Elevations.
- [25] LOBOTKA, P., 2014. Modelovanie prirodzeného vetra a jeho kvantifikácia vo veternom tuneli.
- [26] Raupach, M. R. – Antonia, R. A. – Rajagopalan, S., 1991. Rough-wall turbulent boundary layers. *Applied Mechanics Reviews*, vol. 44, no. 1, pp. 1–25.
- [27] ANSYS Fluent, Theory Guide, Release 2021 R2, ANSYS Inc.
- [28] Lattau, A. G. – Businger, J. A., 1979. Further Developments in the Evaluation of the Surface Roughness. *Boundary-Layer Meteorology*, 16(1), 35–48.
- [29] Wikipedia contributors, "Planetary boundary layer,"Wikipedia, The Free Encyclopedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Planetary_boundary_layer.
- [30] ANSYS Inc., Fluent User's Guide, Release 2021 R2.
- [31] <https://www.archiscene.net/firms/office-buildings/1-bligh-street-wins-international-highrise-award-2012/> [vid 11.12.2012]

- [32] <https://www.bisnow.com/national/news/property-management/cable-snaps-elevator-plunges-occupants-trapped-at-chicagos-former-hancock-center>
[vid 19.11.2018]
- [33] <https://edition.cnn.com/travel/article/skyscraper-award/index.html>
[vid 20.5.2014]
- [34] <https://www.mfacade.com/capabilities/tall-building-facade-engineering/>
[online][vid 5.11.2014]
- [35] <http://www.skyscrapercenter.com/building/torre-pwc/1039> [vid 5.2.2019]
- [36] <http://www3.teraz.sk/ekonomika/narodna-banka-slovenska-dosiahla/381935-clanok.html> [vid 5.3.2019]
- [37] <https://www.wxyz.com/news/elevator-in-chicago-s-former-john-hancock-center-sky>
[vid 8.11.2018]
- [38] <https://www.dezeen.com/2014/02/28/dc-tower-dominique-perrault-austria-tallest->
[vid 28.2.2014]
- [39] STN EN 1991-1-4, 2006. Zaťaženia konštrukcií. Časť 1-4: Všeobecné zaťaženia. Zaťaženia vetrom, SUTN Bratislava.
- [40] <https://www.researchgate.net/figure/Percent-gradient-wind-surface-roughness-a->
[online][vid 10.2017]

Zoznam publikačnej činnosti

Autor: Samuel Cruz

1. PALKO, Milan - BOSÁK, Lukáš - BOHUNICKÝ, Bohuš - HOLLÝ, Ján - PALKOVÁ, Adela - CRUZ, Samuel - BLAŽO, Adam - KOVÁČ, Jozef - VAVROVIČ, Boris - FRANEK, Michal - RABENSEIFER, Roman - PAVČEKOVÁ, Monika - MAŇKOVÁ, Lucia - MINAROVÍČOVÁ, Katarína - HANULIAK, Peter - SZABÓ, Daniel - VARGOVÁ, Andrea - ŠUJANOVÁ, Paulína - ČEHEĽOVÁ, Dagmara - BIELEK, Boris - TOMAŠOVIČ, Peter - DRŽKA, Milan - DEÁKOVÁ, Karin. Selected laboratory instrumentation of building physics [elektronický zdroj]. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2017. CD-ROM, 130 s. ISBN 978-80-7204-968-4. Kategória publikácie do 2021: AAA
2. CRUZ, Samuel - PALKO, Milan. Modeling of surface roughness of building walls in CFD simulation and wind tunnel. In APABD 2018 [elektronický zdroj] : book of selected peer-reviewed papers from International Conference Architectural and Physical Aspects of Building Design. June 25, 2018, Mikulov, Czech Republic. 1. vyd. Brno : VUT - Brno University of Technology, 2018, CD-ROM, s. 135-139. ISBN 978-80-7204-999-8. Kategória publikácie do 2021: AFC
3. CRUZ, Samuel. Modelovanie povrchovej drsnosti obalového plášťa budov v CFD simuláciách a veternom tuneli. In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj]: 29th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 16th 2019, Bratislava. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2019, CD-ROM, s. 271-278. ISBN 978-80-227-4972-5. Kategória publikácie do 2021: AFD
4. CRUZ, Samuel - PALKO, Milan. Effect of geometry simplification on results in CFD simulations. In Nové poznatky ve vědě a výzkumu z oblasti pozemního stavitelství : 43. mezinárodní vědecká konference kateder a ústavů pozemního stavitelství, Velké Losiny, 10. - 12. září 2019. 1. vyd. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2019, S. 17-25. ISBN 978-80-248-4199-1. Kategória publikácie do 2021: AFC
5. CRUZ, Samuel - PALKO, Milan. Modeling of surface roughness of the buildings in CFD and wind tunnel. In Juniorstav 2020 [elektronický zdroj] : sborník příspěvků. 22. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno, ČR, 23. 1. 2020 = Juniorstav 2020, proceedings of the 22nd International Conference of doctoral Students. 1. vyd. Brno : ECON publishing, 2020, USB klíč, s. 85-90. ISBN 978-80-86433-73-8. Kategória publikácie do 2021: AFC

6. CRUZ, Samuel - PALKO, Milan. Atmosférická hraničná vrstva a jej simulácia. In Zborník článkov zostretnutia katedier konštrukcií pozemných stavieb 2023 [elektronický zdroj] : medzinárodné stretnutie katedier. Pezinok, 28. - 30. 6. 2023. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2023, CD-ROM, s. 146-152. ISBN 978-80-227-5383-8. Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: domáci; Kategória publikácie do 2021: AFD

7. PALKO, Milan - CRUZ, Samuel - PALKOVÁ, Adela - BOHUNICKÝ, Bohuš. Vybrané state z aerodynamiky budov : počítačové modelovanie a laboratórne merania. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2020. CD-ROM, 191 s. ISBN 978-80-7623-057-6. Kategória publikácie do 2021: ACA

8. PALKO, Milan - PALKOVÁ, Adela - KRIŽANOVÁ, Silvia - BLAŽO, Adam - CRUZ, Samuel - KLINCOVÁ, Veronika - CHLAŇ, Mário - KRÁĽOVÁ, Barbora. Koncept inteligentného a ekologického okna v kontexte klimatických zmien [elektronický zdroj]. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2023. CD-ROM, 509 s. ISBN 978-80-7623-120-7. Typ výstupu: knižná publikácia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie do 2021: BAA

Podané

1. CRUZ, Samuel, Milan – Palko, COMPARISON OF CPE VALUES FROM CFD AND WIND TUNNEL TESTING FOR VARIOUS SURFACE ROUGHNESSES, Slovak Journal of Civil Engineering SJCE-D-25-00030

2. CRUZ, Samuel, Milan – Palko, Substitution of Geometric Roughness with Software Parameters in CFD Simulations: Validation with Wind Tunnel Measurements, Wind and Structures 25M-06-041