

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

---

**Obtékání budov větrem kombinované  
s přenosem tepla**

DIPLOMOVÁ PRÁCE



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Budinka** Jméno: **Oldřich** Osobní číslo: **467301**  
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
 Zadávací katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**  
 Studijní program: **Strojní inženýrství**  
 Studijní obor: **Technika životního prostředí**

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Obtékání budov větrem kombinované s přenosem tepla**

Název diplomové práce anglicky:

**Wind Flow Around Buildings Combined With Heat Transfer**

Pokyny pro vypracování:

Použijte publikovanou a validovanou studii obtékání budov větrem. Na jejím základě sestrojte model proudění vzduchu pro simulaci metodou CFD včetně správně zvolených okrajových podmínek. Na ověřeném modelu proudění vzduchu následně analyzujte způsoby modelování přenosu tepla z hlediska jeho vlivu na tepelné prostředí v oblasti pohybu chodců v okolí budov.

Seznam doporučené literatury:

Jaňour Z. Modelování mezní vrstvy atmosféry. Praha : Karolinum, 2001 (nebo pozdější vydání).  
 Blocken B., Carmeliet J., Stathopoulos T. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings – effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (95) 2007, s. 941-962.  
 Ansys Fluent Theory Guide. Canonsburg (PA) : ANSYS Inc., 2021.  
 Ansys Fluent User's Guide. Canonsburg (PA) : ANSYS Inc., 2021.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Martin Barták, Ph.D., ústav techniky prostředí FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **27.10.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **06.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Ing. Martin Barták, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Souhrn**

Diplomová práce se zabývá CFD simulacemi proudění a přenosu tepla v okolí budov. Byla použita publikovaná a validovaná CFD studie zabývající se prouděním kolem dvou budov, zejména nárůstem rychlosti v průchodu mezi budovami způsobeným Venturiho efektem. Studie byla úspěšně reprodukována a doplněna o nové poznatky ohledně použití okrajových podmínek a jejich vlivu na výsledky simulací. V další části práce byl model dvou budov obtékaných větrem převeden z měřítka 1:40 do plného měřítka a podroben detailní analýze. Byly porovnány výsledky studie v plném měřítku se studií v měřítku 1:40, z toho byly doplněny nové poznatky při převádění modelu do plného měřítka. Poslední část práce je věnována rozšíření modelu proudění v plném měřítku o simulace přenosu tepla se zaměřením na solární radiaci a dlouhovlnné sálání proti obloze. Bylo prokázáno, že sálání mezi povrchy budov a oblohou má významný vliv na vnější povrchové teploty střech i stěn budov.

## **Summary**

The thesis deals with CFD simulations of flow and heat transfer in the surroundings of buildings. A published and validated CFD study was used to investigate the flow in the vicinity of two buildings, in particular the increase of velocity in the passage between the buildings caused by the Venturi effect. The study has been successfully reproduced and updated with new findings regarding the use of boundary conditions and their effect on the final results. In the next part of the work, the model of two buildings in wind flow was converted from 1:40 scale to full scale and analyzed further in details. The results of the full-scale study were compared with the 1:40 scale study, which revealed new insights about the model conversion to full scale. The last part of the thesis deals with the full-scale flow model extended by heat transfer simulations with the focus on solar radiation and longwave radiation against the sky. It was proved that heat radiation between the building surfaces and sky has a significant influence on the external surface temperatures of buildings' roofs and walls.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Obtékání budov větrem kombinované s přenosem tepla“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Bartáka, Ph.D., s použitím literatury uvedené v seznamu na konci mé diplomové práce.

V Praze 5. 1. 2022

Oldřich Budinka

## PODĚKOVÁNÍ

Opravdu velký dík patří za odborné vedení, konzultace a čas, který mi věnoval, vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Bartákovi, Ph.D. Dále děkuji své rodině za její podporu během studia.

## Obsah

Seznam použitého značení.....	8
1 Úvod .....	9
2 Mezní vrstva atmosféry .....	10
2.1 Teplota vzduchu v mezní vrstvě atmosféry .....	12
2.2 Radiační a tepelná bilance zemského povrchu.....	13
2.3 Modelování mezní vrstvy atmosféry v aerodynamických tunelech.....	14
3 Použití CFD simulací proudění a přenosu tepla v městském prostředí.....	16
3.1 Velikost výpočetní oblasti.....	16
3.2 Numerická síť.....	18
3.3 Okrajová podmínka pro vstup .....	19
3.4 Okrajová podmínka pro stěny budov .....	20
3.5 Okrajová podmínka pro horní hranici výpočetní domény .....	20
3.6 Okrajová podmínka pro boční stěny výpočetní domény.....	20
3.7 Modelování slunečních zisků v CFD .....	21
3.8 Model sálání S2S.....	22
4 Studie Blocken et al. [8] .....	23
4.1 Rychlostní profil.....	24
4.2 Turbulentní kinetická energie .....	24
4.3 Rychlost disipace kinetické energie turbulence .....	25
4.4 Okrajové podmínky modelu bez budov .....	25
5 Reprodukce studie Blocken et al. [8] .....	26
5.1 Deformace profilů veličin pod vlivem okrajových podmínek .....	27
5.2 Porovnání okrajových podmínek .....	29
5.3 Vliv horizontální nehomogenity proudění .....	32
5.4 Výsledky větrné studie v měřítku 1:40 .....	34
5.5 Diskuze k volbě okrajových podmínek.....	37
6 Převedení modelu do plného měřítka .....	38
6.1 Výsledky větrné studie v plném měřítku .....	41
6.2 Diskuze k převedení modelu do plného měřítka.....	41
7 Model radiace a jeho nastavení ve Fluentu .....	42
7.1 Nastavení okrajových podmínek pro přenos tepla zeminou .....	44
7.2 Nastavení okrajových podmínek pro přenos tepla stěnami a střechami .....	45

7.3	Nastavení okrajových podmínek pro přenos tepla pro hranice výpočetní oblasti	46
7.4	Zahrnutí vlivu oblohy do tepelné bilance zemského povrchu .....	47
7.5	Výsledky větrné studie rozšířené o přenos tepla.....	49
8	Porovnání výsledků z Fluentu s výsledky z ESP-r.....	56
9	Diskuze k použití solárního modelu a sálání vůči obloze .....	58
10	Závěr .....	59

**Seznam použitého značení**

$g$	tíhové zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
$I_u$	intenzita turbulence	
$k$	Turbulentní kinetická energie (TKE)	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$K_S$	fyzikální výška drsnosti	[m]
$p$	tlak vzduchu	[Pa]
$T$	teplota vzduchu	[°C]
$t$	čas	[s]
$u$	složka rychlosti, rychlost větru	[m/s]
$U$	složka rychlosti, rychlost větru	[m/s]
$u_{ABL}^*$	třecí rychlost v mezní vrstvě atmosféry	[m/s]
$y$	vertikální výška	[m]
$y_0$	aerodynamická délka drsnosti	[m]
$\varepsilon$	rychlost disipace turbulentní kinetické energie	[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$\kappa$	součinitel teplotní vodivosti vzduchu	[m <sup>2</sup> /s]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	[W/mK]
$\nu$	kinematická viskozita vzduchu	[m <sup>2</sup> /s]
$\Omega$	úhlová rychlost rotace Země	[1/s]

**Použité zkratky**

TKE	turbulentní kinetická energie
ABL	atmospheric boundary layer
MVA	mezní vrstva atmosféry



# 1 Úvod

Velká města se od venkovských oblastí liší tím, že mají často mnohem vyšší budovy, které jsou více vystavené účinkům větru. Ve velkých městech je méně zemní vlhkosti a vegetace, což má za následek nižší intenzitu odpařování. Schopnost odrážet sluneční záření je silně závislá na vztahu mezi polohou slunce a uspořádáním „uličních kaňonů“. Dalším vlivem jsou vyšší emise znečišťujících látek a teplo, které vzniká činností člověka. Všechny tyto efekty způsobují, že centrum města je teplejší než jeho okolí, vzniká tzv. městský tepelný ostrov.

Mezi výškovými budovami je proudění strháváno do úrovně chodců, kde se urychluje a má negativní vliv na komfort lidí, kteří v oblastech s výškovou zástavbou tráví čas. V úplavu za budovami často může vzniknout proudění, kde se přízemní proud větru odchýlí směrem vzhůru a může tak znečišťující látky transportovat z ulice až k otevřeným oknům.

Z bezpečnostních a komfortních hledisek je vhodné provést důkladnou analýzu proudění větru zastavěného území, kterou můžeme vyhodnotit a identifikovat tak možné rizikové oblasti z hlediska tepelné pohody chodců a jejich bezpečnosti. Další významná motivace pro modelování proudění větru v zastavěných oblastech je pochopení rozptylu znečišťujících příměsí v městských aglomeracích a určení sil působících na budovy při obtékání proudem vzduchu.

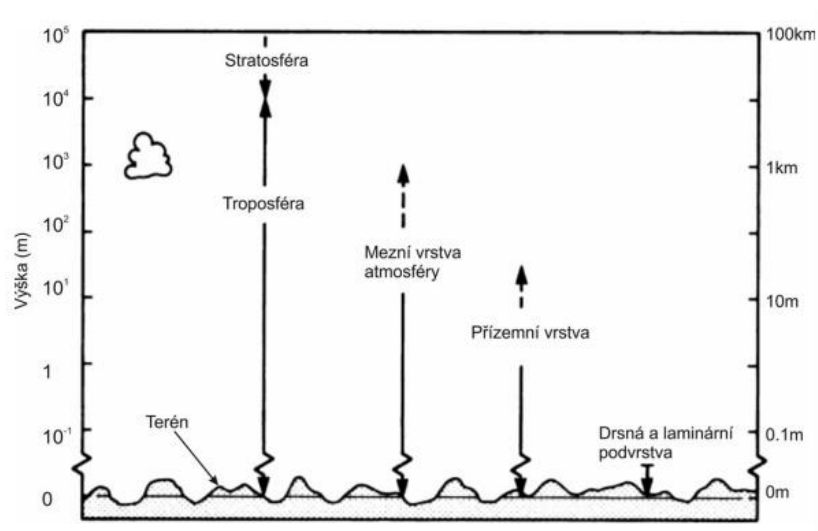
Tato práce se zabývá prouděním a přenosem tepla v okolí budov. Jedna z možností analýzy projektu městské zástavby z hlediska proudění větru je měření v aerodynamickém tunelu. Vzhledem ke konstrukčnímu řešení měřicí sekce takového tunelu je prakticky nemožné do experimentu zahrnout vliv solární radiace. Snazší metodou, která je často výhodnější i z finančního hlediska, jsou simulace souhrnně nazývané počítačová mechanika tekutin (CFD).

V poslední době se řada prací věnuje nejen simulacím obtékání budov větrem, ale také tepelnému prostředí a komfortu osob v exteriéru budov. Do CFD simulací je možné zahrnout všechny způsoby přenosu tepla včetně solární radiace a s ní spojené ohřívání povrchů budov. Provede-li se CFD studie pro navrhovanou zástavbu území, tak opatřeními v podobě např. přidání zeleně, lze v letních měsících předejít přílišnému přehřátí ulic a jevu uličních kaňonů, tedy vzniku nekomfortních oblastí pro chodce.

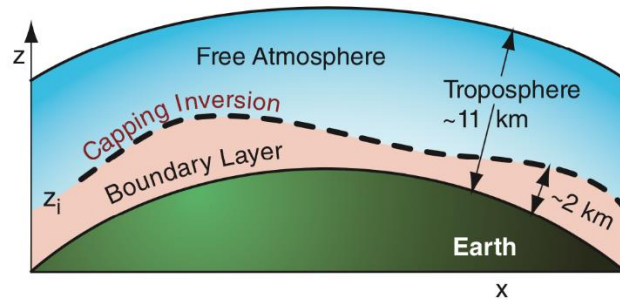
## 2 Mezní vrstva atmosféry

Zemský povrch je spodní hranicí atmosféry. Část atmosféry, která je nejvíce ovlivněná zemským povrchem, se nazývá mezní vrstva atmosféry (zkr. MVA) nebo zkráceně mezní vrstva. Jedná se o nejnižší část troposféry, kde je pohyb vzduchu určen vzájemnou interakcí sil třecích se silami tlakovými, tíhovou, vztlakovou a Coriolisovou. Vedle smykového napětí se napříč mezní vrstvou mění i poměr třecí a Coriolisovy síly. S rostoucí výškou se Coriolisova síla stává více dominantní a způsobuje stáčení větru na severní polokouli směrem doprava. Tloušťka mezní vrstvy je poměrně proměnlivá v prostoru a čase a závisí především na topografii terénu. Je tím větší, čím je povrch drsnější a roste také se zvětšující se rychlostí proudění vzduchu. [5, 6]

Za normálních podmínek je tloušťka mezní vrstvy 1 až 2 km (zabírající 10 až 20 % troposféry), ale její tloušťka se může pohybovat od desítek metrů až do více než 4 km. V blízkosti povrchu se nachází přízemní podvrstva, ve které je dominantní smykové napětí a účinky Coriolisovy síly jsou zde zanedbatelné, tu dělíme na podvrstvu drsnou a laminární. Přibližná tloušťka přízemní vrstvy se pohybuje od 50 do 100 m. Drsnou podvrstvu charakterizuje drsnost povrchu a přibližně platí, že je 1 až 3x větší než průměrná výška výčnělků povrchu. Laminární (vazká) podvrstva je v přímém kontaktu s povrchem, na kterém ulpívá, a její tloušťka je několik milimetrů. [3, 5, 6]



Obr. 1 Vertikální rozdělení atmosféry [5]

Obr. 2 Mezní vrstva s její horní hranicí  $z_i$  [3]

Za pěkného počasí, které je spojené s vysokým tlakem, jsme zvyklí na denní cyklus měnící se teploty, vlhkosti, koncentrace pylu a rychlosti větru, které jsou řízené fyzikou a dynamikou mezní vrstvy. V noci je chladno bez výrazných poryvů větru, během dne naopak teplo s výraznějšími poryvy. Mezní vrstva je nestabilní, kdykoli je zemský povrch teplejší než vzduch. To je například situace za slunečného dne s lehkými větry nad zemí, nebo když studený vítr horizontálně proudí nad teplejší vodní hladinou. Jedná se o nestabilní stav a malý počáteční impuls může vést k významným vertikálním pohybům ve vzduchové hmotě. Mezní vrstva je ve stavu volné konvekce, se silnými stoupajícími a klesajícími vzdušnými proudy.

Naopak mezní vrstva je stabilní, když je zemský povrch chladnější, než je vzduch, například při jasné noci, nebo když horký vzduch proudí nad studenou vodní hladinou. Při takovém stabilním stavu jsou vertikální pohyby v atmosféře bržděny a promíchávání vzduchu se tlumí. Neutrální mezní vrstvy (indiferentní stav) se tvoří za větrného, zataženého počasí a jsou ve stavu nucené konvekce.

Další případ může nastat, když se turbulence a statická stabilita se spojují do silné stabilní vrstvy, pod kterou je mezní vrstva a nad ní zbytek troposféry nazývaný volná atmosféra (viz Obr. 2). Tato silná stabilní vrstva pod sebou zachycuje turbulence, znečišťující látky a vlhkost a brání tak povrchovému tření, aby ovlivnilo volnou atmosféru nad ní. [3]

Turbulence je v mezní vrstvě všudypřítomná a je zodpovědná za rozptyl znečišťujících látek. Nicméně inverze (capping inversion na Obr. 2) zachycuje tyto znečišťující látky v mezní vrstvě a ty se nemůžou rozptýlit do vyšších vrstev atmosféry čímž, dochází k nahromadění škodlivin tzv. smogu v mezní vrstvě atmosféry. [3, 6]

## 2.1 Teplota vzduchu v mezní vrstvě atmosféry

V nejspodnějších vrstvách atmosféry je teplota vzduchu ovlivněna tokem energie od zemského povrchu, který je způsoben denní proměnlivostí příkonu slunečního záření, čímž vzniká charakteristický denní chod teploty vzduchu.

Když se zaměříme na tenkou vrstvu vzduchu u zemského povrchu (cca do výšky 1,5m), tak v této části mezní vrstvy je vliv zemského povrchu nejintenzivnější. Zde má velký vliv bezprostřední kontakt vzduchu s povrchem a tření. Díky tření výrazně klesá rychlost větru směrem k povrchu, tím pádem nedochází k významnému promíchávání vzduchu jako ve vyšších vrstvách mezní vrstvy, kde se prostorové rozdíly teploty vzduchu mají tendenci vyrovnávat.

Zemský povrch silně ovlivňuje teplotu vzduchu v jeho bezprostřední blízkosti, z toho plyne závislost teploty na lokálních vlastnostech povrchu. Důležitý je druh půdy, její fyzikální vlastnosti, mikro-reliéf a celkový tvar povrchu. Zvláště pak případný rostlinný porost a jeho charakter má zásadní vliv. Přítomnost vegetace způsobuje zmírnění denní amplitudy teploty v přízemní vrstvě vzduchu. Oproti tomu povrch bez rostlinné pokrývky vykazuje mnohem výraznější rozdíly denních a nočních teplot. Pokud jde o reliéf terénu, tak údolí, kotliny či pánve budou mít spíše větší denní amplitudy přízemní teploty než vrcholové části terénu. To je dáno větším prohříváním konvexních tvarů reliéfu během dne a stékáním chladnějšího (těžšího) vzduchu po svazích během noci. [11]

Vertikální teplotní gradient v mezní vrstvě atmosféry není závislý jen na radiačních poměrech, ale také na intenzitě turbulence, která teplotní rozdíly vyrovnává. Dobře lze pozorovat denní i roční chod vertikálního teplotního gradientu do výšky 500 m. Nejvýraznější změny lze zaznamenat právě do první stovky metrů. Do určité míry se však vliv povrchu na vertikální teplotní profil promítá v celém rozsahu mezní vrstvy. Ve výšce zhruba 2 km se bude hodnota gradientu pohybovat v rozsahu 0,5 až 0,6 °C/100 m a denní amplituda teploty nebude převyšovat 1-2 °C. [13]

## 2.2 Radiační a tepelná bilance zemského povrchu

Pro určení denních průběhů teplot spodních vrstev atmosféry jsou podstatné teplotní poměry zemského povrchu. Aktuální energetická bilance zemského povrchu teplotu mezní vrstvy z velké míry ovlivňuje.

Radiační a tepelná bilance zemského povrchu vychází z faktu, že Slunce a Země jsou tělesa, která vyzařují energii. Sluneční vyzařování je krátkovlnné to znamená, že podstatná část záření má vlnovou délku kratší než 1  $\mu\text{m}$ . Zemský povrch tak atmosférou, která je dobře propustná pro krátkovlnnou radiaci, přijímá teplo absorpcí slunečního záření. Oproti tomu vyzařování zemského povrchu je dlouhovlnné.

V případě bezoblačné oblohy prochází atmosférou až 70 % slunečního záření, které je následně absorbováno zemským povrchem. Naopak vyzařováním dlouhovlnné radiace zemský povrch teplo ztrácí. Dlouhovlnné záření však atmosféra do velké míry pohlcuje a znovu odráží směrem k zemskému povrchu, díky tomuto jevu nedochází k tak velkým tepelným ztrátám a teplota Země je vyšší, než by odpovídalo radiační rovnováze.

Sluneční záření dopadající na zemský povrch může být přímé a difuzní, které vzniká rozptylem přímého záření na molekulách vzduchu, vodních kapičkách či dalších částicích v atmosféře. [11]

Sálání mezi Zemí a oblohou můžeme přibližně uvažovat jako sálání šedých těles o povrchových teplotách  $T_z$  (Země) a  $T_{am}$  (atmosféra). Sálání mezi povrchy budov (zejména střech) a oblohou lze uvažovat podobně jako sálání Země – obloha, s tím rozdílem, že povrchy budov budou vyzařovat vůči obloze větší intenzitou než Země z důvodu vyšších povrchových teplot. [12]

### 2.3 Modelování mezní vrstvy atmosféry v aerodynamických tunelech

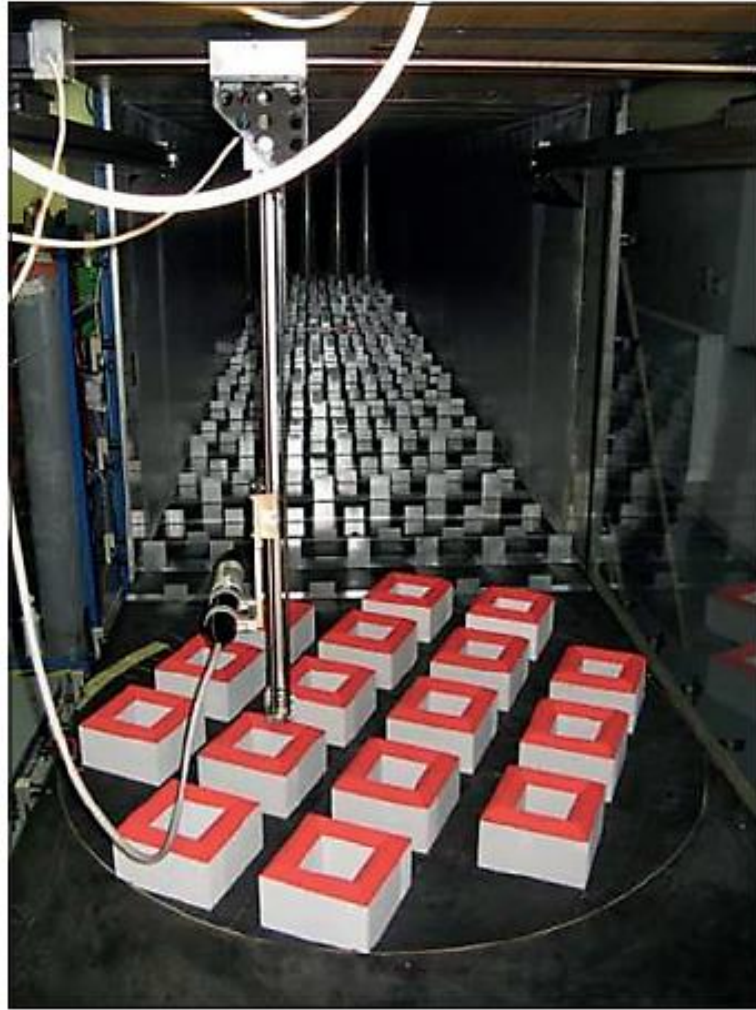
Z popisu mezní vrstvy atmosféry (kap. 2) je zřejmé, že možnosti řešení proudění a difúze v MVA jsou poměrně omezené. Protože se jedná o složité procesy s velkým množstvím závisle proměnných, provedení analýzy je obtížné a měření v reálném prostředí jsou nákladná a lze z nich zjistit pouze dílčí informace. [5]

Proto se používají metody modelování matematické a fyzikální. Matematické jsou založené na numerickém řešení soustavy pohybových rovnic, a fyzikální jsou založené na kritériích podobnosti daného proudění. Fyzikální modelování mezní vrstvy atmosféry znamená vytvoření mezní vrstvy na stěně aerodynamického tunelu, která je aerodynamicky a termodynamicky podobná reálné mezní vrstvě atmosféry.

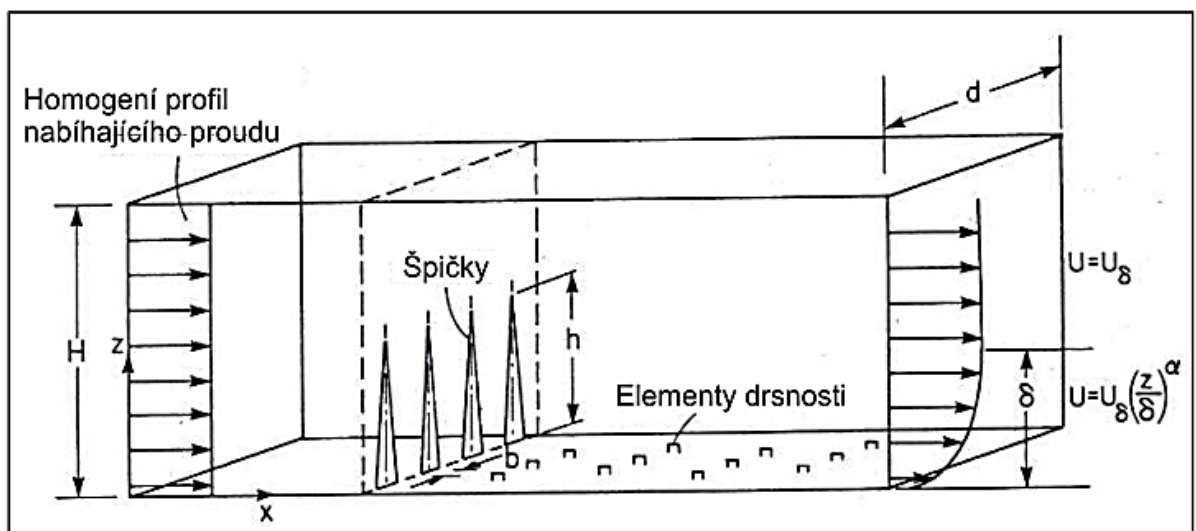
Podobnostní analýza vychází z rovnic zachování hybnosti, zachování energie a rovnice kontinuity. Pro tyto rovnice je nutné uvažovat neinerciální vztažnou soustavu rotující spolu se Zemí úhlovou rychlostí  $\Omega$ . [5]

Pro fyzikální modelování MVA se v současné době používají dva typy aerodynamických tunelů. Jedním typem jsou dlouhé tunely, ve kterých se vyvíjí mezní vrstva přirozeně nad hladkým nebo zdrsňným povrchem. Typická délka testovací sekce se pohybuje až kolem 30 m. Dlouhé tunely byly dříve upřednostňovány před kratšími, protože v nich dochází k přirozenému vývoji mezní vrstvy. Využívají se prakticky pouze pro jeden typ mezní vrstvy. Druhým typem jsou krátké tunely, kde pomocí generátorů turbulence (Obr. 4) a elementů drsnosti (Obr. 3 a Obr. 4) lze vyvinout více typů mezních vrstev s konstantními vlastnostmi turbulence. Další jejich výhodou je potřeba menšího prostoru a nižší pořizovací náklady.

Dlouhé i krátké tunely mohou být otevřené (vzduch je nasáván/ vyfukován z/do okolí) nebo uzavřené (vzduch cirkuluje v uzavřeném vzduchovodu). Pokud mají simulovat vertikální stratifikaci v MVA, je zapotřebí, aby byl tunel vybaven i ohřívacími a chladicími prvky. [6]



Obr. 3 Idealizovaný model městské zástavby v měřítku 1:400 umístěný v aerodynamickém tunelu ÚT AV ČR v Novém Kníně [5]



Obr. 4 Nákres generátorů turbulence a elementů drsnosti v části aerodynamického tunelu kde se vyvíjí mezní vrstva [6]

### **3 Použití CFD simulací proudění a přenosu tepla v městském prostředí**

Při použití metody CFD pro studii proudění v městském prostředí je nutné postupovat dle určitých poznatků a metodik, které se v průběhu let ukázaly jako nejvhodnější. Přehlednou sumarizaci těchto poznatků lze nalézt v literatuře [15].

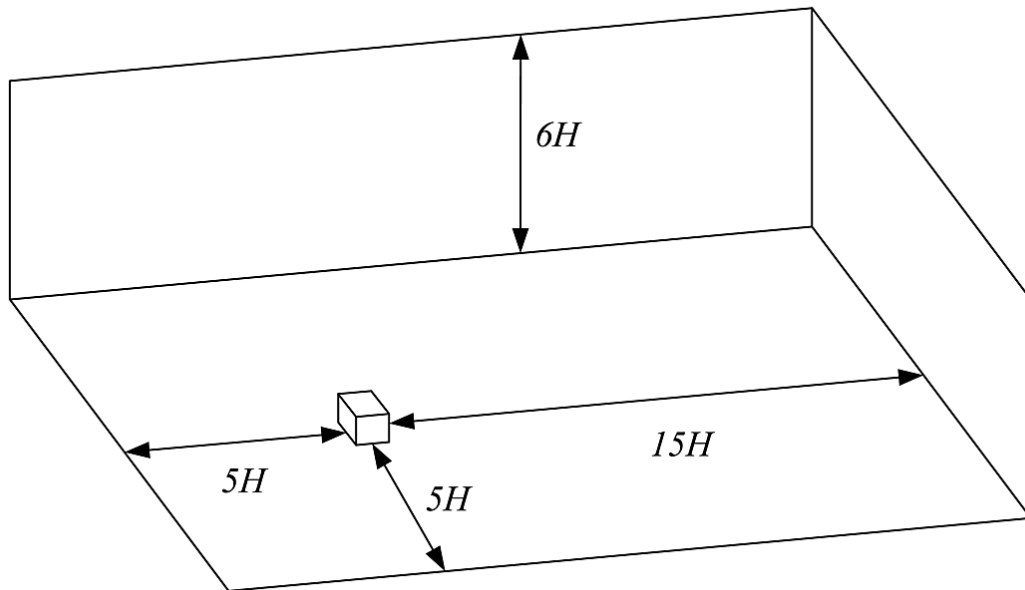
Největší vliv na proudění větru má většinou rozmístění budov a jejich velikost. Mezi sekundární faktory ovlivňující městskou oblast patří vegetace, členitost terénu (orografie) a vlastnosti povrchu (silnice, tráva, písek). Budovy ve větší vzdálenosti mohou být obvykle reprezentovány jako jednoduché bloky. Zkoumaná centrální oblast by měla být reprodukována co nejpodrobněji, čímž se přirozeně zvyšuje počet buněk numerické sítě, které jsou nutné k rozlišení detailů. Z toho důvodu se omezuje počet detailů, které nemají zásadní vliv na celkové proudění. Pro posouzení vlivu vynechání detailů lze provést simulace s detaily a s vynecháním detailů a příslušné výsledky porovnat. [26, 29]

#### **3.1 Velikost výpočetní oblasti**

Podobně jako u simulace v aerodynamickém tunelu, kde nelze použít pouze měřicí sekci. Stejně i v CFD nemůžeme použít pouze model budov a jeho blízké okolí, který nás zajímá. Musí se do modelu přidat i širší okolí, které bude vytvářet nabíhající profily a nebude svými hranicemi ovlivňovat proudění v oblasti, která nás zajímá. Výpočetní oblastí se tedy nemyslí pouze model budov, u kterých provádíme analýzu. Mimo oblasti kolem budov navíc musíme reprezentovat i vliv okolí a k tomu je nutné dodržovat určitá pravidla, která jsou zmíněná níže.

Rozměry celé výpočetní oblasti závisí na geometrii území, které je zkoumáno a na okrajových podmínkách, které budou nastaveny. Výpočetní oblast by měla být ve tvaru kvádrů nebo krychle. Ze zkušenosti se simulacemi v aerodynamických tunelech vyplývá, že budova s výškou  $H$  bude mít minimální vliv, pokud je její vzdálenost od zkoumané oblasti větší než  $6-10 H$ . [15]





Obr. 5 Výpočetní doména s doporučenými rozměry pro malé a středně vysoké budovy [32]

Pro výšku domény je stanovena minimální hodnota  $5 H_{\max}$  (kde  $H_{\max}$  je výška nejvyšší budovy) nad úrovní terénu, pokud je výška a šířka budov přibližně stejná. V opačném případě použijeme výšku domény  $6 H_{\max}$ . [16, 17]

V části výpočetní domény před modelem budov (návětrná strana) použijeme jako minimum  $5 H_{\max}$  a za modelem budov (závětrná strana)  $15 H_{\max}$ . Pro více budov máme zkušenosti pouze s experimenty v aerodynamickém tunelu, kde používáme geometrii tunelu jako výšku a šířku výpočetní oblasti. Doplnující informace lze nalézt v literatuře [15]. Zajímavé a doplňující poznatky o velikosti výpočetní domény pro vyšší budovy uvádí studie [32].

### 3.2 Numerická síť

Pro simulaci proudění ve výšce chodců by měly být dodrženy následující požadavky [8]:

- (1) Dostatečně vysoké rozlišení sítě ve vertikálním směru v blízkosti zemského povrchu
- (2) Horizontálně homogenní náběžný rychlostní profil
- (3)  $y_p$  středového bodu P buňky přiléhající ke stěně (zemskému povrchu), musí být větší než fyzikální (nebo geometrická) výška drsnosti ( $y_p > K_S$ ).
- (4) Vztah mezi fyzikální výškou drsnosti  $K_S$  a aerodynamickou délkou drsnosti  $y_0$  znamená, že  $y_0$  je pouze malým zlomkem  $K_S$  ( $K_S \approx 30y_0$ )

První požadavek je důležitý pro všechny studie výpočetního větrného inženýrství, zejména pro ty, které se zaměřují na větrné prostředí chodců. Přízemní vrstva do výšky chodce (1,75 nebo 2 m v plném měřítku), by měla být rozdělená na dvě až tři vrstvy buněk numerické sítě.

Druhý požadavek znamená, že profily proudění nastavené na vstupu a procházející výpočetní oblastí by měly zůstat bez jakýchkoli gradientů ve směru proudění, přinejmenším až do místa, kde se nachází model budov.

Třetí požadavek znamená, že není fyzikálně smysluplné, aby buňky sítě měly středové body uvnitř fyzikální výšky nerovnosti. Při tvorbě numerické sítě je třeba zohlednit u velikosti buněk u povrchu i velikost drsnosti.

Čtvrtý požadavek říká, že u drsného povrchu je nutností zahrnout empirické informace o drsnosti terénu (drsnost spodní hranice výpočetní domény) do simulace. To obecně vyžaduje použití stěnových funkcí, přinejmenším pro spodní hranici výpočetní oblasti. Obvykle se to provádí tak, že se na stěnové funkce použije modifikace pro drsný povrch. [8, 15, 27]

### 3.3 Okrajová podmínka pro vstup

Na vstupu výpočetní domény je obvykle předepsána rovnovážná mezní vrstva ve vzdálenosti na úrovni  $5H_{\max}$ . [5]

Střední rychlostní profil se obvykle získá z logaritmického profilu daného vztahem (5), který je funkcí aerodynamické délky drsnosti  $y_0$  [4],

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left( \frac{y+y_0}{y_0} \right) \quad (5)$$

nebo pomocí mocninného zákona s příslušným exponentem, který jsem použil v této práci (kap. 4.1).

Kinetická energie turbulence je dána vztahem (6) a disipace turbulence vztahem (7).

$$k = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{(u^*)^3}{\kappa(y + y_0)}, \quad (7)$$

kde  $u^*$  [m/s] je třecí rychlost,

$\kappa$  [-] je Karmánova konstanta (0,42),

$y$  [m] je výška nad zemí

$C_\mu$  [-] je konstanta (0,09)

### 3.4 Okrajová podmínka pro stěny budov

U pevných stěn se pro rychlosti použije okrajová podmínka pro hladkou stěnu bez skluzu (nulová rychlost na stěně). Z pohledu výpočetní sítě je nutné splnit požadavky pro použití stěnových funkcí, které jsou uvedené v kap. 3.2 Numerická síť.

### 3.5 Okrajová podmínka pro horní hranici výpočetní domény

Volba horní okrajové podmínky je velmi důležitá pro udržení rovnováhy profilů mezní vrstvy. Ty se obvykle odvozují za předpokladu, že nad mezní vrstvou je konstantní smykové napětí. Proto se předepisuje konstantní smykové napětí v horní části, aby se zabránilo horizontálním změnám od přítokových profilů. Další možností je předepsat hodnoty rychlostí a turbulentních veličin přítokového profilu ve výšce horní hranice na celé horní hranici.[18]

Symetrické okrajové podmínky, které vynucují paralelní proudění tím, že nastavují nulovou složku rychlosti kolmo k hranici, předepisují nulové normálové derivace pro všechny ostatní proměnné. Symetrie by se měla použít pouze tehdy, pokud je horní hranice domény mimo mezní vrstvu. Totéž platí i pokud je horní hranice řešena jako odtoková hranice, což umožňuje normálovou rychlostní složku na této hranici.

Mají-li být výpočty porovnány s měřeními v aerodynamickém tunelu získanými v uzavřeném zkušebním úseku, pak by se měla horní hranice umístěná v poloze horní stěny aerodynamického tunelu považovat za pevnou stěnu. [15]

### 3.6 Okrajová podmínka pro boční stěny výpočetní domény

Často se používají symetrické okrajové podmínky na úrovni bočních hranic, pokud je s nimi proudění rovnoběžné. V případě, že je třeba simulovat různé směry větru ve stejné výpočetní oblasti, boční hranice se stávají hranicemi přítoku a odtoku s odpovídajícími parametry.

Protože symetrické okrajové podmínky vynucují rovnoběžné proudění tím, že vyžadují nulovou normálovou složku rychlosti v bodě hranice, měla by být hranice umístěna

dostatečně daleko od zastavěné oblasti, aby nedocházelo k umělému zrychlování proudění v místech, která jsou předmětem analýzy.

Mají-li se výpočty porovnávat s měřeními v aerodynamickém tunelu, která byla získána v uzavřené měřicí sekci, měly by se horní a boční hranice považovat za pevné stěny, alespoň v těch případech, kdy je měřicí sekce tak malá, že její průtočný průřez ovlivňuje měření. [15]

### **3.7 Modelování slunečních zisků v CFD**

Solární model byl v této práci využit k posouzení vlivu oblohy na výslednou tepelnou bilanci povrchů budov. Algoritmus sledování paprsků lze použít k předpovědi přímého zdroje energie, který je výsledkem dopadajícího slunečního záření. Algoritmus vezme paprsek, který je modelován pomocí vektoru polohy slunce a parametrů oslunění, aplikuje jej na libovolný počet stěn nebo na okrajové plochy. Provede analýzu zastínění, aby určil dobře definované stíny na všech okrajových plochách a vnitřních stěnách, a vypočítá tepelný tok, který je výsledkem dopadajícího záření. Výsledný tepelný tok vypočtený algoritmem sledování slunečních paprsků je spojen s výpočtem v programu ANSYS Fluent prostřednictvím zdrojového členu v energetické rovnici.

Vektor polohy slunce a intenzita slunečního záření mohou být zadány přímo uživatelem, nebo jej lze vypočítat ze solárního kalkulátoru. Parametry přímého a difúzního ozáření lze také zadat pomocí uživatelsky definované funkce (UDF) a připojit je k programu ANSYS Fluent v dialogovém okně radiačního modelu.

Algoritmus pro sledování slunečních paprsků zohledňuje také tepelné zisky způsobené difúzním zářením. Sleduje se odražená složka přímého slunečního záření. Část tohoto sálavého tepelného toku, tzv. vnitřně rozptýlená energie, se aplikuje na všechny povrchy, které se účastní výpočtu solárních zisků. [14]

### 3.8 Model sálání S2S

Model S2S lze použít k výpočtu přenosu tepla záření v systému šedých difúzních povrchů. Výměna energie mezi dvěma povrchy závisí na jejich velikosti, vzdálenosti a orientaci. Tyto parametry jsou zohledněny geometrickou funkcí nazývanou úhlový součinitel.

Model S2S předpokládá, že všechny povrchy jsou šedé a difúzní. Pokud na povrch dopadá určité množství záření, pak se část odrazí a část pohltí. Hlavním předpokladem modelu S2S je, že jakákoli absorpce nebo rozptyl záření prostředím jsou zanedbatelné. Proto se používá pouze metoda "z povrchu na povrch", která při analýze nebere v úvahu vliv prostředí mezi povrchy.

Pro většinu aplikací jsou dotyčné povrchy pro tepelné záření (v infračerveném spektru) neprůhledné, proto lze povrchy považovat za neprůhledné. Pro šedé, difúzní a neprůhledné povrchy platí předpoklad, že emisivita je rovna pohltivosti.

Při použití modelu S2S je také možnost definovat "částečné uzavření". Tato možnost umožňuje vyřadit výpočet úhlových součinitelů pro stěny se zanedbatelným vyzařováním/pohlcováním. Hlavní výhodou této možnosti je urychlení výpočtu úhlových součinitelů a výpočet radiosity. [22, 23]

## 4 Studie Blocken et al. [8]

B. Blockenem, J. Carmelietem a T. Stathopoulosem byla provedena numerická studie rychlosti větru v průchodech mezi rovnoběžnými budovami pomocí počítačové mechaniky tekutin (CFD). Ověření CFD bylo provedeno porovnáním výsledků CFD simulace s odpovídajícími hodnotami získanými měřeními v aerodynamickém tunelu.

Měření v aerodynamickém tunelu provedená Stathopoulosem a Stormsem (1986) byla použita pro validaci modelu. Měření v aerodynamickém tunelu byla provedena v měřítku 1:400 v mezní vrstvě v aerodynamickém tunelu „Centre for Building Studies“ (CBS), výsledky byly publikovány v článku [20].

Tato měření byla vybrána proto, že autoři jasně uváděli náběžné vertikální hodnoty rychlosti větru a intenzity turbulence a nikoliv profily "přibližovacího proudění". V článku [20] jsou náběžné profily v aerodynamickém tunelu definovány stejným způsobem, který je vhodný pro použití v CFD. Profily naměřené v prázdném aerodynamickém tunelu v místě, kde budou umístěny budovy. Takzvané "přibližovací" profily jsou profily naměřené v určité vzdálenosti před modelem, mimo oblast proudění, které je narušené modelem budov. [8, 20, 24]

Studie ukazuje, že přesná CFD simulace homogenního proudění v mezní vrstvě atmosféry souvisejícího s obtékáním budov může být vážně ohrožena použitím stěnových funkcí s modifikací pro drsný povrch. Kromě toho výsledky simulace naznačují, že přinejmenším pro zde studované případy je zvýšení rychlosti větru v průchodech výrazné pouze na úrovni chodců a zrychlení v průchodu je pro tuto konfiguraci nepatrné, což naznačuje, že takzvaný Venturiho efekt je poměrně slabý. [8]

Studie [8] byla provedena v měřítku 1:40. Právě kombinace měřítka, hodnoty  $y_p$  a níže uvedené referenční rychlosti větru  $U_0$  získané z měřeních v aerodynamickém tunelu dává správnou hodnotu bezrozměrné vzdálenosti  $y^+$  pro použití stěnových funkcí ( $30 < y^+ < 100$ ), aniž by bylo nutné měnit referenční rychlost větru nebo rozlišení sítě pro tento účel. „*Simulace ve zmenšeném měřítku jsou v pořádku, protože obecně lze proudění kolem budov považovat za nezávislé na Reynoldsově čísle.*“ [8]

Tuto studii jsem si vybral, protože zde byly výsledky měření z aerodynamického tunelu validovány a porovnány s výsledky získanými pomocí metody CFD. Studie udává přesné hodnoty potřebné k sestrojení odpovídající numerické sítě. Dále pak udává přesné hodnoty profilů rychlosti, TKE a rychlosti disipace TKE a přesné požadavky na sestrojení numerické sítě. Byly zde porovnávány zesilující faktory v ose průchodu mezi budovami ve výšce 0,05 m v měřítku 1:40 (2 m v plném měřítku) získané měřením v aerodynamickém tunelu simulacemi metodou CFD. Zesilující faktor je definován jako poměr průměrné rychlosti větru v určitém místě s přítomností budov, ku průměrné rychlosti větru ve stejném místě bez přítomnosti budov. Zesilující faktor je tedy přímým ukazatelem vlivu budov na rychlost větru v jejich okolí. [8]

## 4.1 Rychlostní profil

Profil střední rychlosti nabíhajícího větru se podobá mocninnému zákonu s exponentem 0,15.

$$u = u_{0,05} \left( \frac{y}{0,05} \right)^{0,15} \quad (8)$$

Referenční rychlost nabíhajícího větru  $u_{0,05}$  ve výšce 0,05 m (úroveň chodce; 2 m v plném měřítku) byla 5,9 m/s. Intenzita turbulence nabíhajícího proudění, na základě místní průměrné rychlosti se pohybovala od 20 % ve výšce 5 mm do 5 % ve výšce gradientu (0,9 m; 360 m v plném měřítku). Modely budov byly obdélníkové a byly umístěny rovnoběžně vedle sebe. Měření rychlosti větru a intenzity turbulence bylo v práci [20] provedeno pomocí TSI anemometru, podél osy průchodu ve výšce chodce. Profil střední rychlosti větru na vstupu a profil intenzity turbulence se rovnají naměřeným profilům v aerodynamickém tunelu. [8]

## 4.2 Turbulentní kinetická energie

Naměřená podélná intenzita turbulence  $I_u$  se převede na turbulentní kinetickou energii k jako vstupní údaj pro simulace použitím vztahu.

$$k = 0.5(I_u U^2) \quad (9)$$



### 4.3 Rychlost disipace kinetické energie turbulence

Profil rychlosti disipace TKE na vstupu je dán vztahem

$$\varepsilon(y) = \frac{(u_{ABL}^*)^3}{\kappa(y + y_0)} \quad (10)$$

kde  $y$  [m] je výšková souřadnice,  $\kappa$  je von Karmánova konstanta ( $\sim 0.42$ ),  $y_0$  [m] je délka aerodynamické drsnosti v daném měřítku odpovídající exponentu mocninného zákona 0.15 (zde:  $y_0 \approx 0.03/40 = 0.00075$  m) a  $u_{ABL}^*$  je třetí rychlost související s vodorovným homogenním (stabilním) prouděním v atmosferické mezní vrstvě a má tvar

$$u_{ABL}^* = C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} \quad (11)$$

kde  $C_\mu$  je konstanta (0.09) a  $k_p$  je turbulentní kinetická energie v středovém bodu P buňky přiléhající ke stěně (zemskému povrchu).

### 4.4 Okrajové podmínky modelu bez budov

Strany a horní část výpočetní domény jsou modelovány jako roviny symetrie. Na výstupu je nastaven nulový rozdíl statického tlaku.

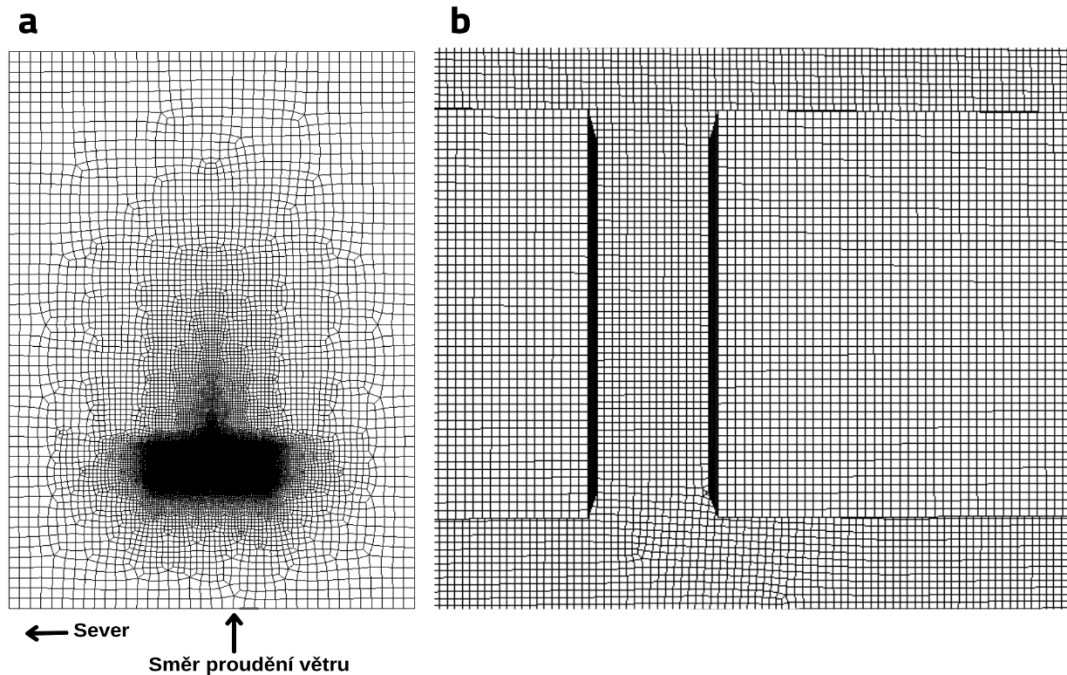
Ve výpočtu jsou zahrnuté standardní stěnové funkce podle Laundera a Spaldinga modifikované pro drsnost.

Kombinace simulace v měřítku 1:40, hodnoty  $y_p$  a referenční rychlosti  $U_o$  získané z experimentů ve větrném tunelu poskytuje vhodnou hodnotu  $y^+$  pro využití stěnových funkcí ( $30 < y^+ < 100$ ). Jako další vstupní údaje jsou potřeba hodnoty  $K_S$  a  $C_{K_S}$  pro spodní část výpočetní oblasti.  $K_S$  pro spodní část výpočetní domény se uvažuje  $2.5 \times 10^{-6}$  m (simulační měřítko) nebo 0.0001 m (plné měřítko), což je odhad ekvivalentní drsnosti pískových zrn hladké podložky měřicí sekce tunelu. Tato hodnota je menší než  $y_p$  (=0.005 m simulační měřítko, 0.2 m plné měřítko).  $C_{K_S}$  je nastavené na výchozí hodnotu 0.5.

Simulace byly řešeny s modelem turbulence podle Shiha et al. [31] (tzv. relizable k- $\varepsilon$  model). [8, 30]

## 5 Reprodukce studie Blocken et al. [8]

V úvodní části bylo nutné vytvořit síť splňující kvalitativní požadavky na síť modelovanou pro účely větrné studie v měřítku 1:40. Rozměry výpočetní oblasti jsou  $20.5 \times 14 \times 18 \text{ m}^3$  ( $820 \times 560 \times 720 \text{ m}^3$  v plném měřítku). Budova je umístěna ve vzdálenosti 5 m (měřítko simulace, 200 m v plném měřítku) od vstupní hranice výpočetní domény. Poměr blokování je 0,4 %.



Obr. 6 (a) Pohled shora na síť v dolní části 3D výpočetní oblasti  
(b) Pohled shora na síť v dolní části 3D výpočetní oblasti – detail průchodu a budov

Požadavky na síť jsou uvedené v článku [8]. V původní studii [8] byla použita hybridní síť o počtu buněk 0.9 až  $1.10^6$ . Malé hexahedrální buňky na površích budov a velké hexahedrální buňky ve zbytku výpočetní domény byly propojeny oblastí tetrahedrálních buněk. Model použitý v této diplomové práci měl numerickou síť tvořenou pouze hexahedrálními buňkami, počet buněk je 2 957 050 a byla vytvořena v programu Workbench Meshing.

Všechny simulace v rámci této diplomové práce byly provedeny s užitím Reynoldsových rovnic, modelu turbulence podle Shiha et al. [31]. Pro všechny relevantní členy byly použity diskretizace 2. řádu a byl použit segregovaný řešič s algoritmem pro propojení rychlostního a tlakového pole SIMPLE.

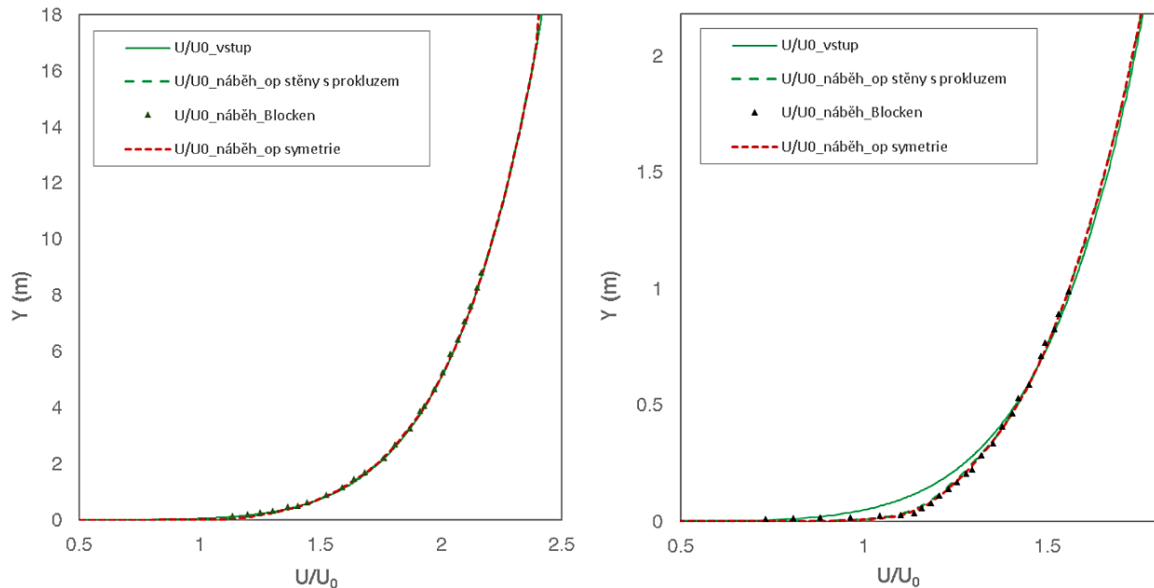
## 5.1 Deformace profilů veličin pod vlivem okrajových podmínek

Rychlostní profil větru byl v původní studii [8] použitý přímo z naměřených hodnot [20] s informací, že naměřený profil střední rychlosti náběžného větru se podobá mocninnému zákonu, s exponentem 0.15. Referenční rychlost náběžného větru  $U_0$  ve výšce 5 mm (výška úrovně chodce, v plném měřítku 2 m) je 5.9 m/s.

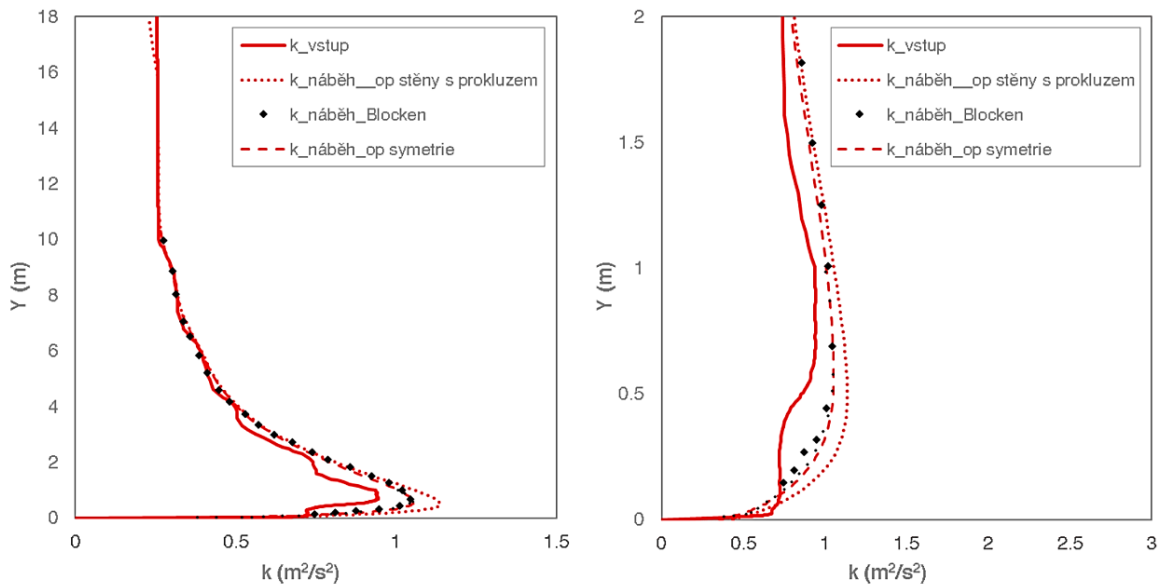
Profil kinetické energie turbulence bylo nutné odečíst z grafů ve studii a profil disipace energie turbulence byl sestrojen dle vztahu (10).

Tyto profily na Obr. 7, Obr. 8 a Obr. 9 jsou rozlišené v legendě grafu následovně:

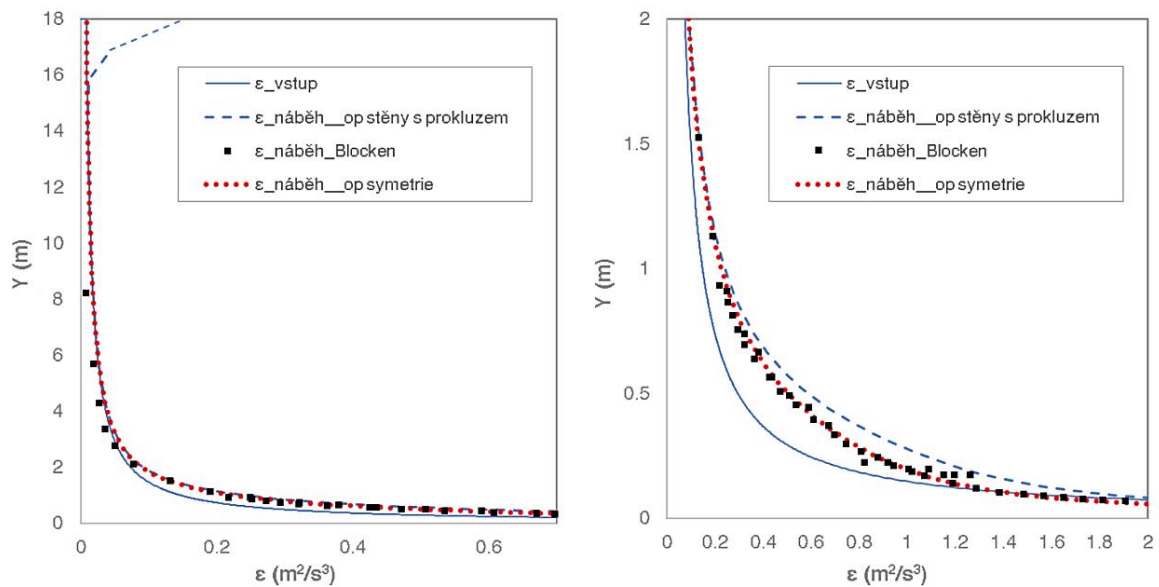
- $X_{\text{vstup}}$  – profil zadaný na vstupu výpočetní domény
- $X_{\text{náběh\_op stěny s prokluzem}}$  – nabíhající profil, kde boční stěny a horní hranici výpočetní oblasti byly modelovány okrajovou podmínkou stěna s prokluzem
- $X_{\text{náběh\_op symetrie}}$  – nabíhající profil, kde boční stěny a horní hranici výpočetní oblasti byly modelovány okrajovou podmínkou symetrie
- $X_{\text{náběh\_Blocken}}$  – nabíhající profil ze studie [8]



Obr. 7 Vertikální profily poměru střední rychlosti větru  $U/U_0$  (vlevo profil pro celou výšku výpočetní oblasti, vpravo detail profilu)



Obr. 8 Vertikální profily turbulentní kinetické energie (vlevo profil pro celou výšku výpočetní oblasti, vpravo detail profilu)



Obr. 9 Vertikální profily rychlosti disipace TKE (vlevo profil pro celou výšku výpočetní oblasti, vpravo detail profilu)

Na Obr. 7, Obr. 8 a Obr. 9 jsou porovnané profily, které byly zadané na celé ploše vstupu do výpočetní domény (plná čára), nabíhající profily (čárkované) jsou v místě, kde se ve výpočetní oblasti nachází budovy. Jsou zde porovnané nabíhající profily s dvěma různými okrajovými podmínkami, ze studie [8] nebylo zcela jasné, jaké okrajové podmínky byly použity pro boční stěny a strop výpočetní domény.

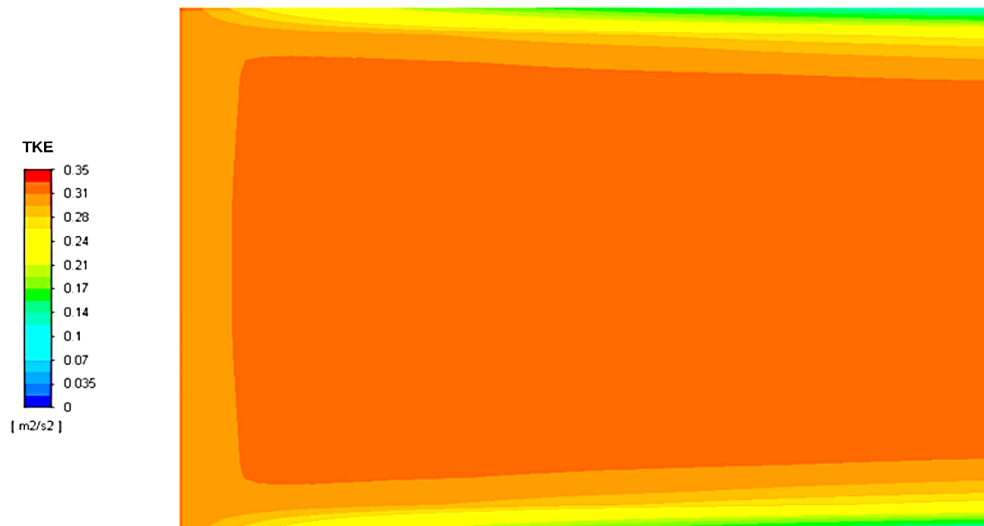
Z Obr. 7, Obr. 8 a Obr. 9 je patrné, že při použití symetrické okrajové podmínky se profily turbulentní kinetické energie a rychlosti disipace TKE nedeformují v horní části výpočetní oblasti. Z porovnání nabíhajících profilů je jasné, že profily ze simulace, kde byla pro boční stěny a horní hranici výpočetní domény na místo okrajové podmínky stěny s prokluzem použita symetrická okrajová podmínka, lépe odpovídají nabíhajícím profilům ze studie [8].

## 5.2 Porovnání okrajových podmínek

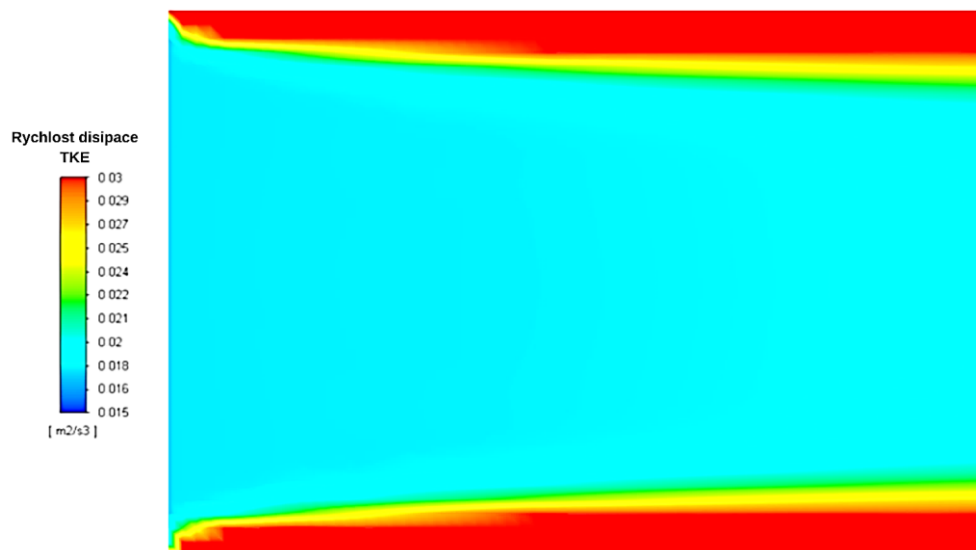
V prvním případě byla pro všechny tři stěny použita okrajová podmínka stěny s prokluzem, to znamená nenulová rychlost a nulové smykové napětí na stěně. Okrajová podmínka stěna s prokluzem znamená symetrii pro rychlost. Podle Newtona je smykové napětí úměrné příčné derivaci rychlosti, tady je derivace nula, a proto má křivka profilu rychlosti kolmý směr na stěnu. Při použití této okrajové podmínky dochází v horní části výpočetní domény k deformaci profilu turbulentní kinetické energie a rychlosti disipace TKE (Obr. 8).

Tato deformace se dále přenáší do výpočetní oblasti a ovlivňuje celý profil. Při použití okrajové podmínky typu stěna s prokluzem je třeba brát v úvahu, že se deformace přenáší od stěn dále do výpočetní oblasti a ovlivní i analyzovanou oblast v okolí budov.

Znázornění vlivu okrajových podmínek nastavených na bočních stěnách je vidět na obrazu veličin kinetické energie turbulence a rychlosti disipace TKE na vodorovné rovině (ve výšce nad zemským povrchem  $y = 8$  m).



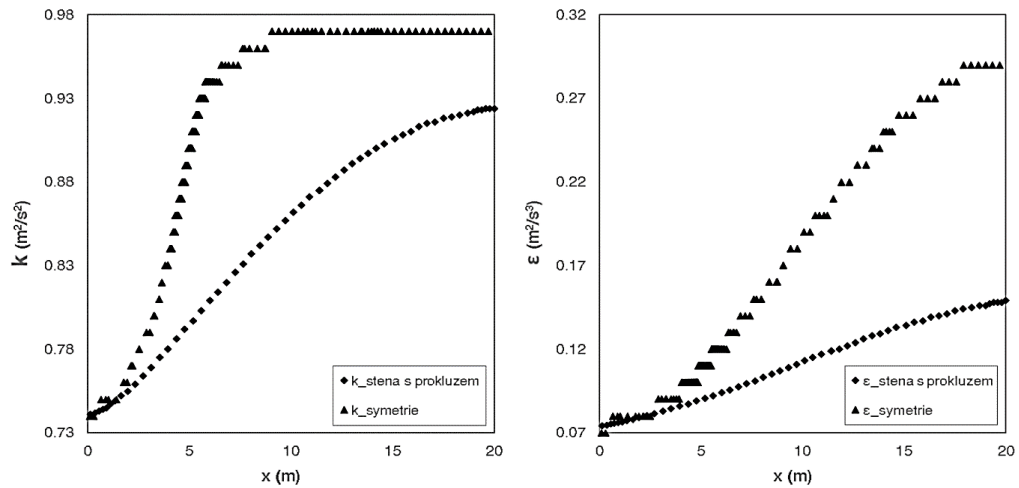
Obr. 10 Obrázek turbulentní kinetické energie ve vodorovné rovině ve výšce  $y=8$  m při použití okrajové podmínky typu stěna s prokluzem (pro model 1:40)



Obr. 11 Obrázek rychlosti disipace TKE ve vodorovné rovině ve výšce  $y=8$  m při použití okrajové podmínky typu stěna s prokluzem (pro model 1:40)

Z Obr. 10 a Obr. 11 je zřejmé, že okrajová podmínka stěny s prokluzem neposkytne homogenní pole až k hranicím výpočetní oblasti. Výpočet při použití okrajové podmínky stěny s prokluzem pro boční stěny a horní část domény za začátku špatně konvergoval a bylo nutné použít diskretizaci prvního řádu pro konvektivní členy pohybové rovnice a po zhruba tisíci iterací teprve použít pro konvektivní členy pohybové rovnice diskretizaci druhého řádu.

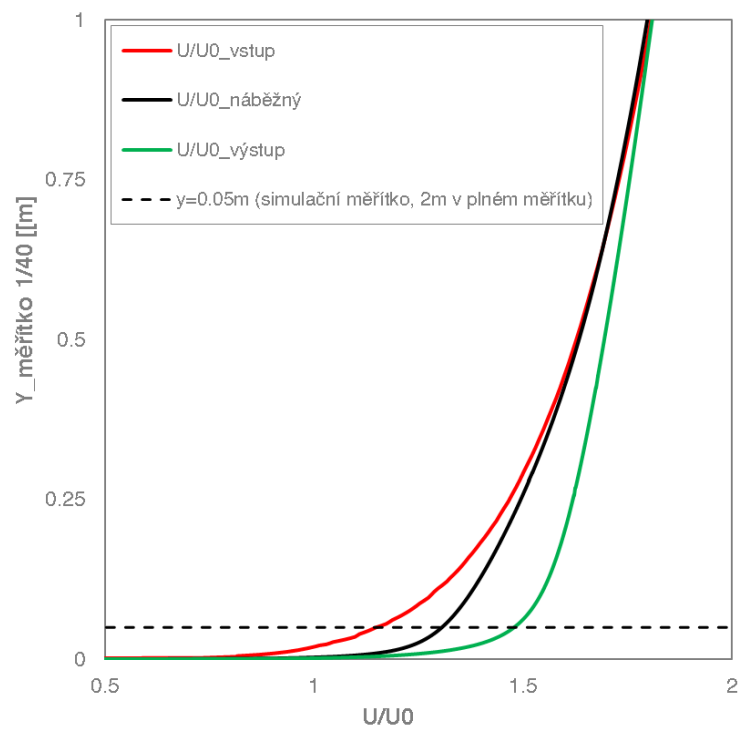
V druhém případě byla použita okrajová podmínka symetrie, která znamená symetrii pro všechny řešené veličiny. Výpočet mnohem lépe konvergoval a na rozdíl od použití okrajové podmínky stěny s prokluzem použití okrajové podmínky symetrie poskytne homogenní pole až k hranicím výpočetní domény.



Obr. 12 Porovnání profilů  $k$  a  $\epsilon$  v ose vodorovné roviny ve výšce  $y=0.05$  m (pro model 1:40)

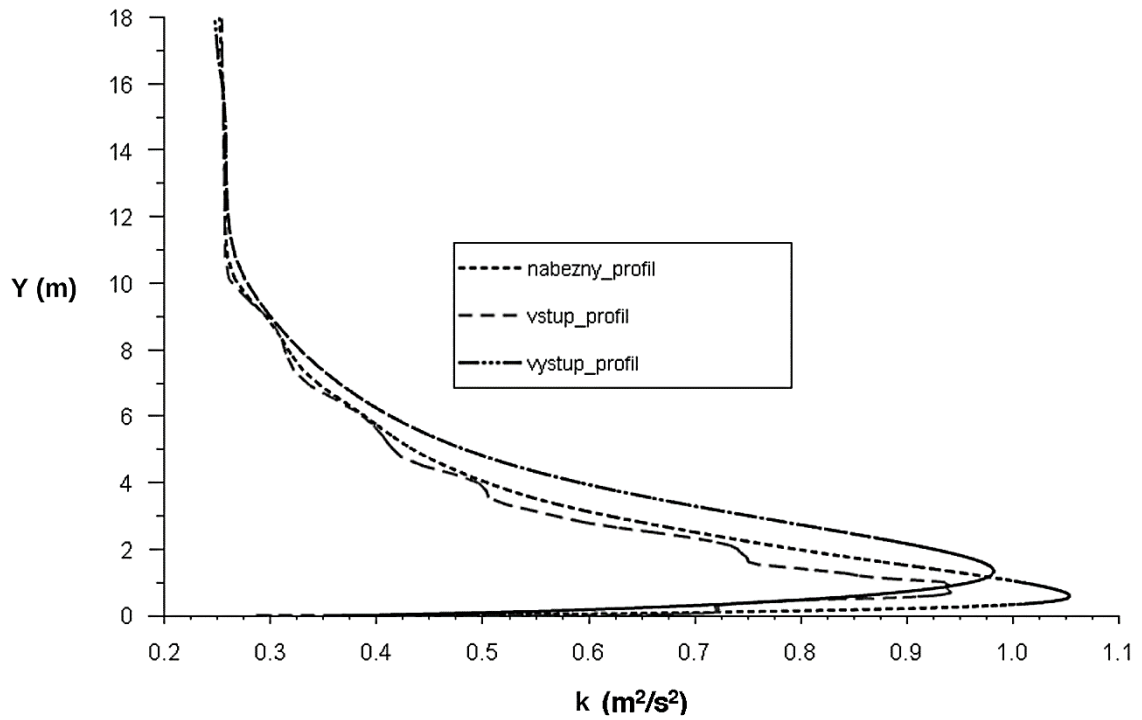
### 5.3 Vliv horizontální nehomogenity proudění

Dále bylo nutné ověřit vliv horizontální nehomogenity provedením simulace v prázdné (3-D) výpočetní oblasti, porovnáním vstupních profilů rychlosti větru a turbulence s náběžnými profily, tj. v místě, kde se budou nacházet budovy. Vliv horizontální nehomogenity byl analyzován při vyšší referenční rychlosti 6.8 m/s jako ve studii [8]. Hodnota referenční rychlosti 6.8 m/s vyplývá z definice faktoru zesílení, kdy při simulaci prázdnou výpočetní doménou (bez budov) rychlost odečtená v místě, kde se budovy nacházejí, odpovídala právě této hodnotě.

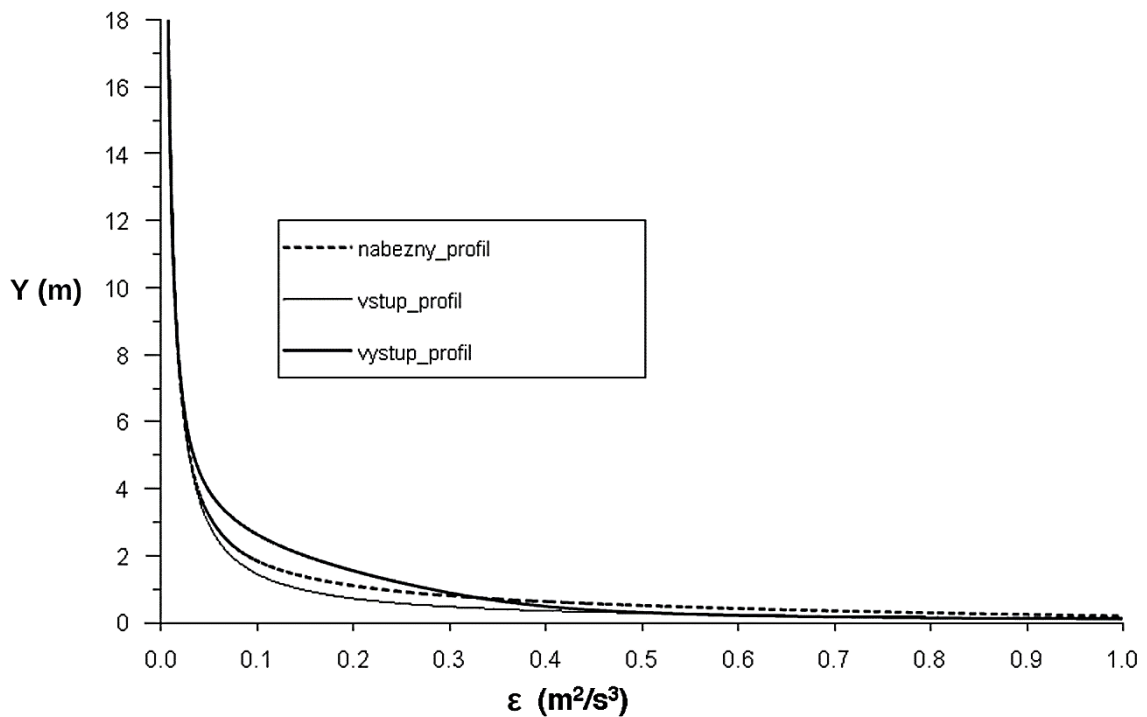


Obr. 13 Vypočtené profily střední rychlosti větru pro znázornění zrychlení u zemského povrchu (horizontální nehomogenita)





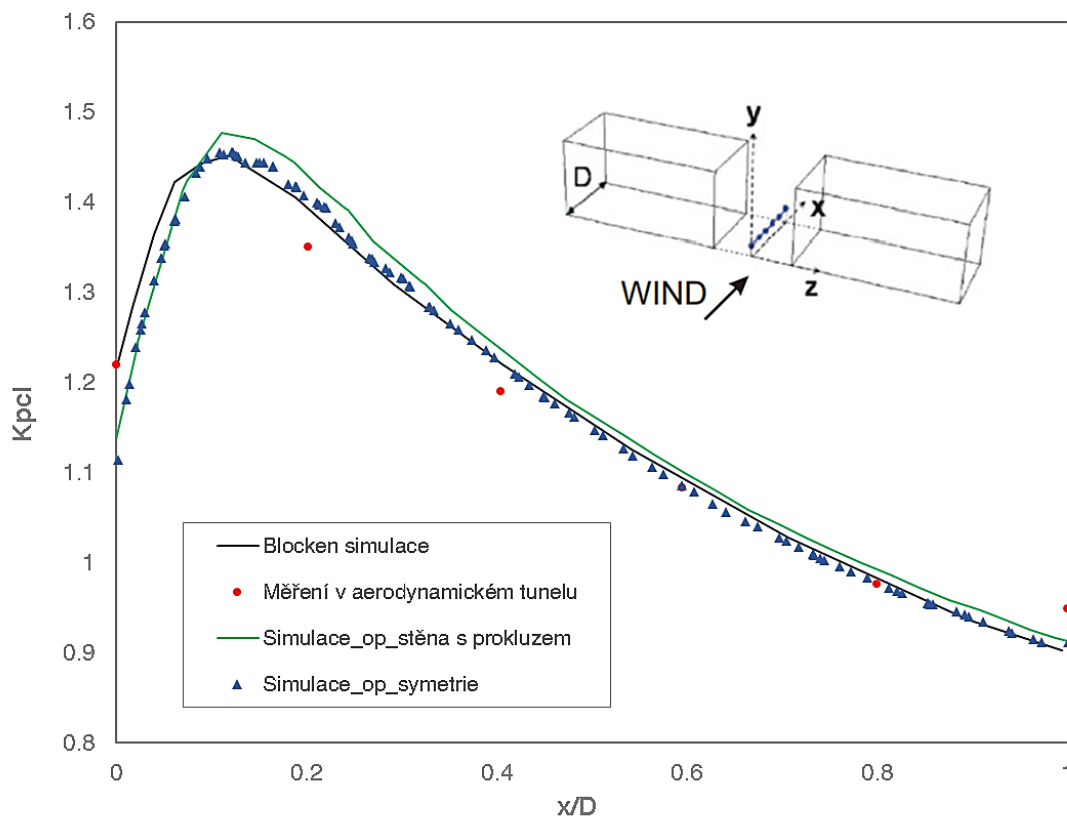
Obr. 14 Vývoj profilu turbulentní kinetické energie při průchodu výpočetní doménou



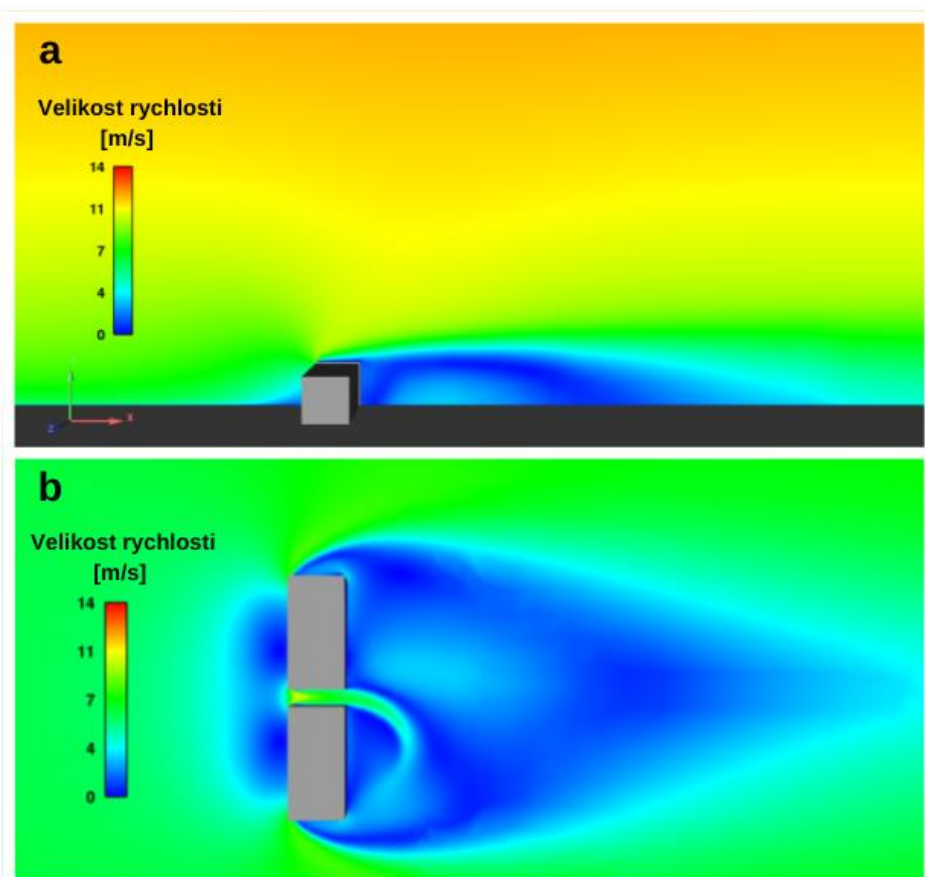
Obr. 15 Vývoj profilu rychlosti disipace TKE při průchodu výpočetní doménou

## 5.4 Výsledky větrné studie v měřítku 1:40

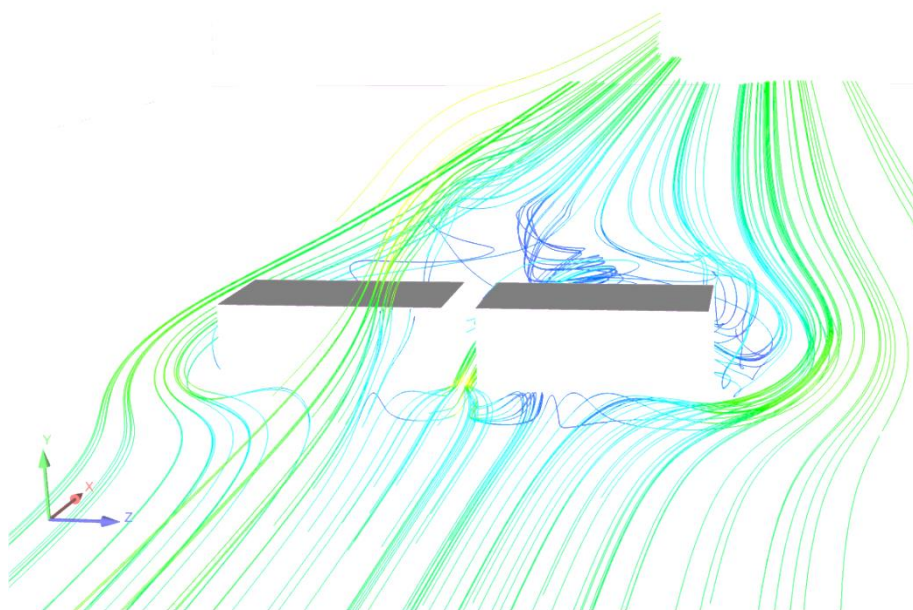
Na Obr. 16 jsou porovnány výsledky simulací z této práce s výsledky simulací studie [8] a naměřených hodnot v aerodynamickém tunelu [20]. Výsledky si tvarem křivky a maximální hodnotou zesilujícího faktoru odpovídají výsledkům studie [8]. Odchylna od [8] je pravděpodobně způsobena zadáním teoretických profilů rychlosti a disipace turbulence místo profilů naměřených z aerodynamického tunelu, které byly zadány ve studii [8]. Ve studii [8] i v mé práci byla zohledněna horizontální nehomogenita uvažováním vyšší referenční rychlosti 6.8 m/s, aby křivka odpovídala naměřeným datům. Zesilující faktor byl uvažován jako poměr průměrné rychlosti větru v určitém místě s přítomností budov ku průměrné rychlosti větru ve stejném místě bez přítomnosti budov. Tyto hodnoty byly získány ze simulace v prázdné výpočetní doméně, v totožných místech, kde bylo prováděné měření anemometrem v aerodynamickém tunelu [20] a kde byly odečteny i hodnoty u modelu s budovami.



Obr. 16 Naměřené a vypočtené faktory zesílení  $K_{pcl}$  podél osy průchodu



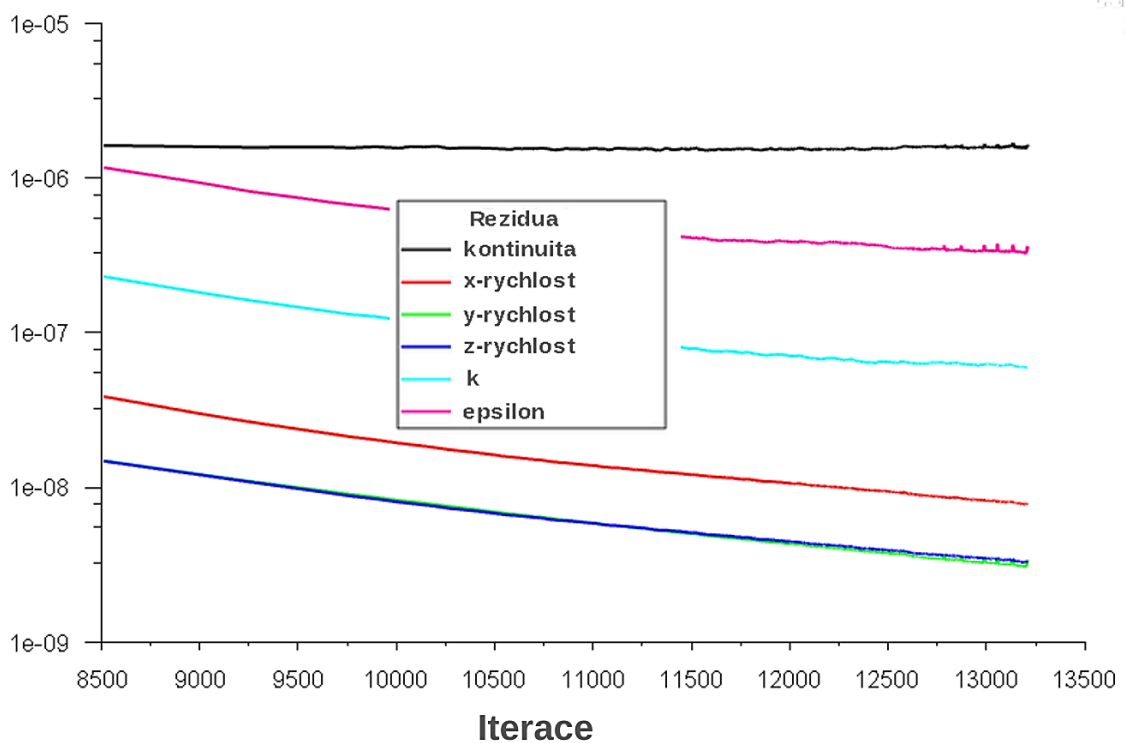
Obr. 17 Rychlostní pole v okolí budov  
(a – svislý řez, b – vodorovný řez)



Obr. 18 Trajektorie částic při obtékání budov

Viditelný je malý nárůst rychlosti větru na úrovni chodců v průchodu. Pro zde zkoumané konfigurace budov a podmínky náběžného proudění je rychlost proudění v průchodu mezi budovami jen o málo vyšší než rychlost proudění v modelu bez přítomnosti budov. To znamená, že Venturiho efekt je u takové to konfigurace budov poměrně slabý.

V úplavu za budovami dochází oscilaci rychlosti, kde má proudění nestacionární charakter. Na zobrazení rychlostního pole viz Obr. 17 vznikají struktury, které jsou pravděpodobně bistabilní (budou oscilovat mezi dvěma polohami). Tato oscilace proudu má vliv na horší konvergenci řešení a oscilující rezidua.



Obr. 19 Rezidua řešení základních rovnic (model 1:40)

## 5.5 Diskuze k volbě okrajových podmínek

Na Obr. 16 je zachyceno porovnání zesilujícího faktoru podél osy průchodu mezi budovami. Jsou zde vidět drobné odchylky od výsledků ze studie [8], které byly pravděpodobně způsobeny použitím rozdílného profilu pro rychlost, kde ve studii byl použit náběžný profil z aerodynamického tunelu a v mé simulaci byl použit profil z teoretického vztahu. Další drobná nepřesnost mohla vzniknout odečítáním profilů kinetické energie turbulence a disipace turbulence z grafů. Dále je na obrázku vidět porovnání mezi použitými okrajovými podmínkami pro boční a horní hranice výpočetní domény, kde při použití okrajové podmínky symetrie bylo dosaženo lepší shody s výsledky ze studie [8].

Detailní analýze použití okrajových podmínek stěna s prokluzem/symetrie se věnují kapitoly 6.2 a 6.3., kde lze jasně vidět, jak se chovají nastavené profily při průchodu výpočetní doménou. Z Obr. 7, Obr. 8 a Obr. 9 je patrné, že právě při použití okrajové podmínky symetrie bylo dosaženo výsledků odpovídajících výsledkům ze studie [8].

Obecně bych doporučil pro simulace proudění použít okrajovou podmínku symetrie a pro simulaci proudění společně se solárním modelem okrajovou podmínku stěny s prokluzem, která umožní nastavení okrajových podmínek pro přenos tepla.

## 6 Převedení modelu do plného měřítka

Z důvodu použití solárního modelu a s tím spojené přesné interpretace výsledků přenosu tepla bylo nutné model převést do plného měřítka (1:1).

Převedení modelu do plného měřítka může být provedeno přímo v programu FLUENT funkcí změny měřítka. Tímto způsobem byl získán první model v plném měřítku. Tím dojde i k transformaci výpočetní sítě, kde se úměrně ke změně měřítka zvětšují všechny výpočetní buňky. To se ukázalo jako věc, která bránila tomu, aby model šel použít, protože výpočet na tomto modelu systematicky divergoval.

Další problematickou věcí u modelu ve skutečném měřítku se ukázalo být omezení poměru turbulentní a molekulární viskozity, který je přednastavením programu omezený hodnotou  $10^5$ . Po konzultaci s profesorem Blockenem z TU Eindhoven [21] jsem změnil limit pro poměr turbulentní a molekulární viskozity na hodnotu  $10^{20}$ .

Po dalších simulacích na různě zahuštěných sítích, u kterých jsem nastavil maximální turbulentní viskózní poměr na hodnotu  $10^{20}$  se zdálo, že výpočet bez problému konverguje, ale po dosažení několika tisíců iterací opět začalo řešení divergovat.

Dále byla nalezena možnost redukovat model, protože výška výpočetní domény, byla zbytečně velká. Výška budov v plném měřítku 20 m, výška výpočetní oblasti 720 m. Výška výpočetní oblasti tedy byla  $36H_{max}$  (kde  $H_{max}$  je výška největší budovy) a v literatuře se uvádí jako nejmenší výška výpočetní domény alespoň  $6H_{max}$ . [15]

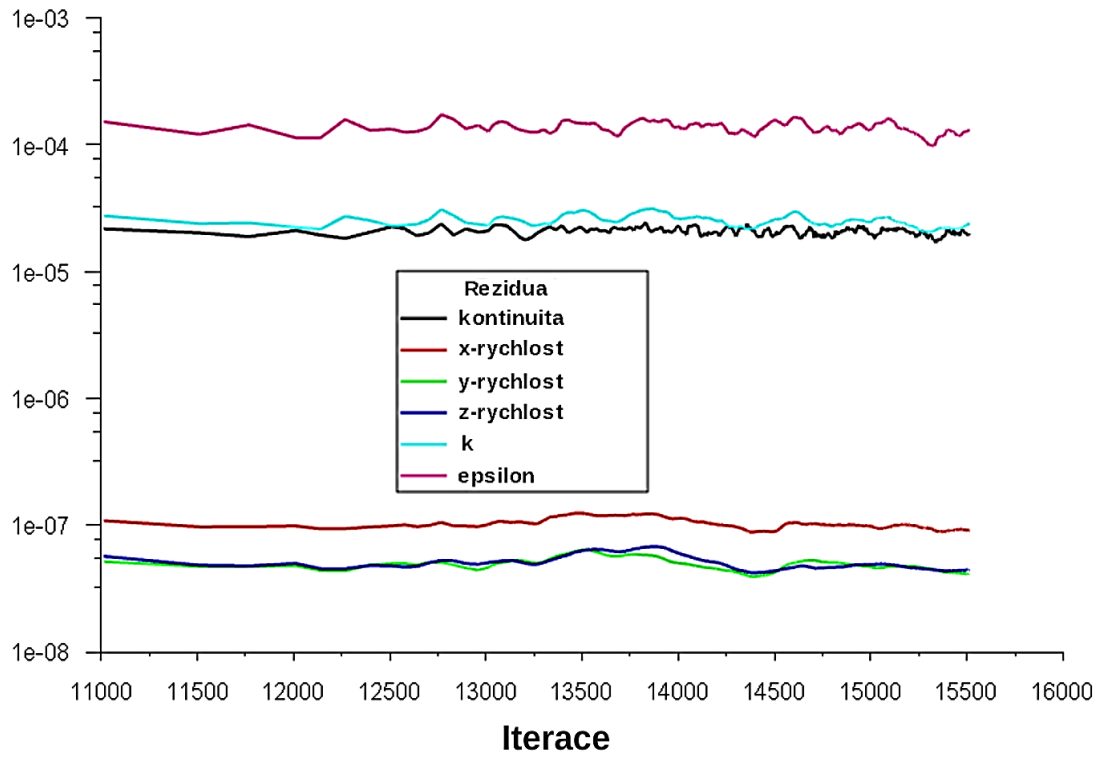
Výška výpočetní oblasti byla namísto původních 720 m upravena na 400 m, pak bylo nutné celý model znovu zasítovat. V simulaci byl nastaven maximální turbulentní viskózní poměr na hodnotu  $10^{20}$ , byl upraven profil rychlosti do nové výšky výpočetní domény a nastaveny konstantní hodnoty turbulentní kinetické energie a rychlosti disipace TKE, na vstupu. Na tomto modelu řešení zkonvergovalo.

Výsledky zesilujícího faktoru v průchodu mezi budovami neodpovídaly úplně přesně studii v měřítku 1:40, viz Obr. 22. To bylo pravděpodobně způsobeno použitím konstantních turbulentních veličin  $k$  a  $\varepsilon$  na vstupu do výpočetní oblasti. Pro získání hodnoty zesilujícího faktoru byla provedena simulace proudění prázdnou výpočetní doménou v plném měřítku s rychlostním profilem a konstantními hodnotami turbulentních veličin. Z této simulace byla zjištěna referenční rychlost v místě, kde se v modelu s budovami nachází osa průchodu (ve výšce 2 m).

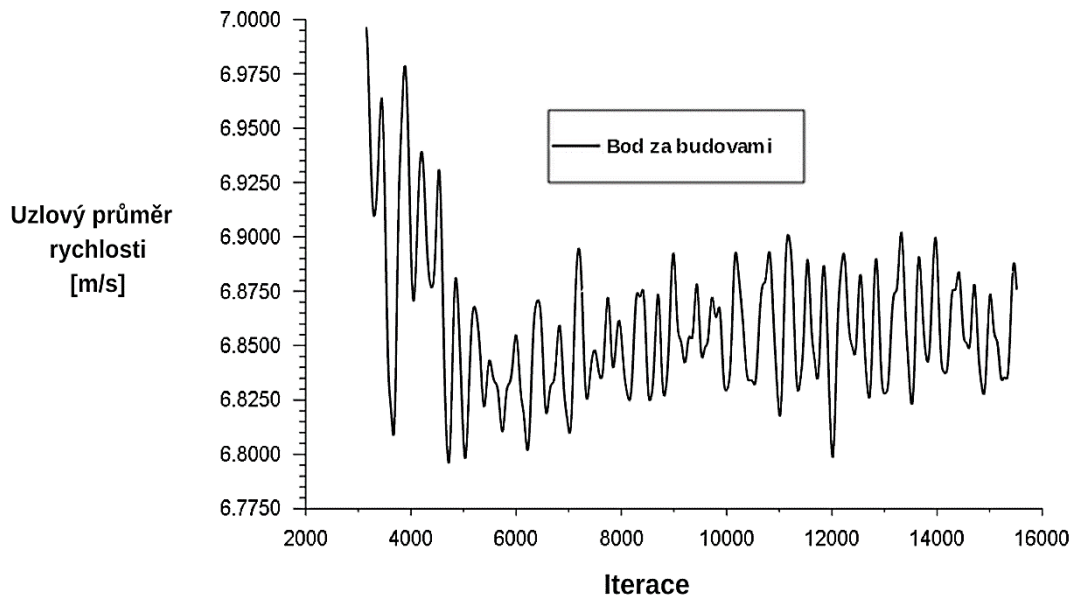
Další byla provedena simulace s profily  $k$  a  $\varepsilon$ , pro získání přesnějších výsledků odpovídajících výsledkům ze simulace v měřítku 1:40. Tato simulace byla z pohledu konvergence problematictější, bylo nutné počítat na více zahuštěné síti a provést řadu úprav, aby se dospělo k řešení.

Místo okrajové podmínky symetrie pro horní a boční hranice výpočetní domény byla použita okrajová podmínka stěna s prokluzem. Dále bylo třeba upravit hodnoty podrelaxačních faktorů u tlaku a rychlosti na hodnotu 0.4.

Rezidua jsou zobrazená na Obr. 20 a na Obr. 21 je zobrazena oscilace rychlosti v úplavu za budovami, kde má proudění nestacionární charakter. Na zobrazení rychlostního pole viz Obr. 17 vznikají struktury, které jsou pravděpodobně bistabilní (budou oscilovat mezi dvěma polohami, viz také Obr. 17). Tato oscilace proudu má vliv na horší konvergenci řešení a oscilující rezidua, viz Obr. 20. Oscilace rychlosti způsobovaly malé oscilace reziduí, ale celkově lze řešení považovat za stabilní a na chování proudu mezi budovami oscilace rychlosti v úplavu nemají významný vliv. Pro zahrnutí horizontální nehomogenity a získání referenční hodnoty rychlosti byla rovněž provedena simulace prázdnou výpočetní doménou.



Obr. 20 Rezidua řešení základních rovnic

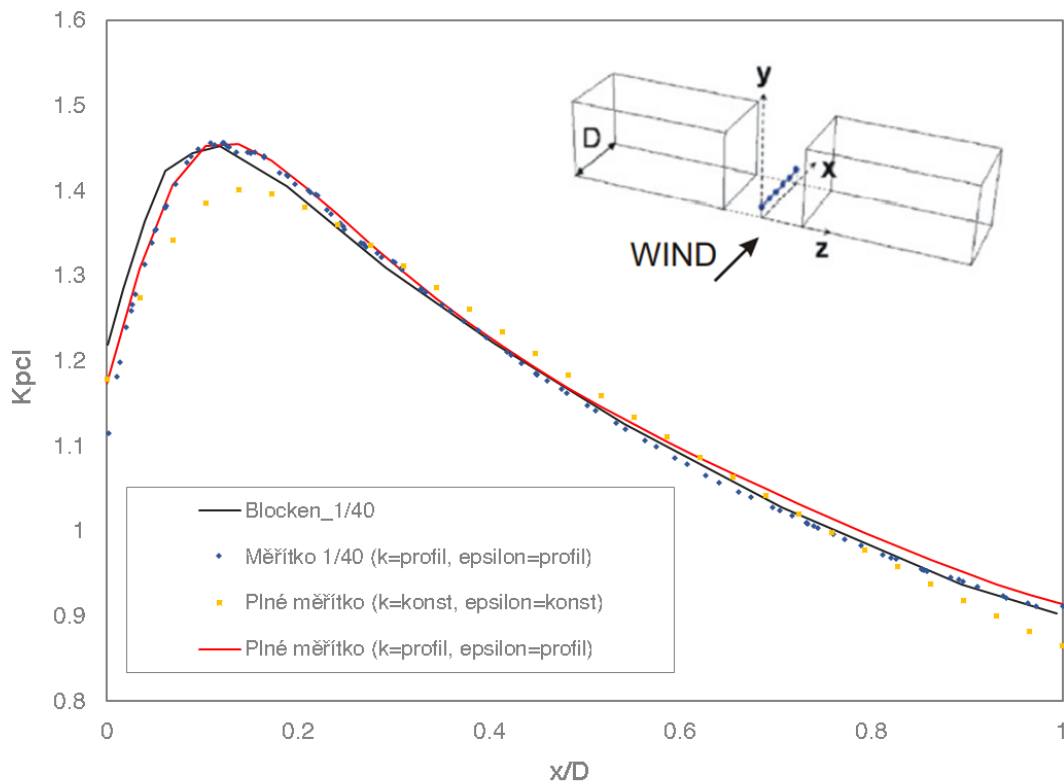


Obr. 21 Kolísání rychlosti v úplavu za budovami



## 6.1 Výsledky větrné studie v plném měřítku

Porovnáním výsledků zesilujícího faktor podél osy průchodu Obr. 22 je zřejmé, že při simulaci, kde byly veličiny TKE a rychlost disipace TKE zadány profilem, který byl použit při simulaci v měřítku 1:40 si v obou měřítkách výsledky odpovídají. Tímto byl validován model v měřítku 1:40 s modelem proudění v plném měřítku, který byl použit pro další simulace s přenosem tepla.



Obr. 22 Naměřené a vypočtené faktory zesílení  $K_{pcl}$  podél osy průchodu

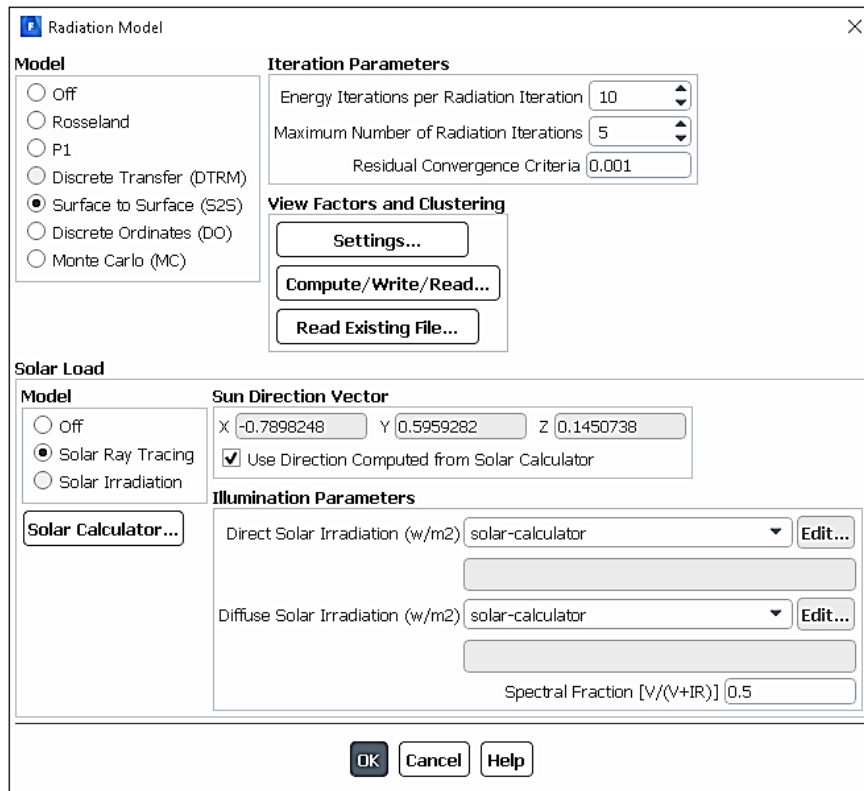
## 6.2 Diskuze k převedení modelu do plného měřítka

Při převedení modelu do plného měřítka bylo nutné snížit výšku výpočetní domény pro dosažení stabilního řešení a zvýšení limitu poměru turbulentní a molekulární viskozity. Pokud nejsou k dispozici náběžné profily pro TKE a rychlost disipace TKE, tak doporučuji použít konstantní hodnoty, s kterými výpočet lépe konverguje. Při průchodu výpočetní doménou se profily veličin samy vyvinou. Z hlediska konvergence a stability řešení je považuji za vhodnější.

## 7 Model radiace a jeho nastavení ve Fluentu

Zadání vstupních parametrů modelu radiace nutných pro výpočet se provádí přes grafické rozhraní, které se spustí v záložce Physics => Models => Radiation.

Pro simulaci tepelného záření byl použit model S2S (kapitola 3.8) a metoda sledování slunečních paprsků pro výpočet součinitelů osálení.



Obr. 23 Základní panel modelu záření

Pro výpočet polohy slunce a intenzitu dopadajícího slunečního záření (pro přímou i difúzní složku) na povrchy budov a zem byla použita tzv. solární kalkulačka. Nastavená poloha odpovídá poloze Prahy (50° severní šířky, 14,5° východní délky a časové pásmo GMT+1). Vítr na budovy nabíhá od západu a ulička je orientována směrem na východ, sever je na levé boční hranici výpočetní domény. Grafické rozhraní solární kalkulačky na je Obr. 24. Dále se nastavila orientace severu a východu, čas a datum simulace. Datum simulace 16.7. odpovídá extrémnímu letnímu dni z databáze TMY Praha-Libuš 2004-2018. V metodě slunečního ozáření (solar irradiation method) byla vybrána metoda, která by se měla blížit reálnému počasí (fair weather conditions).

Faktor slunečního svitu (sunshine factor, SF) je lineární redukční faktor pro vypočtené ozáření, který umožňuje zohlednit případnou oblačnost nebo znečištění atmosféry. [14] V tomto případě byl uvažován jasný den, pro který je hodnota  $SF = 1$ .

Obr. 24 Panel solární kalkulačky

Součinitele vzájemného osálení byly vypočteny metodou sledování paprsků. Dále byly nastaveny zóny, které se účastní výpočtu úhlových součinitelů. V tomto případě se stěny i střechy budov a povrch dolní hranice a povrch horní hranice výpočetní domény (obloha) podílely na přenosu tepla sáláním. Vstup, výstup a boční hranice výpočetní domény se na přenosu tepla sáláním nepodílely, protože se jedná o hranice s žádným nebo zanedbatelným vyzařováním (ve skutečnosti tyto hranice neexistují).

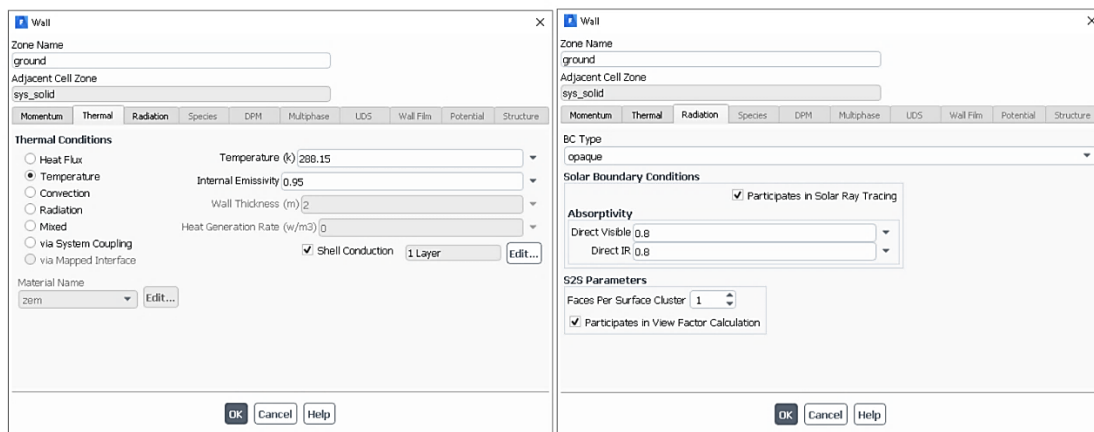
Obr. 25 Panel výpočtu úhlových součinitelů

## 7.1 Nastavení okrajových podmínek pro přenos tepla zeminou

Materiálové vlastnosti zeminy byly převzaty z [19], a to konkrétně hodnoty pro písčitou půdu s přirozenou vlhkostí o hustotě  $1800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , měrné tepelné kapacitě  $920 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a tepelné vodivosti zeminy  $1.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

Další nastavení souvisí s tepelným odporem země, kdy se nastavuje teplota v určité hloubce zeminy jako okrajová podmínka 1. druhu. V tomto případě byla nastavena teplota zeminy na  $15^\circ\text{C}$  v hloubce 2 m. Emisivita zemského povrchu byla nastavena na hodnotu 0.95.

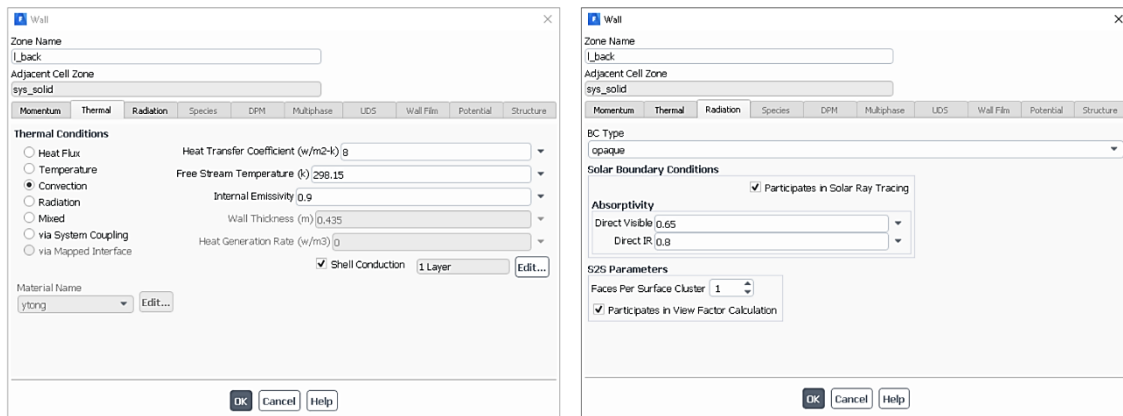
V záložce pro s se dále nastaví, jestli je daná stěna průsvitná nebo neprůsvitná. Dále se nastaví pohltivost pro viditelné a infračervené záření. Poslední nastavení se týká účasti ve výpočtu úhlových součinitelů, viz Obr. 26.



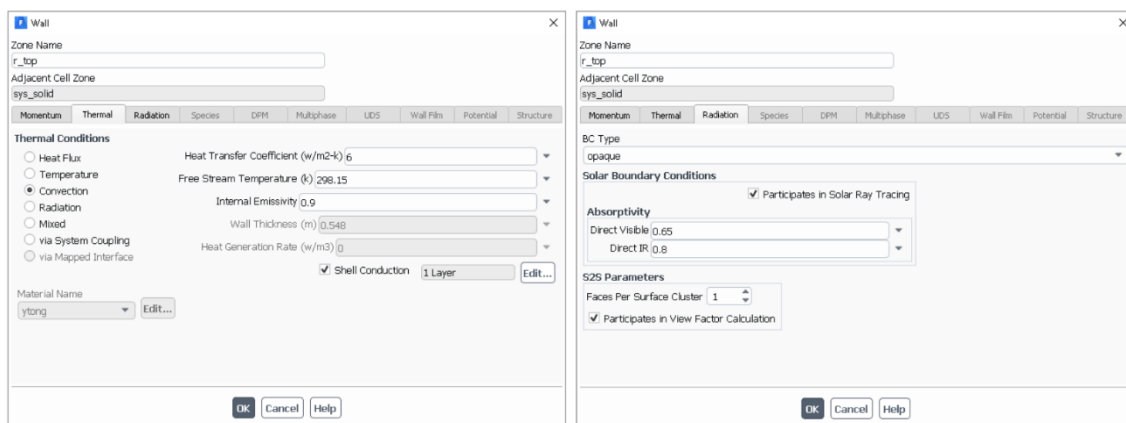
Obr. 26 Panel nastavení okrajových podmínek pro zeminu a zemský povrch

## 7.2 Nastavení okrajových podmínek pro přenos tepla stěnami a střechami

Pro stěny a střechy budov byl použit materiál Ytong s hustotou  $500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , měrnou tepelnou kapacitou  $1000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a tepelnou vodivostí  $0.137 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . [4] Pro stěny budov byla použita tepelná okrajová podmínka 3. druhu, kde se zadává tloušťka stěn, teplota vzduchu uvnitř budov a součinitel přestupu tepla na vnitřním povrchu. Tloušťka stěn a střech se vypočítala z doporučených hodnot součinitele prostupu tepla z ČSN 73 0540-2:201, kde pro vnější stěnu je  $U_{\text{stěna}} = 0.30 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  a pro vodorovnou střechu  $U_{\text{střecha}} = 0.24 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  při standardních odporech při přestupu tepla.  $R_{\text{ki}} = 0.13 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  a  $R_{\text{ke}} = 0.04 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Součinitel přestupu tepla pro horizontální stěny budov byl nastaven na  $8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  a pro střechy budov  $6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Emisivita byla pro stěny i střechy nastavena na hodnotu 0.9 a v záložce solární radiace byla pro stěny i střechy nastavená pohltivost pro viditelné záření 0.65 a pro infračervené 0.8 viz Obr. 27 a Obr. 28.



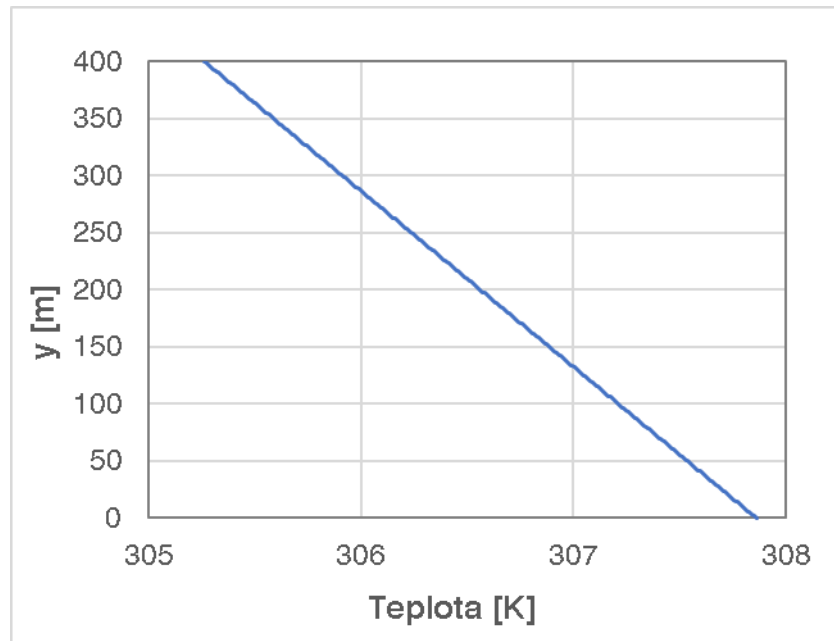
Obr. 27 Panel nastavení okrajových podmínek – stěny budov



Obr. 28 Panel nastavení okrajových podmínek – střechy budov

### 7.3 Nastavení okrajových podmínek pro přenos tepla pro hranice výpočetní oblasti

Na vstup, výstup a stěny výpočetní domény byl nastaven teplotní profil, který klesá podle výšky nad zemským povrchem o 0.0065 K/m (viz Obr. 29). Referenční teplota 34.7 °C byla převzata z databáze TMY pro Praha-Libuš z let 2004-2018, z níž byla vybrána teplota pro extrémní letní den 16.07.2015 v 16:00, která byla změřena 2 m nad zemí.



Obr. 29 Teplotní profil v mezní vrstvě

Vstup, výstup a boční hranice výpočetní oblasti se nepodílely na výpočtu úhlových součinitelů ani sledování slunečních paprsků.

Jako teplota oblohy byla zadána konstantní hodnota odpovídající teplotnímu profilu ve výšce 400 m. Obloha neboli vrchní část výpočetní domény byla zahrnuta ve výpočtu úhlových součinitelů a nebyla zahrnuta ve sledování slunečních paprsků. V případě, že by obloha byla zahrnuta do sledování slunečních paprsků, musela by se nastavit jako průsvitná, aby nestínila dolní část domény.

Výpočtu úhlových součinitelů byla obloha zahrnuta, kvůli zahrnutí vlivu oblohy na tepelnou bilanci povrchu budov a zemského povrchu. Sálání zemského povrchu a povrchu budov vůči obloze bylo uvažováno pro dosažení relevantnějších výsledků.

## 7.4 Zahrnutí vlivu oblohy do tepelné bilance zemského povrchu

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, jedním z cílů této práce je zjistit, jak velký význam má zahrnutí sálání povrchů budov a zemského povrchu vůči obloze v tepelné bilanci. Byly provedeny simulace pro následující teploty oblohy:

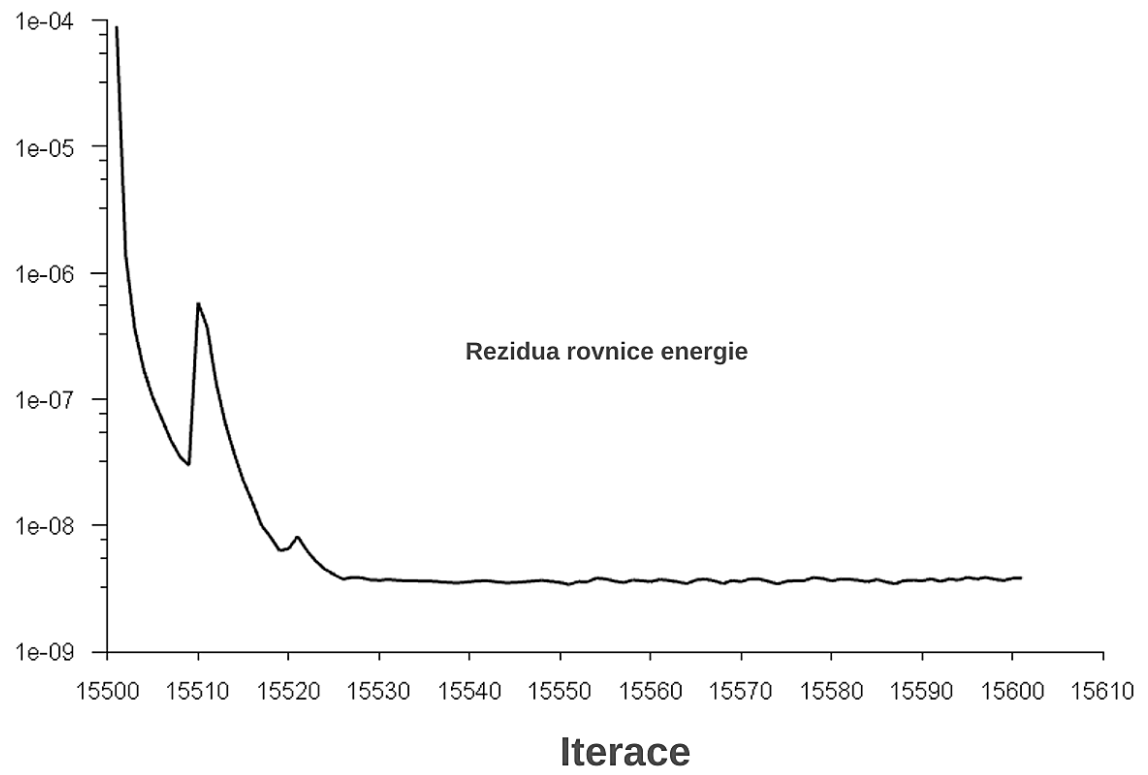
- 305.26 K (odpovídá teplotnímu profilu na Obr. 29 ve výšce 400 m)
- 293.15 K
- 283.15 K
- 273.15 K
- 263.15 K
- 253.15 K
- 243.15 K
- 233.15 K

V rámci úspory výpočetního času byly provedeny simulace s různými teplotami oblohy na modelu, kde řešení přenosu tepla bylo odděleno od řešení proudění. Proudění mezi budovami bylo vyřešeno z předchozí simulace proudění v plném měřítku. Ve výpočtu přenosu tepla byla tedy zahrnuta pouze energetická rovnice.

Účinek vztakových sil je malý v porovnání s vlivem nucené konvekce způsobené větrem o rychlosti 5.9 m/s (ve výšce 2 m nad povrchem dolní hranice). Dá se tedy předpokládat, že u daného modelu by vztakové síly výsledné proudění téměř neovlivnily.

Tento přístup je však v rozporu s tím, jak je simulována mezní vrstva. V této práci je simulována mezní vrstva jako stabilní. Stabilní mezní vrstva se simuluje při podmínkách, kdy je zataženo a advektivní síly (vodorovné) převládají na silami konvektivními (svislé). V práci však simulujeme jasný den, kdy jsou modely budov ozářeny sluncem, a to odpovídá nestabilní mezní vrstvě atmosféry. V tomto ohledu bude třeba zkoumání proudění v nestabilní mezní vrstvě, kterou lze předpokládat za podmínek jasného slunečného dne, kdy je území plně ozářeno sluncem.

Řešení proudění s přenosem tepla by zabralo řádově více času a nebylo by možné získat výsledky pro tolik rozdílných teplot oblohy. Řešení rovnice energie vyžadovalo asi 25 iterací, viz Obr. 30 po kterých se teploty na osluněné návětrné stěně a druhé neosluněné stěně v úplavu ustálil průměr teploty na konstantní hodnotě.



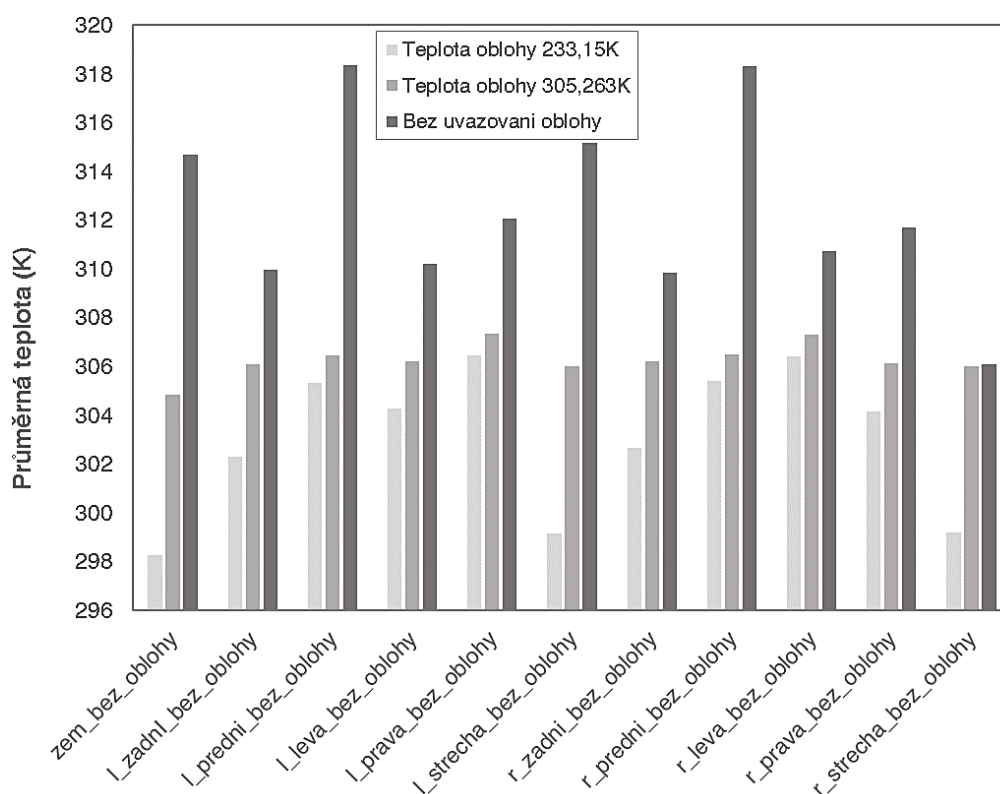
Obr. 30 Rezidua řešení rovnice energie



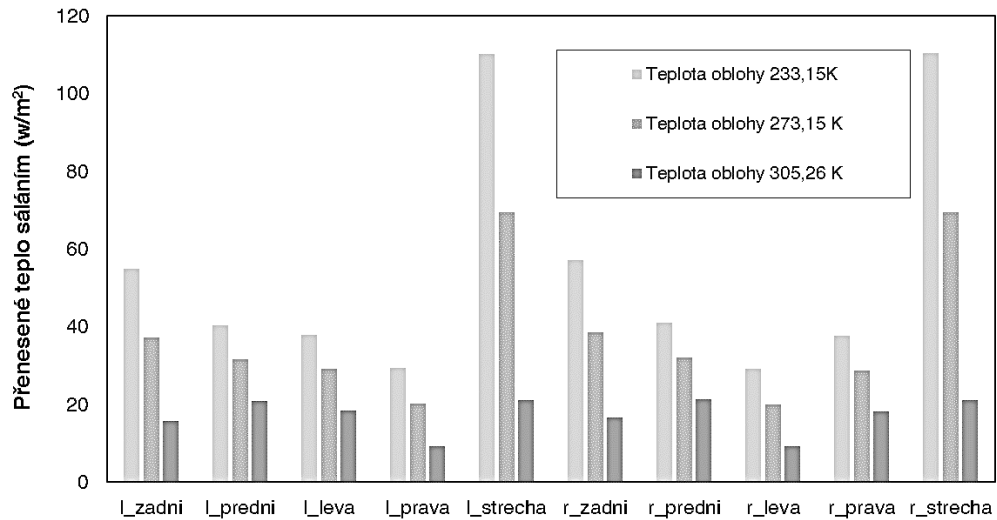
## 7.5 Výsledky větrné studie rozšířené o přenos tepla

Na následujících grafech je vidět porovnání průměrných povrchových teplot stěn budov při rozdílných teplotách oblohy. Na Obr. 31 je vidět, jak teplota, kterou nastavíme jako účinnou teplotu oblohy, ovlivňuje teploty povrchů budov a jak vypadají teploty povrchů budov bez zahrnutí vlivu oblohy do výpočtu solárních zisků. Porovnání na Obr. 31 je provedeno pro nejnižší, nejvyšší teplotu oblohy a bez uvažování oblohy.

Největší rozdíl povrchových teplot v závislosti na změně teploty oblohy mají střechy budov a zemský povrch. Právě horizontální plochy totiž vysálají nejvíce tepla směrem k obloze, která je chladnější, a naopak přijmou více tepla od oblohy, která má vyšší teplotu než jejich povrch. Důvodem je vzájemné promítání rovnoběžných rovin, jejichž součinitel vzájemného osálení je vždy větší než u rovin navzájem kolmých.



Obr. 31 Porovnání průměrných povrchových teplot všech povrchů budov pro minimální/maximální teplotu oblohy a bez zahrnutí oblohy do solárního modelu

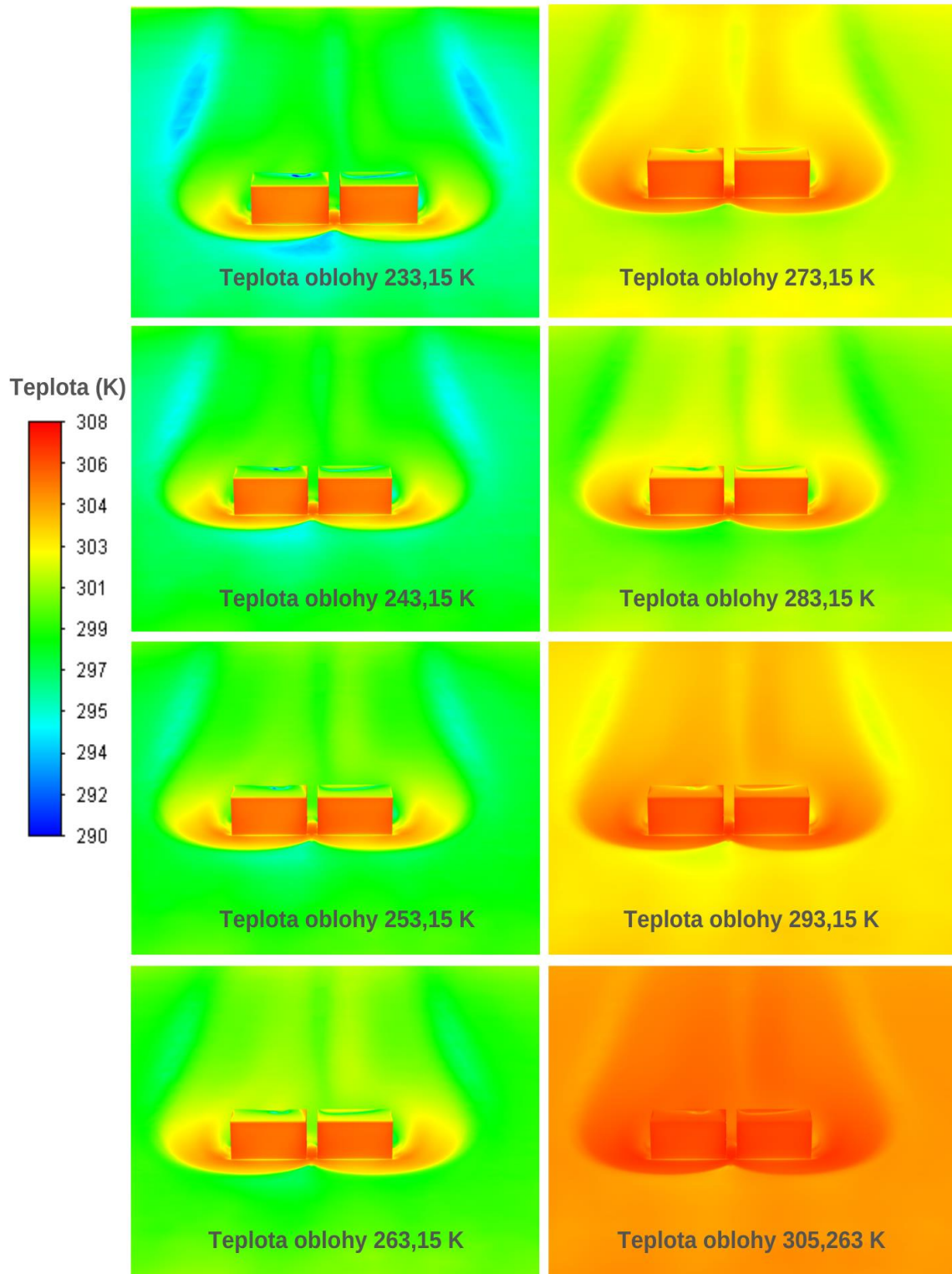


Obr. 32 Porovnání přeneseného tepla sáláním pro tři různé teploty oblohy

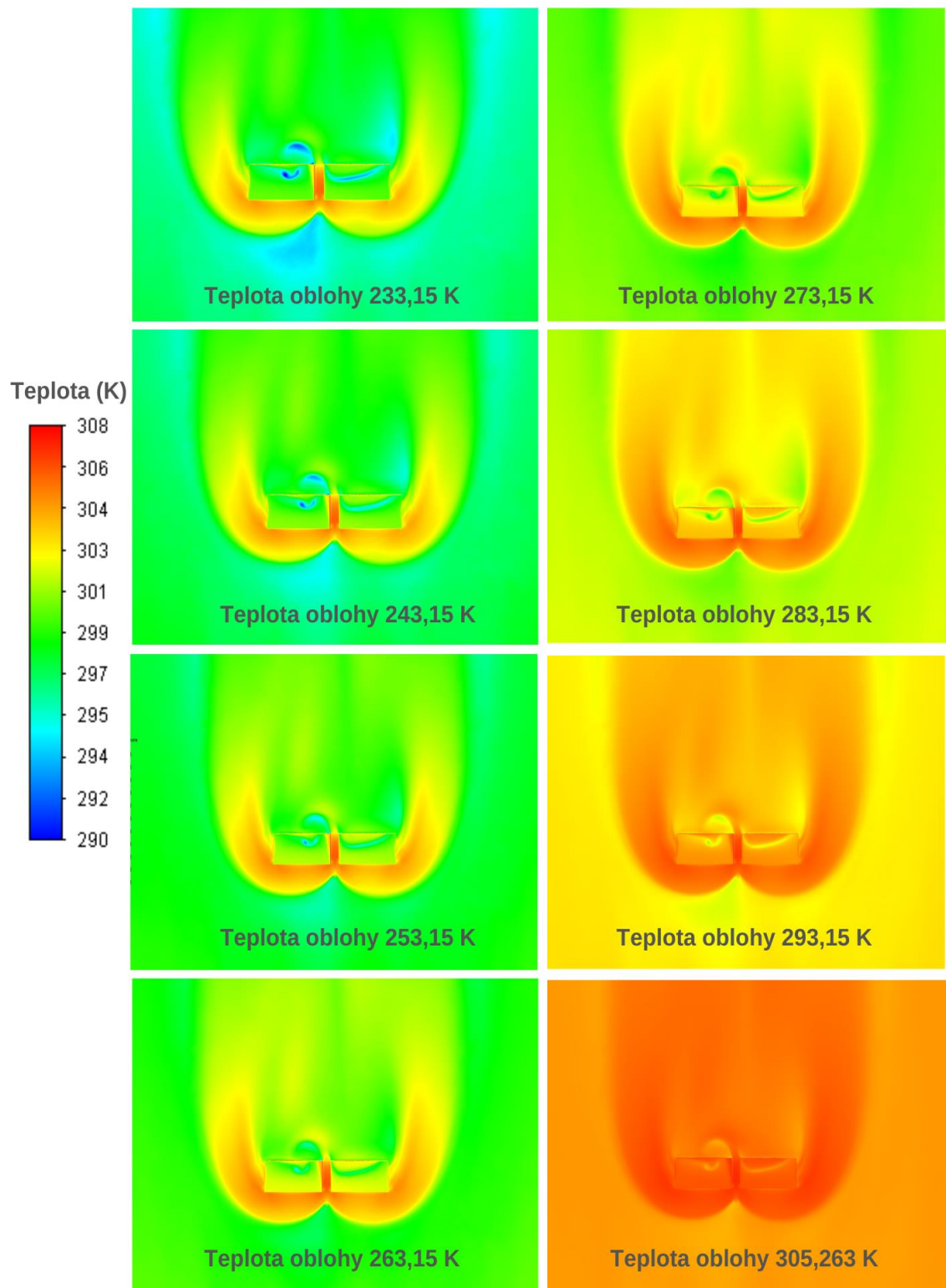
Obr. 32 zobrazuje přenesené teplo sáláním pro tři různé teploty oblohy, je patrné, že čím nižší teplota oblohy se nastaví, tím vyšší je tepelný tok sálání budov vůči obloze.

Na Obr. 33 a Obr. 34 je zcela zřejmé, jak se mění teplotní pole povrchů budov a zemského povrchu se změnou teploty oblohy. Pro nejnižší teplotu oblohy střechy budov a zemský povrch sálají teplo vůči chladnější obloze a v důsledku toho jsou výrazně ochlazovány. Se zvyšující se teplotou oblohy se naopak výsledný tepelný tok, který je určen rozdílem povrchových teplot směrem od povrchu země k obloze snižuje.

Z Obr. 33 a Obr. 34 je patrné, že horizontální povrchy (střechy a zemský povrch) jsou nejvíce ovlivněné nastavenou teplotou oblohy, to že horizontální povrchy sálají vůči obloze největší efektivní plochou je způsobeno zjednodušením geometrie oblohy na rovinu, která je horní hranicí výpočetní oblasti.

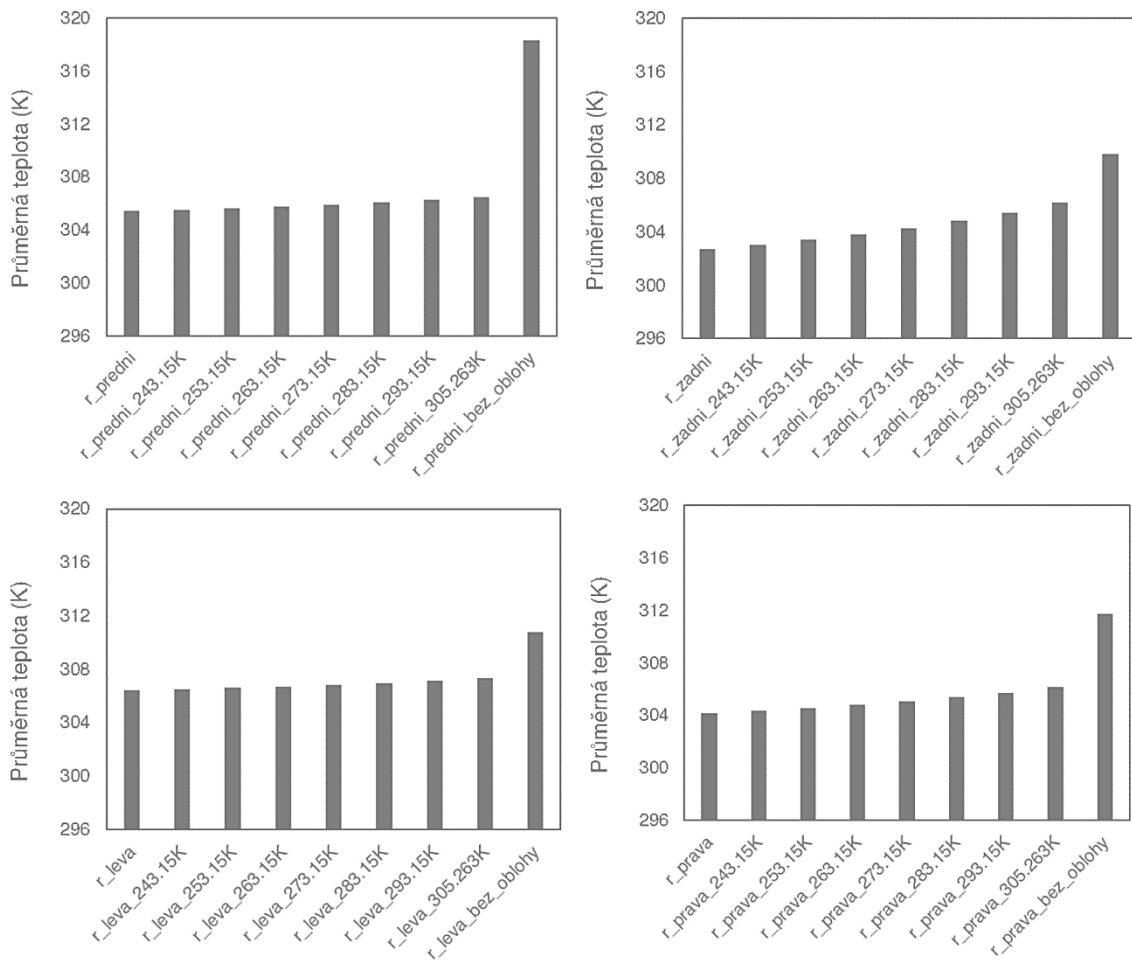


Obr. 33 Obrázek teplotního pole povrchu budov a země pro různé teploty oblohy – pohled zepředu

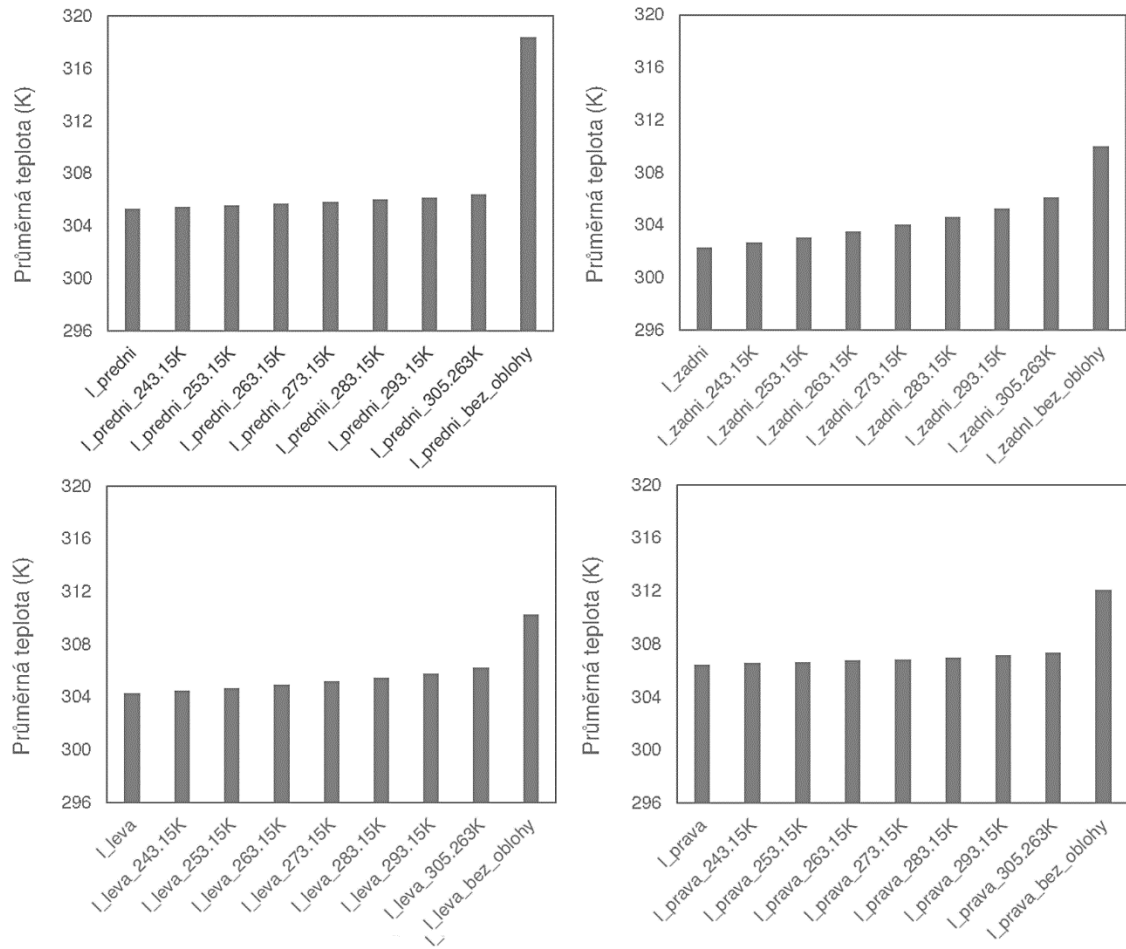


Obr. 34 Obrázek teplotního pole povrchu budov a země pro různé teploty oblohy – pohled shora

Obr. 35 a Obr. 36 ukazují porovnání průměrných povrchových teplot vertikálních stěn budov a jejich změnu se změnou teploty oblohy (r\_prava budova, l\_leva budova). Z Obr. 35, Obr. 36 a Obr. 37 je zcela zřejmé, jak velký vliv může mít zahrnutí oblohy na výsledné povrchové teploty budov. Povrchové teploty stěn budov pro model, kdy nebyl uvažován vliv oblohy jsou nadhodnocené a zcela jistě neodpovídají realitě (Obr. 35 a Obr. 36 sloupec vpravo, uvažování sálání proti obloze je proto velice důležité).

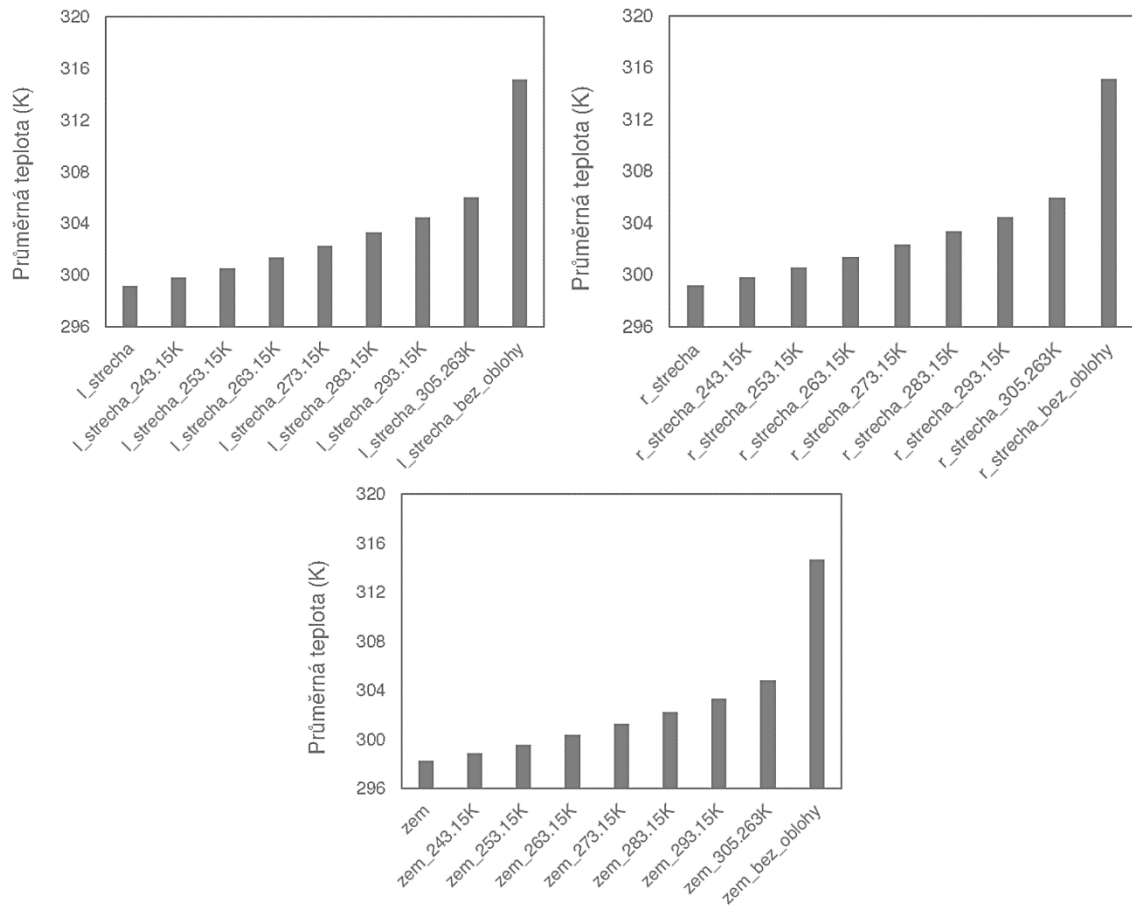


Obr. 35 Porovnání průměrných povrchových teplot vertikálních stěn pravé budovy pro různé teploty oblohy



Obr. 36 Porovnání průměrných povrchových teplot vertikálních stěn levé budovy pro různé teploty oblohy

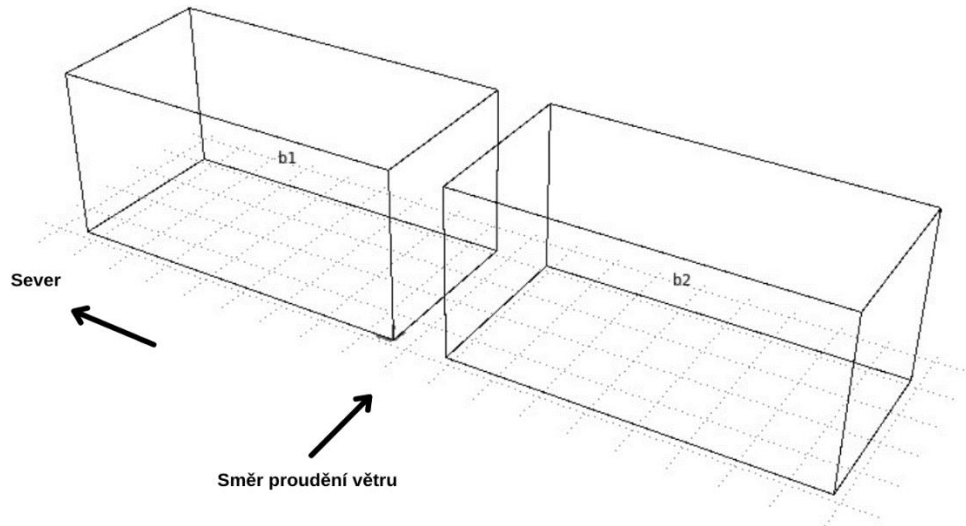
Obr. 37 ukazuje porovnání průměrných povrchových teplot horizontálních povrchů (zemský povrch, střechy budov), které jsou nejvíce ovlivněné nastavenou teplotou oblohy.



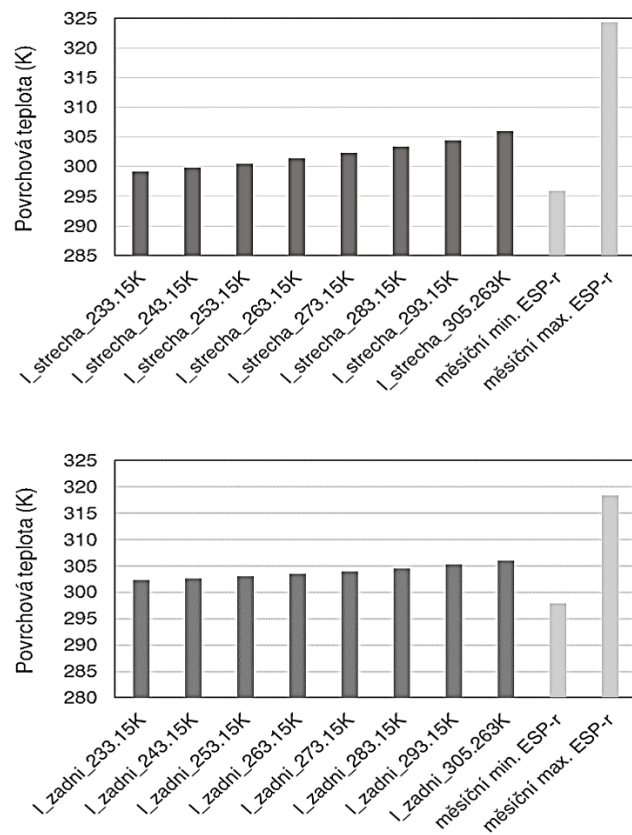
Obr. 37 Porovnání průměrných povrchových teplot střech budov a země pro různé teploty oblohy

## 8 Porovnání výsledků z Fluentu s výsledky z ESP-r

Pro porovnání výsledků byla provedena energetická simulace v programu ESP-r pro celý měsíc červenec za podmínek z databáze počasí TMY Praha-Libuš 2004-2018, která obsahuje extrémní den, který byl použit pro simulaci ve Fluentu.

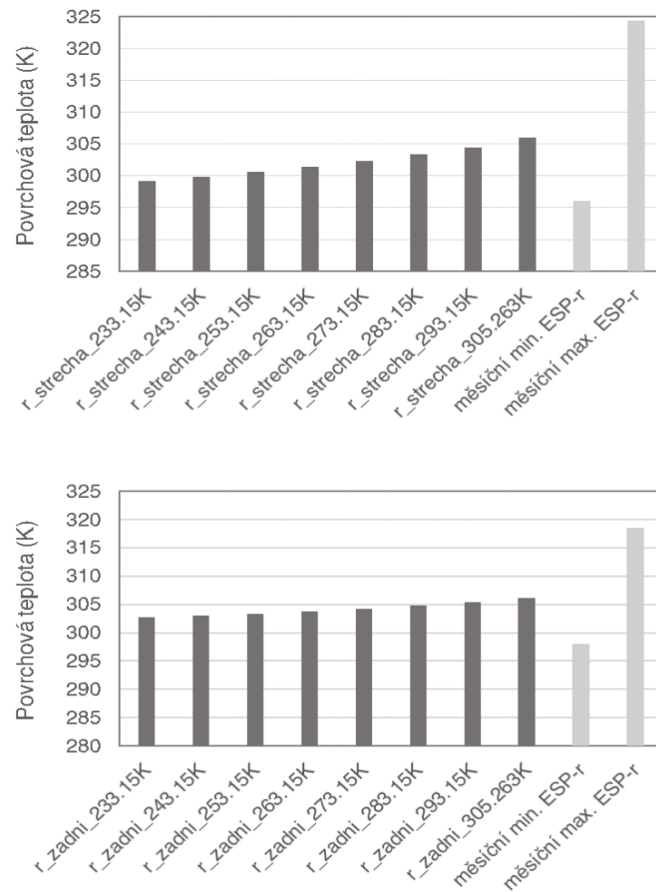


Obr. 38 Model budov v programu ESP-r



Obr. 39 Porovnání povrchových teplot levé budovy (pro různé teploty oblohy) z Fluentu s teplotami z ESP-r





Obr. 40 Porovnání povrchových teplot pravé budovy (pro různé teploty oblohy) z Fluentu s teplotami z ESP-r

Na Obr. 39 a Obr. 40 je vidět porovnání povrchových teplot střech a zadních stěn obou budov pro různé nastavení teploty oblohy z Fluentu s teplotami získanými z energetické simulace v programu ESP-r.

Z ESP-r bylo vzato měsíční minimum a maximum v čase 16:30 odpovídající extrémní teplotě vzduchu, která byla použita pro simulaci ve Fluentu. Minimum a maximum je vzato ze sady teplot v čase 16:30 v průběhu celého července. Povrchové teploty z CFD spadají do intervalu povrchových teplot z energetické simulace. Hodnoty v čase extrému (16.7. 16:30) z programu ESP-r a Fluentu se liší. Teplota pravé střechy v čase 16.07. 16:30 z ESP-r je 324.5 K, zatímco ze CFD je 316 K. To může být způsobeno tím, že v CFD studii je uvažován vítr s relativně vysokou rychlostí, který bude více ochlazovat povrch. V ESP-r je rychlost proudění větru ve výšce 10 m 2 m/s a ve Fluentu je rychlost větru ve stejné výšce 8.8 m/s, což povede k vyššímu součiniteli přestupu tepla.

## 9 Diskuze k použití solárního modelu a sálání vůči obloze

Jaký vliv má teplota nastavené oblohy, je nejlépe vidět na Obr. 33 a Obr. 34. Největší teploty dle grafu mají stěny l\_prava a r\_leva, to jsou stěny, které tvoří průchod mezi budovami a jsou nejvíce ovlivněné vlivem vzájemného sálání a odražené sluneční radiace. To lze pozorovat na Obr. 33 a Obr. 34, kde jsou vidět nejvíce tepelně ovlivněné oblasti.

Pro ideální výsledek by obloha musela být vymodelována jako obrovská polokoule, aby bylo lépe patrné sálání vertikálních stěn vůči obloze. Pro zpřesnění výpočtu povrchových teplot solárními zisky je však zřejmé (Obr. 35, Obr. 36 a Obr. 37), jak velký vliv může mít na samotný výpočet právě nastavená teplota oblohy. Zde je třeba dalšího výzkumu, aby se ukázalo, jaké nastavení teploty oblohy poskytne správné výsledky odpovídající realitě. Obloha je zde uvažována jako horní hranice výpočetní domény, její výška nad zemským povrchem a povrchy budov bude mít zcela jistě vliv na výsledné efekt sálání vůči obloze a je zde třeba dalšího výzkumu pro porovnání a ověření výsledků.

Z porovnání výsledků ze CFD simulací s výsledky z energetické simulace v programu ESP-r je vidět, že zde bude hrát velkou roli rychlost proudění větru kolem budov na výsledný součinitel přestupu tepla, který se přirozeně s vyšší rychlostí proudění bude zvyšovat.

## 10 Závěr

Práce rozšiřující studii [8] se v první části věnovala proudění větru mezi budovami s možným vznikem Venturiho efektu v průchodu mezi budovami. Na modelu v měřítku 1:40 se podařilo ověřit výsledky ze studie a prohloubit znalosti ohledně nastavení okrajových podmínek a porovnat je. Nejprve byla provedena simulace proudění, kde se na boční stěny a strop výpočetní domény použila okrajová podmínka stěny s prokluzem, poté byla na tom samém modelu provedena simulace, kde boční stěny a strop byly definovány okrajovou podmínkou symetrie. Porovnáním profilů rychlosti, turbulentní kinetické energie a rychlosti disipace TKE procházejících výpočetní doménou bylo zjištěno, že při použití okrajové podmínky symetrie (pro boční stěny a strop výpočetní domény) nedochází k tak výrazné deformaci profilů a výsledky odpovídaly výsledkům ze studie [8]. Při použití solárního modelu ale nelze symetrii použít, protože neumožňuje nastavení okrajových podmínek pro přenos tepla.

Další důležitý poznatek je, že stěnové funkce modifikované pro drsnost, které jsou v současné době implementovány v mnoha komerčních CFD kódech, vycházejí z experimentálních dat pro proudění přes pískově zdrsňenou stěnu. Tyto funkce mohou být užitečné pro modelování proudění v drsných trubkách, ale mohou být nevhodné pro simulaci proudění v atmosférických mezních vrstvách (ABL). Jejich použití může vést k horizontální nehomogenitě středního větru. Je důležité vždy k simulaci s budovami provést i simulaci bez budov a sledovat deformaci rychlostního profilu při průchodu výpočetní doménou a následně jí zohlednit při vyhodnocování výsledků odpovídající korekcí.

Převod modelu v měřítku 1:40 do plného měřítka kvůli použití solárního modelu se ukázal být překvapivě komplikovaným. Zvětšení původního modelu 1:40 pravděpodobně způsobilo transformaci numerické sítě modelu do podoby, v níž výpočet nekonvergoval. Bylo nutné snížit výšku výpočetní domény, upravit profily rychlosti, kinetické energie turbulence a disipace turbulence a přenastavit limit pro poměr turbulentní a molekulární viskozity.

Na modelu v plném měřítku jsem nejprve provedl simulaci s konstantními hodnotami turbulentní kinetické energie a rychlosti disipace TKE. Přitom se předpokládá, že se profily při průchodu výpočetní doménou samy vyvinou. Při snaze o maximální možnou

shodu s výsledky s modelem v měřítku 1:40 byla provedena i simulace s profily TKE a rychlosti disipace TKE.

Nakonec byl přidán model solární radiace, kde bylo dalším cílem zjistit, jaký vliv bude mít sálání vůči obloze. Byly provedeny simulace, kde se použil stabilní model proudění, který při simulaci s profily  $k$  a  $\varepsilon$  u simulace v plném měřítku. Tím došlo ke zjednodušení, kdy jsem se z logických důvodů rozhodl pro zanedbání vlivu vztlakových sil, protože by byly málo významné. Díky tomu jsem mohl provést simulace pro několik teplot oblohy a porovnat výsledky.

Z výsledků je zřejmé, že právě nastavení teploty oblohy má velký vliv na výslednou teplotu povrchů budov a zemského povrchu. Nejvíce ovlivněné nastavenou teplotou oblohy byly horizontální povrchy (střechy a zemský povrch). Obloha zde byla zjednodušeně uvažována jako strop výpočetní domény, proto byly nejvíce ovlivněné horizontální povrchy. V praxi by pravděpodobně docházelo i k většímu ovlivnění vertikálních stěn budov, protože by sálaly vůči obloze ve tvaru polokoule.

Nastavení horní hranice výpočetní domény jako oblohy bude pravděpodobně ovlivněno výškou výpočetní domény, tzn. jak vysoko se obloha nachází nad zemským povrchem a budovami. V důsledku toho je zapotřebí dalšího výzkumu, aby se rozšířila platnost současných zjištění.

Námětem pro další práci je analýza proudění v nestabilní mezní vrstvě, kterou lze předpokládat za jasného dne, kdy je území plně ozářeno sluncem.

**Použité zdroje**

- [1] ČEHELOVÁ, D., M. JANÁK a B. BIELEK. HODNOTENIE ÚČINKU VETRA NA BUDOVY A ĽUDÍ POMOCOUCO METÓD CFD. *Simulace budov a techniky prostředí 2014: 8. konference IBPSA-CZ*. Praha, 2014, 6.
- [2] NIEUWSTADT, F.T.M. The Turbulent Structure of the Stable, Nocturnal Boundary Layer. *Journal of the atmospheric sciences*. The Netherlands: Royal Netherlands meteorological institute, 1984, 41(No.14).
- [3] STULL, R. *The Atmospheric Boundary Layer* [online]. Vancouver, Canada: University of British Columbia [cit. 2022-01-02].
- [4] KUBÍČEK, M. *Vliv větru na komfort chodců v městském prostředí*. Praha, 2016. Diplomová. ČVUT Fakulta Strojní, 12116 - Ústav techniky prostředí. Vedoucí práce M. Barták.
- [5] NOSEK, Š. Modelování mezní vrstvy atmosféry v aerodynamických tunelech (1. část). *Vytápění větrání instalace*. 2013, 22(2), 78-82. ISSN 1210-1389.
- [6] NOSEK, Š. *Modelování mezní vrstvy atmosféry v aerodynamických tunelech (2. část)*. 2013, 22(5), 208-212. ISSN 1210-1389.
- [7] Meteorologický slovník [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: [www.cmes.cz](http://www.cmes.cz)
- [8] BLOCKEN, B., J. CARMELIET a T. STATHOPOULOS. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings—effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. The Netherlands: Technische Universiteit Eindhoven, 2007, 95, 941–962.
- [9] CEJNAR, J. *Vliv slunečního záření v CFD simulaci vnitřního prostředí*. Praha, 2006. Diplomová. ČVUT Fakulta strojní, 12116 - Ústav techniky prostředí. Vedoucí práce M. Barták.
- [10] WU, Hanqing. *Pedestrian - level wind environment around buildings*. Montreal, Quebec, Canada, 1994, 51 s. Doktorská. Concordia university.
- [11] BEDNÁŘ, J. a O. ZIKMUNDA. *Fyzika mezní vrstvy atmosféry*. 1. Praha: Academia, 1985. 248 s.
- [12] BARTÁK, Martin. *Úvod do přenosových jevů pro inteligentní budovy*. Praha, 2010, 107.
- [13] KOPÁČEK, J. a J. BEDNÁŘ. *Jak vzniká počasí*. Praha: Karolinum, 2005. 226 s.
- [14] ANSYS Fluent User's Guide [online]. 1. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, 2020, 4576 s. [cit. 2021-11-15].
- [15] FRANKE, J. a A. BAKLANOV. *BEST PRACTICE GUIDELINE FOR THE CFD SIMULATION OF FLOWS IN THE URBAN ENVIRONMENT*. Hamburg, Germany: University of Hamburg, 2007. 53 s.

- [16] ROBINS, A. G., et al. Evaluating modelling uncertainty in CFD predictions of building affected dispersion. *International Journal of Environment and Pollution*, 2000, 14.1-6: 52-64.
- [17] COWAN, Ian R.; CASTRO, Ian P.; ROBINS, Alan G. Numerical considerations for simulations of flow and dispersion around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1997, 67: 535-545.
- [18] BLOCKEN, Bert; STATHOPOULOS, Ted; CARMELIET, Jan. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmospheric environment*, 2007, 41.2: 238-252.
- [19] CHARVÁTOVÁ, Pavlína. Matematická simulace průběhu teplot v podzákladí a vytvoření modelu odpovídajícího reálnému stavu. Brno, 2020. Disertační. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce K. Čupr.
- [20] STATHOPOULOS, T. Design and fabrication of a wind tunnel for building aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1984, 16.2-3: 361-376.
- [21] Blocken B. Konzultace ohledně maximální hodnoty poměru turbulentní a molekulární viskozity 14.11.2021
- [22] ANSYS Fluent Tutorial Guide [online]. 1. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, 2020, 4576 s. [cit. 2021-11-15].
- [23] ANSYS Fluent Theory Guide [online]. 1. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, 2020, 1052 s. [cit. 2021-11-15].
- [24] JANSSEN, W. D.; BLOCKEN, Bert; VAN HOOFF, Twan. Pedestrian wind comfort around buildings: Comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study. *Building and Environment*, 2013, 59: 547-562.
- [26] BLOCKEN, Bert; GUALTIERI, Carlo. Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33: 1-22.
- [27] BLOCKEN, Bert. Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 2015, 91: 219-245.
- [28] KUBEN, Jaromír. Anglická matematická terminologie. 188.
- [29] BLOCKEN, Bert; JANSSEN, W. D.; VAN HOOFF, Twan. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 30: 15-34.
- [30] BLEJCHAŘ, Tomáš. *Turbulence modelování proudění-CFX*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. 269 s.

[31] SHIH, T.H., W.W. LIOU, A. SHABBIR, Z. YANG a J. ZHU. *A New  $k$ - $\varepsilon$  Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation*. *Computers Fluids*. 24(3). 227–238. 1995.

[32] REVUZ, Julia; HARGREAVES, D. M.; OWEN, J. S. On the domain size for the steady-state CFD modelling of a tall building. *Wind and structures*, 2012, 15.4: 313.