



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Ing. Vladimír Gerlich

**Ověření možnosti využití programu COMSOL
Multiphysics jako prostředí pro simulace tepelného
chování systémů s akumulací**

**Verification of possibility of using COMSOL
Multiphysics as simulation tool for heat transfer
calculation in systems with accumulation**

Disertační práce

Školitel: prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

Konzultant: Ing. Martin Zálešák, CSc.

Studijní obor: Inženýrská informatika

Zlín, 2012

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval několika lidem. Zejména mému školiteli prof. Ing. Vladimíru Vaškovi, CSc. a odbornému konzultantovi Ing. Martinovi Zálešákovi, CSc., kteří mi ukázali způsob práce na akademické půdě a po dobu mého působení na akademické půdě mně pomáhali při řešení aktuálních potíží.

Dále bych chtěl poděkovat ostatním doktorandům za vytvoření příjemného pracovního prostředí. Zejména pak kolegům z mé kanceláře Karlu Ševčíkovi a Radimu Pišanovi a dále pak Martinu Křůmalovi za pomoc při tvorbě geometrie modelů a Michalu Procházkovi za podnětné poznámky nejen k důležitosti doktorského studia.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodičům a bratru Michalovi.

Největší díky patří milované přítelkyni Martině, která mne vždy podporuje a motivuje k další práci.

RESUMÉ

Simulace tepelného chování systémů s akumulací slouží při současném ekonomicko-ekologickém trendu snažícím se o snižování nákladů na provoz těchto zařízení jako prostředek pro jeho uskutečňování. Tato práce se proto zabývá validací simulačního programu, který se neomezuje pouze na modelování a výpočet tepelného chování systémů, ale umožňuje i simulaci dalších fyzikálních dějů (např. přenos vlhkosti).

Analytická část disertační práce se skládá z teoretického popisu přenosu tepla (s důrazem zejména na části, které jsou důležité pro popis tohoto děje v prostředí budov), poskytuje zdůvodnění zaměření této práce na program COMSOL Multiphysics a v závěrečné části se zabývá problematikou numerického řešení diferenciálních rovnic.

Jednotlivými validačními kroky, ve kterých dochází k propojení teoretických poznatků čerpaných z literatury s tvorbou modelů založených na přenosu tepla, se zabývá praktická část této práce. Jsou zde porovnány simulační výstupy vytvořených modelů jak s analytickými výsledky (analytická verifikace), tak i s výsledky dalších simulačních programů (komparativní test) a hodnot získaných měření (experimentální verifikace).

Dílčí problémy nastaly zejména s výpočtem přenosu tepla sáláním mezi vnitřními povrchy místnosti. Po vyhodnocení všech dílčích úkolů a jednotlivých odchylek modelů je program COMSOL Multiphysics shledán vhodným nástrojem pro modelování fyzikálních dějů založených na numerickém řešení parciálních diferenciálních rovnic.

SUMMARY

The economic and ecological trend in reducing costs of building operations caused growing importance of modelling and simulation of these systems in recent years. This work is, therefore, focused on the validation process of the simulation software COMSOL Multiphysics. This software is used for the heat transfer calculation in this work, although it is not specialized only in this effect. The software allows calculation of multiphysic systems (coupling and simulation of more physical effects in parallel), but it also offers the possibility of creating models connected to the MATLAB environment to control the specific model parameters.

The analytical part consists of a theoretical introduction to the heat transfer in buildings, and presents reasons for focusing on the COMSOL Multiphysics. Finally, it brings a brief illustration of numerical solution of differential equations.

The practical part is focused on three basic validation steps, which connects the theoretical background with the creation of practical models. The simulation outputs of the COMSOL Multiphysics software are compared with the analytical results (analytical verification) as well as with the results from other simulation software (comparative test), and finally to the experimental results (experimental verification).

As a conclusion of the test results the COMSOL Multiphysics is successfully validated with minor deficiencies when using for the calculation of the heat transfer by radiation, which brings problems with calculating the heat transfer by radiation between the internal wall surfaces.

Obsah

RESUMÉ	5
SUMMARY	6
SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	12
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	14
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	16
1 ÚVOD.....	17
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY – LITERÁRNÍ REŠERŠE	21
3 HLAVNÍ CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	24
TEORETICKÁ ČÁST.....	26
4 PŘENOS TEPLA VE VNITŘNÍM PROSTŘEDÍ BUDOV	27
4.1 TEPELNÉ POCHODY	29
4.1.1 <i>Stacionární tepelné pochody.....</i>	<i>30</i>
4.1.2 <i>Dynamické tepelné pochody</i>	<i>30</i>
4.2 DYNAMICKÉ TEPELNÉ SIMULACE PROSTŘEDÍ BUDOV.....	30
4.3 PŘENOS TEPLA V MÍSTNOSTI	31
4.4 OKRAJOVÉ A POČÁTEČNÍ PODMÍNKY	33
4.5 UKÁZKA ŘEŠENÍ NESTACIONÁRNÍ ROVNICE VEDENÍ TEPLA.....	34
4.6 ZJEDNODUŠENÉ METODY	35
4.7 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ	36
5 NÁSTROJE PRO MODELOVÁNÍ FYZIKÁLNÍCH DĚJŮ	38
5.1 SIMULAČNÍ PROGRAMY SCHOPNÉ PARALELNÍHO VÝPOČTU VÍCERO DĚJŮ	39
5.2 COMSOL MULTIPHYSICS	41
5.2.1 <i>Postup tvorby modelu</i>	<i>43</i>
5.2.2 <i>Zpracování simulačních výstupů.....</i>	<i>43</i>
5.3 OVĚŘENÍ PŘESNOSTI SIMULAČNÍCH VÝSTUPŮ.....	43
6 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ DIFERENCIÁLNÍCH ROVNIC	45
6.1 ŘEŠENÍ OBYČEJNÝCH DIFERENCIÁLNÍCH ROVNIC	45
6.2 ŘEŠENÍ PARCIÁLNÍCH DIFERENCIÁLNÍCH ROVNIC	46
6.3 UKÁZKA NUMERICKÉHO ŘEŠENÍ ROVNICE VEDENÍ TEPLA	47
6.4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ.....	51
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	52

7	ZÁKLADNÍ KROKY VALIDACE PROGRAMU COMSOL MULTIPHYSICS	53
8	VALIDACE POMOCÍ ANALYTICKÝCH MODELŮ	56
8.1	VALIDACE POMOCÍ ODVOZENÝCH ANALYTICKÝCH MODELŮ.....	56
8.1.1	<i>Výpočet teploty v simulačním rozhraní COMSOL Multiphysics</i>	<i>58</i>
8.1.2	<i>Porovnání průběhu teploty analytického a numerického modelu.....</i>	<i>59</i>
8.2	VALIDACE POMOCÍ MODELŮ POPSANÝCH V ASHRAE 1052-RP TOOLKIT	61
8.2.1	<i>Popis jednotlivých modelů.....</i>	<i>61</i>
8.2.2	<i>Vyhodnocení výsledků testů z první skupiny.....</i>	<i>64</i>
8.2.3	<i>Vyhodnocení výsledků testů ze čtvrté skupiny</i>	<i>69</i>
8.2.4	<i>Vyhodnocení výsledků testů z páté skupiny</i>	<i>71</i>
8.3	ZÁVĚR.....	72
9	VALIDACE POMOCÍ SROVNÁVACÍHO TESTU IEA BESTEST TASK 34.....	74
9.1	POPIS JEDNOTLIVÝCH VARIANT MODELU	75
9.2	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	79
9.2.1	<i>Porovnání výsledků stacionárních variant modelu</i>	<i>80</i>
9.2.2	<i>Porovnání výsledků nestacionárních variant modelu.....</i>	<i>83</i>
9.3	ZÁVĚR.....	86
10	EXPERIMENTÁLNÍ VALIDACE POMOCÍ PROVEDENÉHO MĚŘENÍ.....	88
10.1	MĚŘENÍ TEPLoty V MÍSTNOSTI.....	88
10.2	TVORBA GEOMETRIE OBJEKTU	89
10.3	TVORBA NUMERICKÉHO MODELU.....	90
10.4	OVĚŘENÍ PŘESNOSTI MODELU POMOCÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	91
10.4.1	<i>Popis prvního experimentu.....</i>	<i>92</i>
10.4.2	<i>Vyhodnocení dat získaných během prvního experimentu</i>	<i>94</i>
10.4.3	<i>Popis druhého experimentu.....</i>	<i>100</i>
10.4.4	<i>Vyhodnocení dat získaných během druhého experimentu</i>	<i>101</i>
10.5	ZÁVĚR	104
11	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	105
12	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	107
13	ZÁVĚR.....	108
13.1	TEORETICKÝ A ANALYTICKÝ ROZBOR DANÉ PROBLEMATIKY	108
13.2	ANALYTICKÁ VERIFIKACE – POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MODELŮ ZÍSKANÝCH ANALYTICKÝM A NUMERICKÝM VÝPOČTEM	108

13.3	KOMPARATIVNÍ TEST – POROVNÁNÍ HODNOT VYPOČTENÝCH NĚKOLIKA SIMULAČNÍMI PROGRAMY	109
13.4	EXPERIMENTÁLNÍ VALIDACE – POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT PRŮBĚHŮ TEPLOTY S NUMERICKÝM MODELEM.....	109
13.5	ZHODNOCENÍ SCHOPNOSTÍ SIMULAČNÍHO SOFTWARE	110
14	PUBLIKAČNÍ AKTIVITY	111
15	LITERATURA	114
16	ŽIVOTOPIS AUTORA	121
17	PŘÍLOHY	124

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 4.1: Ukázka šíření tepla v místnosti</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4.2 - Vytvořená síť pro numerický výpočet na modelu místnosti.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5.1: Moduly programu CM</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 6.1: Schémata pro numerické řešení parabolické rovnice</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 8.2: Srovnání odchylek mezi analytickým a numerickým řešením v závislosti na počtu DOF.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 8.3: Srovnání průběhu teploty v desce s okrajovou podmínkou prvního druhu.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 8.4: Srovnání průběhu teploty v desce s okrajovou podmínkou třetího druhu.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 8.5: Porovnání průběhů hodnot (teploty na vnějším a vnitřním povrchu a tepelného toku) analytického řešení a hodnot získaných výpočtem v programu CM testu TC1</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 8.6: Porovnání průběhů hodnot (teploty na vnějším a vnitřním povrchu a tepelného toku) analytického řešení a hodnot získaných výpočtem v programu CM testu TC2</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 8.7: Porovnání průběhů hodnot (vnější teploty a tepelného toku) analytického řešení a hodnot získaných výpočtem v programu CM testu TC3</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 8.8: Tepelný tok mezi jednotlivými stěnami místnosti testu IntLWRad</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 9.1: Schematický náčrt geometrie jednotlivých variant modelu s vyznačenými okrajovými podmínkami [33]</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 9.2: Porovnání výsledků tepelných toků stacionárních variant modelu.....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 9.3: Porovnání výsledků množství přeneseného tepla za jeden rok nestacionárních variant modelu.....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 10.1: Okolí modelované laboratoře</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 10.2: Geometrie modelu laboratoře.....</i>	<i>90</i>
<i>Obr. 10.3: Geometrie modelu místnosti použitá při prvním experimentu</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 10.4: Srovnání průběhů teploty vnitřního vzduchu při prvním experimentu.....</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 10.5: Průběh absolutní hodnoty odchylky mezi teplotou naměřenou během prvního experimentu a získanou simulací</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 10.6: Tepelný tok procházející stěnou sousedící s místností 54/306.....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 10.7: Tepelný tok procházející stěnou sousedící s místností 54/308.....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 10.8: Tepelný tok procházející stěnou sousedící s chodbou.....</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 10.9: Tepelný tok procházející podlahou</i>	<i>98</i>

<i>Obr. 10.10: Tepelný tok procházející vnější stěnou</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 10.11: Tepelný tok procházející stropem</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 10.12: Geometrie modelu místnosti použítá při druhém experimentu</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 10.13: Srovnání průběhů teploty vnitřního vzduchu při druhém experimentu (model počítal s konstantní hodnotou SPT na vnitřních površích)</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 10.14: Srovnání průběhů teploty vnitřního vzduchu při druhém experimentu (model počítal s proměnnou hodnotou SPT na vnitřních površích).....</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 17.1: Grafické porovnání Nusseltova kritéria v závislosti na Rayleighově čísle pro přirozené proudění podél svislé stěny.....</i>	<i>129</i>
<i>Obr. 17.2: Porovnání hodnot SPT konvekci podél svislé stěny.....</i>	<i>130</i>
<i>Obr. 17.3: Porovnání hodnot Nusseltova čísla v závislosti na Rayleighově čísle pro volné proudění na vodorovné stěně.....</i>	<i>132</i>
<i>Obr. 17.4: Porovnání hodnot SPT konvekci podél vodorovné stěny.....</i>	<i>133</i>
<i>Obr. 17.5: Porovnání hodnot numerického řešení rovnice vedení tepla v časových krocích a) 0,25 s, b) 0,5 s, c) 0,75 s a d) 1 s.....</i>	<i>139</i>
<i>Obr. 17.6: Celkový pohled na laboratoř</i>	<i>140</i>
<i>Obr. 17.7: Měřicí místo a stanice Almemo 2390-8</i>	<i>140</i>
<i>Obr. 17.8: Srovnání fotky a termosnímků přilehlé učebny 54/306.....</i>	<i>141</i>
<i>Obr. 17.9: Srovnání fotky a termosnímků přilehlé učebny 54/308.....</i>	<i>141</i>
<i>Obr. 17.10: Srovnání fotky a termosnímků vnější stěny laboratoře</i>	<i>141</i>
<i>Obr. 17.11: Řez jižního křídla budovy FAI</i>	<i>142</i>
<i>Obr. 17.12: Schéma laboratoře.....</i>	<i>143</i>
<i>Obr. 17.13: Schéma učebny 54/306.....</i>	<i>143</i>
<i>Obr. 17.14: Schéma kancelářské místnosti 54/308</i>	<i>144</i>
<i>Obr. 17.15: Schéma chodby</i>	<i>144</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 5.1: Srovnání možností vybraných programů pro numerické simulace</i>	40
<i>Tab. 7.1: Výhody a nevýhody jednotlivých kroků validačního postupu [2], [35]</i>	54
<i>Tab. 8.1: Parametry modelu pro srovnání s analytickým řešením</i>	57
<i>Tab. 8.2: Vývoj odchylky mezi analytickým a numerickým řešením v závislosti na DOF</i>	58
<i>Tab. 8.3: Popis jednotlivých tvořených testů představených v práci [33]</i>	62
<i>Tab. 8.4: Srovnání výsledků analytického a numerického řešení stacionárního testu SSConv</i>	64
<i>Tab. 8.5: Srovnání výsledků analytického a numerického řešení stacionárního testu SSCond</i>	65
<i>Tab. 8.6: Statistické zhodnocení průběhů hodnot z nestacionárních testů ze skupiny I</i>	67
<i>Tab. 8.7: Statistické vyhodnocení průběhů hodnot výsledků testu ExtLWRad</i>	70
<i>Tab. 8.8: Statistické zhodnocení průběhů hodnot výsledků testu IntLWRad</i>	71
<i>Tab. 8.9: Statistické zhodnocení výsledků testu GrdCoup</i>	72
<i>Tab. 9.1: Výchozí nastavení fyzikálních a geometrických parametrů modelu</i>	75
<i>Tab. 9.2: Nastavení odchylek jednotlivých parametrů variant modelu od výchozího nastavení</i>	76
<i>Tab. 9.3: Odchylky toku tepla vypočteného v programu CM od průměrné hodnoty vypočtené validovanými programy – stacionární případy</i>	81
<i>Tab. 9.4: Srovnání odchylek stacionárních variant modelu</i>	82
<i>Tab. 9.5: Odchylky toku tepla vypočteného v programu CM od průměrné hodnoty vypočtené validovanými programy – nestacionární případy</i>	84
<i>Tab. 9.6: Srovnání odchylek nestacionárních variant modelu</i>	86
<i>Tab. 10.1: Rozměry a materiálové vlastnosti částí geometrie modelu použité při numerickém výpočtu prvního experimentu</i>	94
<i>Tab. 10.2: Tepelná energie jdoucí přes jednotlivé povrchy místnosti</i>	100
<i>Tab. 10.3: Statistické vyhodnocení rozdílů mezi simulací a měřením pro několik hodnot SPT</i>	103
<i>Tab. 17.1: Hodnota SPT na vnitřních a vnějších površích konstrukcí</i>	126
<i>Tab. 17.2: Vztahy pro výpočet Nusseltova čísla pro volné proudění podél svislé stěny</i> ..	127
<i>Tab. 17.3: Vztahy pro výpočet SPT konvekce podél svislé stěny</i>	128

<i>Tab. 17.4: Vztahy pro výpočet Nusseltova čísla pro volné proudění podél vodorovné stěny (ohřívána strana směřována nahoru, ochlazovaná strana směřovaná dolů)</i>	<i>130</i>
<i>Tab. 17.5: Vztahy pro výpočet SPT konvekce podél vodorovné stěny (ohřívána strana směřována nahoru, ochlazovaná strana směřovaná dolů)</i>	<i>131</i>
<i>Tab. 17.6: Hodnoty teploty vypočtené numerických řešením rovnice vedení tepla.....</i>	<i>138</i>
<i>Tab. 17.7: Hodnoty teploty vypočtené numerických řešením rovnice vedení tepla v programu CM.....</i>	<i>138</i>
<i>Tab. 17.8: Hodnoty teploty vypočtené numerických řešením rovnice vedení tepla v programu CM – 10x jemnější časový a prostorový krok.....</i>	<i>138</i>
<i>Tab. 17.9: Vybrané hodnoty parametrů ilustrující průběh parametrů vnitřního prostředí laboratorní místnosti při prvním experimentu.....</i>	<i>145</i>
<i>Tab. 17.10: Vybrané hodnoty parametrů ilustrující průběh parametrů vnitřního prostředí okolních místností při prvním experimentu</i>	<i>148</i>
<i>Tab. 17.11: Vybrané hodnoty parametrů ilustrující průběh parametrů vnitřního prostředí laboratorní místnosti při druhém experimentu.....</i>	<i>151</i>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

<i>symbol</i>	<i>jednotka</i>	<i>význam</i>
$a \times b \times c$	m	Šířka, délka a výška
A	m^2	Plocha
a	$m^2.s^{-1}$	Teplotní vodivost
Bi	1	Biotovo číslo
c_p	$J.kg.K^{-1}$	Měrná tepelná kapacita
d	m	Tloušťka, charakteristický rozměr
F	m	Šířka pásu zeminy okolo budovy
Fo	1	Fourierovo číslo/kritérium
G	m	Tloušťka vrstvy (hloubka) zeminy s proměnnou teplotou
g	$m^2.s^{-1}$	Tíhové zrychlení
Gr	1	Grashofovo číslo/kritérium
h	$W.m^{-2}.K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla
Nu	1	Nusseltovo číslo/kritérium
Pr	1	Prandtlovo číslo/kritérium
Q	kWh	Teplo
\dot{Q}	W	Tepelný tok
T	K	Termodynamická teplota
t	s	Čas
v	$m.s^{-1}$	Rychlost
x, y, z	1	Prostorové souřadnice
θ	$^{\circ}C$	Teplota
ε	1	Emisivita, odchylka
λ_n	1	Kořen transcendentní rovnice
β	K^{-1}	Součinitel objemové roztažnosti
ν	m^2/s	Kinematická viskozita
λ	$W.m^{-1}.K^{-1}$	Tepelná vodivost

σ	$W.m^{-2}.K^{-4}$	Stefanova-Bolzmanova konstanta
ρ	$kg.m^{-3}$	Hustota

Indexy

*	Bezrozměrný
<i>abs</i>	Absolutní
<i>dg</i>	Zemina
<i>ext</i>	Vnější
<i>int</i>	Vnitřní
<i>n</i>	Sumační index
<i>o</i>	Okolní
<i>p</i>	Počáteční
<i>rel</i>	Relativní
<i>s</i>	Stěna

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
BESTEST	Building Energy Simulation Test
CM	COMSOL Multiphysics
ČSN	České technické normy
DOF	Degrees of freedom
DR	Diferenciální rovnice
FAI	Fakulta aplikované informatiky
FEM	Finite element method
IEA	International energy agency
MKP	Metoda konečných prvků
PDR	Parciální diferenciální rovnice
TMY	Typical meteorological year

1 ÚVOD

S postupným vyčerpáváním světových zásob fosilních paliv, které zabezpečují značnou část celosvětových požadavků na výrobu energie, se pozornost obrací na jedné straně k využití alternativních zdrojů energie a na druhé straně k efektivnějšímu využívání stávajících zdrojů.

Aktuální trend ve snižování spotřeby energie při provozu budov [1] s využitím zvyšování efektivnosti jejího využití je zapříčiněn aktuální vysokou spotřebou energie v této oblasti. Zvyšující se požadavky na úsporu energií během nedávné minulosti, ale také blízké budoucnosti, přicházející především z Evropské unie. Tyto rostoucí požadavky na snižování spotřeby vedou inženýry k navrhování a dimenzování zařízení inovativními cestami, a dochází tak zejména ke zpřesňování popisu přenosu tepla mezi otopnou soustavou a vnitřním prostředím. Výrazným trendem je také zvyšování využitelnosti alternativních zdrojů tepla, jakými jsou tepelná čerpadla nebo využití sluneční energie jak pro ohřev vody, tak i pro výrobu elektrické energie. Důsledkem všech těchto činností je potřeba predikovat požadavky kladené na budoucí průběh ohřevu/chlazení. Výsledný požadovaný výkon pro ohřev/chlazení je ovlivněn parametry, mezi které patří venkovní klima, vnitřní zdroje tepla, stavebně-technické parametry, architektonická koncepce nebo provoz budovy. Výpočet potřebného výkonu provoz budovy, tak zahrnuje zejména výpočet energetické bilance, která je mimo jiné ovlivněna akumulací tepla ve stavebních konstrukcích.

Snižování nákladů na provoz budov, tak klade nové nároky nejen na simulační nástroje, ale také na vazbu mezi jednotlivými systémy v budovách, mezi které lze zařadit např. regulaci vnitřní teploty nebo osvětlení s ohledem na aktuální stav venkovního prostředí a využívání budovy. Je tudíž snahou jak o zvyšování přesnosti popisu těchto systémů, tak i zlepšení jejich vzájemné kooperace.

Numerické simulace se během posledních desetiletí staly součástí inženýrské praxe nejen při navrhování, dimenzování nebo optimalizaci technických zařízení používaných při lidské činnosti. Jejich podstatou je přibližné řešení Parciálních Diferenciálních Rovnic

(PDR) popisujících fyzikální podstatu dějů za účelem simulace chování zkoumaného systému.

V současném období dochází jak k rozvoji stavebních technologií, tak i k rozšiřování modelování chování těchto systémů. Je samozřejmé, že modelování a simulace systému mají největší význam v době, kdy žádná jiná cesta než simulační neexistuje. Nicméně i v pozdějších fázích projektu lze numerické modelování využít k nalezení kritických míst daného zařízení, odstranění nejistoty týkajících se jeho funkce nebo prověření možností jeho následných úprav.

V současné době existuje několik výpočetních nástrojů, které umožňují simulovat energetické chování budov. Některé z těchto programů byly ověřeny pomocí mezinárodních testů, a tak lze jejich výsledky považovat za správné, ale přesto u většiny z nich nedošlo k výraznějšímu rozšíření. Mezi argumenty uváděnými proti jejich použití se vyskytují zejména komplikovanost a náročnost jejich ovládání s následnou nemožností využití těchto programů pro obecný popis fyzikálních dějů (z důvodu jejich specializace pouze na řešení specifických fyzikálních dějů).

Struktura disertační práce zachovává postup doporučený pro validaci simulačních programů uváděný v publikaci [2]. Nejprve jsou porovnány výsledky simulace s analytickými modely, následně jsou hodnoty vypočtené verifikovaným programem porovnány s výsledky validovaných simulačních programů a poté dochází na modelu místnosti k porovnání hodnot získaných simulací a měřeními.

Disertační práce je rozdělena do 13 hlavních kapitol. Jednotlivé kapitoly se vždy věnují samostatnému předmětu od podání teoretických základů, kterým se zabývá zejména teoretická část práce, až po experimentální řešení dané problematiky, která je popsána v praktické části práce. Jednotlivé kapitoly obsahují nezbytné vztahy popisující fyzikální děje, které jsou v praktické části aplikovány při výpočtu jednotlivých modelů.

Na začátku práce je vypracována literární rešerše, jež slovně shrnuje výsledky vědeckých prací tematicky příbuzných s obsahem této disertační práce publikovaných v minulosti a samotnou práci zasazuje do kontextu s vědeckým zkoumáním na jiných pracovištích. Literární rešerše navazuje na vytyčené cíle disertační práce, které jsou popsány v kapitole 3.

V následující teoretické části jsou postupně uvedeny jednotlivé kapitoly vztahující se k modelování a simulaci tepelných dějů v prostředí budov.

Kapitola 4 se zabývá tepelnými pochody. Je zde popsán přenos tepla vedením, prouděním a sáláním. Dílčí podkapitoly popisují okrajové podmínky při přenosu tepla, které se v prostředí budov nejčastěji vyskytují na rozhraní s vnitřním vzduchem. V závěru této kapitoly je popsáno řešení jednorozměrného problému vedení tepla pomocí metody separace proměnných pro dva typy okrajových podmínek, na kterých je ilustrován nárůst složitosti popisu děje, při rozdílných omezeních uvažovaných na hranicích modelu.

Možnostmi využití simulačních programů pro modelování fyzikálních dějů se zdůvodněním zaměření práce na software COMSOL Multiphysics (CM) se zabývá kapitola 5.

Kapitola 6 pojednává o principech numerického řešení Diferenciálních Rovnic (DR) metodou sítí.

Experimentální část je složena ze třech hlavních oddílů, které pojednávají o základních třech validačních krocích, které jsou blíže popsány v kapitole 7.

Prvním validačním krokem je porovnání simulačních výstupů s analyticky odvozenými modely, které je uvedeno v kapitole 8. Tento krok slouží k základnímu ověření schopností simulačního programu.

Druhým validačním krokem se zabývá kapitola 9, ve které jsou vzájemně porovnány výstupy z rozdílných simulačních nástrojů. V této kapitole je provedeno komparativní porovnání výsledků sedmnácti variant modelu vytvořených v programu CM a dalšími devíti simulačními programy.

Třetím validačním krokem je porovnání hodnot vypočtených simulací s experimentálně získanými hodnotami, kterým se zabývá kapitola 10. Model místnosti je využit k porovnání naměřeného průběhu teploty vnitřního vzduchu s výstupem ze simulačního programu.

Kapitola 11 shrnuje dílčí poznatky zjištěné během jednotlivých validačních kroků, a podává tak ucelený pohled na simulační schopnosti programu CM.

Možnosti využití poznatků představených v této práci pro vědu a praxi obsahuje kapitola 12.

V závěru disertační práce, který je rozveden v kapitole 13, jsou shrnuty výsledky a závěry z jednotlivých kapitol praktické části ve struktuře vytyčených cílů.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY – LITERÁRNÍ REŠERŠE

Energie spotřebovávaná v budovách tvoří v současné době téměř 40% vyrobené energie v Evropské unii [1], a proto je během posledních let vyvíjena snaha na snižování energie potřebné na provoz budov. Protože ale další zvyšování tepelného odporu konstrukcí není ekonomicky výhodné, začaly se rozšiřovat systémy využívající akumulace tepla [3] nebo efektivnější způsoby řízení větrání [4], ale také dochází k nárůstu významu certifikací potvrzujících stavbu šetrných budov (britský BREEM¹ nebo americký LEED²).

Vývoj výpočetní techniky umožnil v minulých desetiletích rozvoj metod, které podporují a usnadňují navrhování systémů budov a jejich technických zařízení. Účelem těchto programů je před vlastní realizací budovy prověřit její projektované parametry pomocí simulací s nastavením rozdílných okrajových podmínek, a dát tak podklady k případné optimalizaci jejího návrhu. Počítačovým modelováním vnitřního prostředí budov se zabývá množství autorů jak ve specializovaných časopisech [5]-[7], tak i na odborných konferencích [8]-[10].

Mezi hlavní důvody využití simulačních programů se uvádí možnost modelování složitých technologických procesů, provádět citlivostní analýzu jednotlivých parametrů systému, úspora času oproti prováděným měřením (obzvláště u systémů s velkými časovými konstantami) nebo optimalizace stávajícího řešení.

Pro tuto práci byl jako simulační nástroj vybrán program CM (důvody této volby jsou vysvětleny dále v této práci). Široké množství fyzikálních problémů, které jsou ve zvoleném simulačním nástroji řešeny lze demonstrovat následujícími několika publikacemi. Publikace [11] se zabývá návrhem větracích otvorů v turistických autobusech; článek [12] pojednává o podlahovém vytápění; ochlazování tělesa fotovoltaického panelu je popsáno v publikaci [13] a v příspěvku [14] lze nalézt simulaci ochlazování ingotu při odlévání.

¹ <http://www.breeam.org>

² <http://www.usgbc.org>

První použití programu FEMLAB (předchozí název programu CM) pro řešení problémů vyskytující se ve stavební tematice sahá zhruba do roku 2003, jak dokládá publikace [15] nebo později uveřejněný článek [16]. Přestože práce [17] poukazuje na významný vliv snižování spotřeby energií v budovách díky využití numerických modelů vytvořených v simulačním nástroji CM, nebyla prozatím porovnána shodnost výstupů tohoto programu pomocí některého z používaných mezinárodních testů. Právě toto ověření tvoří základ této disertační práce. Práce je zaměřena na program CM také z důvodu možnosti kooperace s programem MATLAB, a je tak příhodné upozornit na existující publikace [17]-[26], které na různém stupni tuto vlastnost využívají a poskytují inspiraci pro budoucí navázání na téma této disertační práce.

Nezbytnou součástí praktického využití každého simulačního programu je ověření hodnověrnosti (tj. správnosti a přesnosti výsledků získaných simulačním výpočtem) jeho simulačních výstupů. V publikaci [2] jsou k posouzení hodnověrnosti (validaci) simulačních nástrojů doporučeny následující tři validační kroky:

- analytické ověření,
- porovnání výsledků s dalšími simulačními nástroji (komparativní test),
- porovnání výsledků simulace s naměřenými hodnotami (experimentální validace).

Disertační práce navazuje na poznatky týkající se validace softwarových nástrojů započaté v rámci grantových projektů v průběhu studia a předchozích diplomových prací, které s disertací bezprostředně souvisejí.

V průběhu dílčího řešení disertační práce nastal problém s přesným popisem přestupu tepla mezi stěnou a vnitřním prostorem místnosti. Tímto tématem se v minulosti zabývalo množství publikací, protože je ale tento děj popsán pomocí podobnostních bezrozměrných kritérií, která poskytují shodu s provedenými experimenty pouze na omezeném intervalu podmínek, tak je tato problematika blíže rozvedena v následujícím odstavci.

V minulých letech byl výpočet hodnoty SPT zkoumán mnoha autory, kteří často z naměřených hodnot extrapolovali vztahy pro specifické podmínky daných experimentů. V publikaci [27] je upozorněno, že zatímco fyzikální parametry, mezi které lze zařadit

např. tepelnou vodivost, jsou relativně snadno zjistitelné, tak naopak proces konvekce je modelován s výpočtem parametrů, které mohou být zatíženy značnou nejistotou. Práce [28], zkoumající místní hodnotu SPT, se zabývá vlivem klimatizace a polohou radiátoru na proudění vzduchu v místnosti se závěrem, že lokální hodnota SPT může nabývat až desetinásobku hodnoty, kterou lze obdržet běžně používanými vztahy. V publikacích [29] a [30] je poukázáno na skutečnost, že modelování přenosu tepla je citlivé na přesné určení SPT. Publikace upozorňují až na 45% nárůst hodnoty SPT, která je vypočtena v jednotlivých simulačních krocích (s ohledem na aktuální podmínky), oproti uvažování konstantní hodnoty SPT na vnitřních površích použité po celý průběh simulace. Tento rozdíl je tím více patrný, čím je menší hodnota součinitele prostupu tepla (U-hodnota) stěny, na jejímž povrchu se hodnota SPT počítá. Publikace [31] a [32] poukazují na problém se značně rozdílnými vztahy extrapolující hodnotu SPT z měření uskutečněných za zjednodušených podmínek (tj. obdržených pouze z jedno- případně dvou-dimensionálních experimentů) a mezi experimenty komplexními (tří-dimensionálními, kdy modelem jsou většinou zmenšené místnosti). Články upozorňují na skutečnost, že obzvláště při přenosu tepla v budovách je třeba brát zřetel zejména na komplexní modely určující hodnoty SPT, které je však třeba dále upravit pro dané uspořádání zdroje tepla, umístění oken a další specifické podmínky, které ovlivňují proudění vnitřního vzduchu.

Hodnoty SPT uvedených v českých technických normách (ČSN) obsahuje příloha A; vztahy pro výpočet SPT a Nusseltova čísla dle literárních zdrojů jsou uvedeny v příloze B.

3 HLAVNÍ CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Téma této práce bylo navrženo se záměrem možnosti prozkoumání problematiky tepelně dynamických parametrů budovy za účelem simulace vnitřního prostředí v budovách (zejména teploty) se zaměřením na dynamické parametry. Jak samotný název disertační práce napovídá, tak její téma je poměrně široké, a zejména z toho důvodu existují různé postupy k jejímu řešení.

Cílem disertační práce je ověření schopností simulačního nástroje pro výpočet přenosu tepla v budovách. Z toho požadavku vyplývají stanovené dílčí cíle disertační práce, které jsou důsledkem postupu validace simulačních programů uvedených v publikaci [2]. Dílčí cíle proto byly stanoveny v následující struktuře:

1) Teoretický a analytický rozbor dané problematiky

První část práce se zabývá teoretickým rozbohem současného stavu problematiky, s níž disertační práce bezprostředně souvisí.

2) Analytická verifikace – porovnání výsledků modelů získaných analytickým a numerickým výpočtem

Tento krok slouží k základnímu ověření schopností a přesnosti simulačního programu. Nejprve jsou odvozeny analytické modely nestacionárního šíření tepla, které jsou porovnány s výsledky z numerických modelů vytvořených ve validovaném programu. Poté jsou obdobnému srovnání podrobeny i modely popsané v benchmarku ASHRAE 1052-RP [33].

3) Komparativní test – porovnání hodnot vypočtených několika simulačními programy

Jedná se o druhý validační krok zvoleného programu, kdy je přistoupeno k verifikaci zvoleného softwaru pomocí analýzy BESTEST uveřejněné v úloze 34 [34].

4) Experimentální validace – porovnání naměřených hodnot průběhů teploty s numerickým modelem

Tento krok zahrnuje naměření hodnot průběhu teploty v reálné budově a porovnání simulačních výstupů třídimensionálního modelu s takto získanými hodnotami.

5) Zhodnocení schopností simulačního softwaru

Po provedení třech validačních kroků popsaných výše bude provedeno shrnutí dosažených výsledků a nepřesností, které nastanou během jednotlivých validačních kroků.

TEORETICKÁ ČÁST

4 PŘENOS TEPLA VE VNITŘNÍM PROSTŘEDÍ BUDOV

V současné době člověk pobývá v interiérech budov po většinu dne, a tak má toto prostředí významný vliv na lidské zdraví. Kvalita vnitřního prostředí v budovách je spojována se současným nárůstem výskytu alergií a jiných obtíží dýchacích cest.

Stav vnitřního prostředí v budovách spoluvytváří mnoho složek, přičemž zásadní vliv mají zejména tepelně-vlhkostní parametry obytné místnosti. Zdrojem tepla/chladu budov jsou zejména venkovní klimatické podmínky, které v různé míře ovlivňují vnitřní prostředí přenosem tepla obvodovým pláštěm budovy. Významný vliv na přenos tepla mezi budovou a jejím okolím mají zejména okna, která v zimě zapříčiňují nejvýznamnější tepelné ztráty a v létě naopak zisky. Snaha o minimalizaci spotřeby energie na vytápění/chlazení vede nutně ke stavbě budov s velmi kvalitním obvodovým pláštěm z hlediska tepelné izolace i těsnosti. Utěsněním vnitřního prostoru však přestává být funkčním přirozené větrání.

V současné době patří mezi hlavní parametry vnitřního prostředí budov tepelný komfort a úspora energií, a proto je třeba zkoumat spotřebu budov s ohledem na spokojenost jejich uživatelů. Spotřeba energie budov je silně ovlivňována parametry vnitřního prostředí (teplota, větrání, osvětlení) a návrhem resp. provozováním budovy.

Vzhledem k tomu, že budovy a její části jsou vysoce komplexní objekty, v nichž se uplatňuje jak přenos tepla, tak i přenos vlhkosti a hmoty (anglicky používaná zkratka zahrnující modelování těchto tři dějů je HAM - Heat, air and moisture), je pro numerický výpočet chování těchto objektů vhodné využití simulačních nástrojů schopných paralelního výpočtu všech jednotlivých dějů (paralelní výpočet je důležitý z důvodu, vzájemného ovlivňování jednotlivých dějů). V současnosti jsou pro podobné účely používány nástroje ESP-r³ nebo TRNSYS⁴. Výhodou prvně zmiňovaného programu je to, že je šířen pod licencí open source, ale jeho stabilita pod operačním systémem Windows je někdy problematická a navíc má program poměrně zastaralé rozhraní s ovládacími prvky, což

³ <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>

⁴ <http://www.trnsys.com/>

zbytečně zesložituje využitelnost tohoto programu. Na druhou stranu program TRNSYS, je zaměřen zejména na simulace spojené s provozem budov, ale lze v něm provádět i simulace procesů odehrávajících se v palivových článcích nebo modelovat biologické procesy. Program je sice šířen jako komerční software, ale oproti výše zmíněnému programu obsahuje ovládací rozhraní, které odpovídá aktuálním trendům a jeho používání tak nečiní takové problémy jako u programu ESP-r. CM, který je taktéž distribuován jako komerčně simulační nástroj, byl vybrán nejen díky jeho schopnostem širokého uplatnění (obdobné komplexní simulace by byly možné i v programu TRNSYS a některých dalších programech), ale také díky možnosti jeho propojení s programem MATLAB, který se na akademické půdě často používá pro výpočet regulačního pochodu. Tato schopnost by tak mohla být využita v budoucnu nejen pro tvorbu jednotlivých modelů, ale také pro jejich řízení.

Základní tepelně-technické požadavky na stavební konstrukce budovy jsou odvozeny z potřeby zajištění:

- požadovaného tepelného stavu,
- řešení stavební konstrukce s minimálními ekonomickými náklady na pořízení a provoz.

Konstrukce budov (nebo jejich částí) mohou být hodnoceny jak v ustáleném, tak i neustáleném tepelném stavu a podle toho je potom děj popsán příslušnými rovnicemi. Protože se tato práce zabývá validací simulačního programu, tak nebudou jednotlivé dosažené výsledky posuzovány z hlediska např. příliš nízké povrchové teploty v místě tzv. tepelných mostů, která by mohla způsobit kondenzaci vlhkosti a růst plísní.

Tepelně-technické vlastnosti konstrukcí mají vliv na výměnu tepla mezi okolním a vnitřním prostředím. Tepelná výměna probíhá zejména pomocí vedení tepla, proudění, sálání a větrání.

Vedení tepla bylo v minulosti popsáno v mnoha publikacích [36]-[42]. Při jeho výpočtu se jedná o řešení Fourierovy rovnice s příslušnými okrajovými a počátečními podmínkami. Porovnáním numerického řešení rovnice vedení tepla se zabývá kapitola 6 a příloha D.

Literární rešerše zabývající se přirozeným prouděním podél svislých stěn, ukázala, že se touto tematikou v minulosti zabývalo množství autorů. Empiricky zjištěné vztahy SPT konvekcí podél svislé stěny jsou uváděny jako funkční závislost rozdílu povrchové teploty a teploty tekutiny mimo mezní vrstvu. Rozptyl publikovaných výsledků je poměrně značný a navíc experimenty často nejsou doplněny o bližší informace týkající se naměření konkrétních hodnot.

Třetím principem uplatňujícím se při řešení tepelné bilance prostoru je přenos tepla sáláním. Přesné řešení sdílení tepla sáláním mezi jednotlivými povrchy v místnosti je poměrně složité a skutečný přenos tepla v místnosti může být odlišný, než popisují teoretické rovnice. Projeví se zde zejména nerovnoměrnost rozložení povrchových teplot, nepravidelnosti povrchu nebo různorodost sálavostí jednotlivých materiálů.

4.1 Tepelné pochody

Výsledný stav vnitřního prostředí budov ovlivňuje velké množství parametrů, mezi které lze na jedné straně zařadit parametry konstrukce (tepelný prostup zdmi a okny, infiltrace vzduchu, ...) a na druhé straně atmosférické podmínky (vnější teplota, tepelné zisky ze slunce, rychlost větru, relativní vlhkost, ...). Kombinace všech těchto parametrů určuje tepelnou výměnu mezi vnitřním a vnějším prostředím, a tak ovlivňuje výslednou vnitřní teplotu v budově respektive její spotřebu energie.

V současné době je nejpoužívanějším typem výpočtů vnitřního klimatu budov výpočet jeho ustáleného stavu. Tyto výpočty jsou často určeny státními normami [43]-[51] a pouze v několika případech [52]-[54] je normativně definován výpočet spojený s dynamickým užíváním budovy (obvykle s hodinovým krokem). Tato skutečnost je převážně způsobena manuálním přístupem k výpočtu potřebných vytápěcích výkonů, což při současném výkonu výpočetní techniky a možnosti využití softwarových nástrojů již, na rozdíl od minulých desetiletí, není nezbytné. Při využití numerických výpočtů tepelných dějů, tak již není problém s výkonem procesoru a lze tak simulovat chování i s krokem podstatně menším.

4.1.1 Stacionární tepelné pochody

Termínem stacionární neboli ustálený přenos tepla se rozumí přenos tepla, který není závislý na časovém okamžiku, a je tak ve všech časových okamžicích stejný. Hustota tepelného toku při výpočtu stacionárního vedení tepla je tak závislá pouze na teplotním gradientu, ale není uvažováno s dynamikou tohoto děje.

4.1.2 Dynamické tepelné pochody

Dynamiku tepelných pochodů lze posuzovat podle setrvačnosti místnosti. Tepelná setrvačnost je přímo spojena s tepelnou akumulací, a tak ji z fyzikálních parametrů ovlivňuje především průměrná tepelná kapacita materiálu a tloušťka (objem) stěny.

S tepelnou setrvačností souvisí i přenos tepla do vnitřních vytápěných prostorů, a tím i rychlost reakce na regulační zásah, doba potřebná na zátop/chladnutí. Při vytápění objektu, jehož stěny lze klasifikovat jako těžké, se tak bude teplota ve vytápěném prostoru měnit pozvolněji, než u objektu s lehkou konstrukcí.

4.2 Dynamické tepelné simulace prostředí budov

Dynamickými simulacemi se rozumí výpočet chování budovy v okamžicích, kdy ještě nebylo dosaženo rovnovážného stavu. Při manuálních výpočtech se obvykle uvažují vstupní a okrajové podmínky konstantní v celém objemu (ploše), ale obecně lze počítat i s časově proměnnými hodnotami (proměnná hodnota SPT nebo teploty). Mezi tyto parametry lze zařadit zejména faktory určené aktuálními vnějšími podmínkami, fyzikálně-technickými parametry stěn nebo způsobem užívání budovy.

Oproti stacionárním výpočtům umožňují dynamické simulace zejména přesněji analyzovat vazby a průběhy parametrů v rámci budovy jako celku. Obecně lze říci, že z více informací, které lze do dynamických výpočtů zahrnout, lze učinit efektivnější rozhodnutí pro budoucí úsporná opatření.

Práce zabývající se dynamickým chováním budov a jejich částí využívající jednoúčelové softwarové nástroje pro tepelné simulace, až po univerzální simulační balíky

byly v minulosti mnohokrát publikovány. Jejich vybrané ukázky lze najít jak v českých tak zahraničních v člancích [55]-[57].

4.3 Přenos tepla v místnosti

Základním principem přenosu tepla je existence teplotního gradientu. Pro základní geometrické tvary je možno rovnice popisující nestacionární přenos tepla se zadanými okrajovými a počátečními podmínkami řešit analyticky, ale u komplexních geometrických objektů je třeba přistoupit ke zjednodušení dané problematiky nebo k jejímu numerickému řešení.

K přenosu tepla dochází vždy z látky o vyšší teplotě do látky s nižší teplotou. Obecně rozlišujeme 3 základní druhy šíření tepla:

- Vedení (kondukce).
- Proudění (konvekce).
- Tepelné záření (sálání, radiace)

Problematika přenosu tepla v budovách se zaměřuje zejména na přenos tepla skrze stěny, a využívá tak přenos tepla vedením s příslušnými okrajovými podmínkami. V následujících odstavcích budou stručně představeny základní parametry ovlivňující přenos tepla v budovách, zatímco detailnější informace o fyzikálních vztazích popisující jednotlivé druhy šíření tepla lze nalézt v [36]-[42].

Sdílení tepla vedením je založeno na mikroskopickém kmitání jednotlivých částic látky, které se ale samy makroskopicky nepřemísťují. Kondukce je nejčastější způsob šíření tepla v pevných tělesech, ale částečně probíhá i v kapalinách. Tento jev je oproti ostatním způsobům šíření tepla značně pomalý.

Teplu se šíří podle teplotního spádu a jeho intenzita je tomuto spádu přímo úměrná. Přenos tepla je popsán Fourierovým zákonem, hustota tepelného toku je tak úměrná gradientu teploty, ale má opačný směr. Řešení je založeno na následující DR

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T = -\lambda \cdot \nabla T. \quad (1)$$

Vedení tepla lze dále rozdělit na dva základní druhy. První se zabývá popisem přenosu tepla v ustáleném stavu a označuje se pojmem stacionární vedení tepla, druhý se

nazývá nestacionární sdílení tepla a popisuje tepelné děje před jejich ustálením. Z popisu je patrné, že nestacionární děj je složitější, protože je třeba řešit nejen prostorovou, ale i časovou závislost děje.

Vzduch se v prostoru pohybuje vlivem tepelné konvekce vznikající podél zdrojů tepla. U přirozeného proudění dochází k pohybu částic pouze v důsledku rozdílné hustoty kapaliny zapříčiněné teplotním gradientem, zatímco u nucené konvekce je tekutina k pohybu uměle nucena (např. čerpadlem nebo ventilátorem).

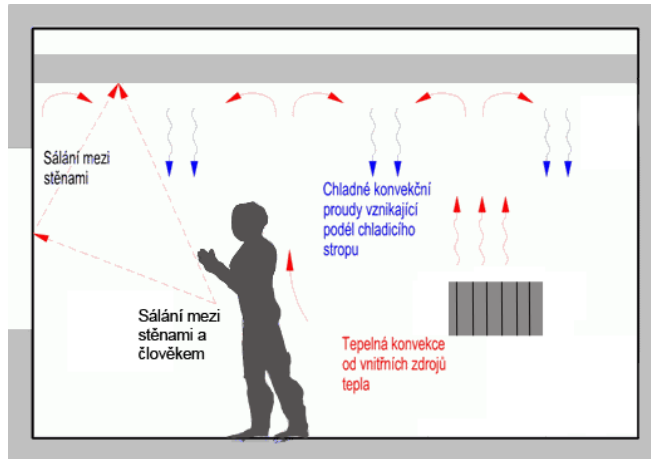
Záření je přenos tepla pomocí elektromagnetického vlnění a tudíž se jedná o úplně odlišný mechanismus ve srovnání s molekulárním nebo turbulentním přenosem. Sálání je především ovlivňováno termodynamickou teplotou a vlastnostmi povrchu sálajícího i osálaného tělesa (odrazivost, pohltivost nebo emisivita). Podle reakce materiálů vůči tepelnému sdílení lze materiály rozdělit na průteplivé (diatermní) a neprůteplivé (atermní). Průteplivost vyjadřuje hodnota propustnosti, která je u většiny stavebních materiálů (beton, dřevo, kovy, nátěry) rovna nule zatímco hodnota průteplivých materiálů (sklo, voda, vzduch) je podstatně blíže hodnotě jedna.

Jednotlivé způsoby šíření tepla byly sice představeny v předchozích odstavcích jako samostatné děje, ale při reálných aplikacích dochází k jejich kombinacím, jak je ukázáno na obrázku 4.1. Nejčastější kombinací je sériová kombinace přestup-vedení-přestup známá pod pojmem prostup tepla, která se uplatňuje např. při průchodu tepla zdi z vnitřního do vnějšího prostředí. Kromě této sériové kombinace se tyto děje odehrávají také paralelně, kde vliv jednotlivých složek přenosu tepla určují specifické podmínky dané situace (rychlost proudění, teplota látky).

Publikace [50] uvádí základní předpoklady, které musí být splněny pro možnost výpočtu pomocí dynamických metod dle evropských norem. Mezi nejdůležitější požadované parametry tato norma uvádí:

- Místnost je uzavřeným prostorem ohraničeným obalovými konstrukcemi.
- Teplota vzduchu v celé místnosti je stejná.
- Tepelně-fyzikální vlastnosti všech materiálů jsou konstantní a izotropní.
- Hodnoty SPT prouděním jsou konstantní.

- Prostorové rozdělení sálavé složky tepelného toku od vnitřních zdrojů tepla je ve všech směrech stejné.



Obr. 4.1: Ukázka šíření tepla v místnosti

4.4 Okrajové a počáteční podmínky

Aby bylo možné jednoznačně řešit konkrétní případy vedení tepla, je nutno DR popisující přenos tepla doplnit počátečními a okrajovými podmínkami.

Pro sdílení tepla rozlišujeme čtyři základní okrajové podmínky:

- Okrajová podmínka prvního druhu (popisuje rozložení teploty na povrchu tělesa pro každý časový okamžik)

$$\theta_p = f(x, y, z, t). \quad (2)$$

- Okrajová podmínka druhého druhu (popisuje rozložení plošné hustoty tepelného toku na povrchu tělesa pro každý časový okamžik)

$$q_p = f(x, y, z, t). \quad (3)$$

- Okrajová podmínka třetího druhu (popisuje přestup tepla mezi tekutinou a tělesem, tato podmínka je popsána Newtonovým zákonem)

$$q = h \cdot (\theta_p - \theta_T). \quad (4)$$

- Okrajová podmínka čtvrtého druhu (popisuje ideální styk dvou těles)

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial \theta_1}{\partial n} \right) = \lambda_2 \left(\frac{\partial \theta_2}{\partial n} \right). \quad (5)$$

Analytické řešení rovnice nestacionárního vedení tepla s jednoduchými tvary okrajových a počátečních podmínek je možné. Problémy nastávají, jsou-li tyto podmínky zadány ve složitějším tvaru jakou na např. proměnná hodnota okrajové podmínky, která je typická pro aplikaci přenosu tepla v budovách.

4.5 Ukázka řešení nestacionární rovnice vedení tepla

Pro modelování dynamické odezvy na změnu teploty je třeba vytvořit model, který je jak prostorově, tak i časově závislý. Pro popis těchto systémů je tak potřeba vyřešit PDR. Pro vyřešení tohoto typu rovnic je třeba znát počáteční a okrajové podmínky detailněji popsané v předchozí kapitole. Okrajové podmínky mohou být časově proměnné (změna vnější teploty), přestože se obecně ve výpočtech dle českých resp. evropských norem uvažují jejich konstantní hodnoty.

Nestacionární teplotní pole v rovinné desce je dáno řešením tepelné bilance elementárního objemu popsané parabolickou PDR (Fourierův zákon nestacionárního vedení tepla)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \nabla^2 \theta. \quad (6)$$

Tuto rovnici lze řešit analyticky pomocí separace proměnných při zadaných okrajových a počátečních podmínkách. Obecný postup řešení této rovnice je možný, ale komplikovanost odvozeného vztahu je silně ovlivněna složitostí počátečních a okrajových podmínek, jak bude předvedeno na konkrétních případech níže.

Pro konstantní počáteční teplotu stěny θ_p a okrajovou podmínku prvního druhu lze z rovnice 6 pro jednorozměrný případ vedení tepla odvodit vztah

$$\frac{\theta(x, t) - \theta_e}{\theta_p - \theta_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n}{\mu_n} \cdot \cos \left(\mu_n \cdot \frac{x}{d} \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo} \quad (7)$$

kde člen μ_n je rovno lichým násobkům $\frac{\pi}{2}$ tj.

$$\mu_n = (2n-1)\frac{\pi}{2} . \quad (8)$$

Tato rovnice je dána nekonečným součtem součinů obsažených v sumě přes jednotlivé parametry μ_n .

Nestacionárního rovnice vedení tepla odvozená s uvažováním okrajové podmínky třetího druhu dokumentuje fakt, že vyšší komplikovanost těchto podmínek vede na složitější tvar výsledné rovnice

$$\frac{\theta(x,t) - \theta_e}{\theta_p - \theta_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \cdot \cos\left(\mu_n \cdot \frac{x}{d}\right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo} \quad (9)$$

kde člen μ_n je tentokrát dán kořeny transcendentní rovnice

$$\operatorname{ctg} \mu_n = \frac{\mu_n}{Bi} . \quad (10)$$

Při použití periodické okrajové podmínky se řešení rovnice (6) stává ještě více komplikovaným.

Modely komplexních struktur jakými jsou budovy nebo jejich části, jsou díky velkému množství vazeb mezi jednotlivými částmi konstrukce natolik komplikované, že je nelze řešit analytickými metodami. Přistupuje se tak na jedné straně k řešení přenosu tepla pomocí zjednodušených postupů, nebo k tvorbě počítačového modelu a vyřešení pomocí numerických metod. Zde je třeba připomenout, že ani počítačová numerická řešení nejsou použitelná pro všechny případy geometrií staveb a i u nich je třeba zavádět jistá zjednodušení.

4.6 Zjednodušené metody

Jedná se zejména o zjednodušení výpočtu dynamiky přenosu tepla nebo výpočtu výkonu otopného tělesa v době zátopy [54]. Zjednodušené výpočty průběhu teplot místnosti jsou představeny v [51], [53]. Zjednodušení se často projevuje popisem problému pomocí Obyčejných Diferenciálních Rovnic (ODR) 1. řádu (problém se tak řeší místo PDR druhého řádu) nebo snížením počtu prostorových souřadnic – nejčastěji se řeší jedno-dimensionální problém přenosu tepla. Tento postup umožňuje relativně snadný a rychlý výpočet potřebných hodnot, ale zároveň vnáší do výsledku chybu danou zjednodušeným

řešením PDR druhého řádu. Alternativním postupem je řešení uvedeného problému pomocí numerických metod, pomocí nichž lze následně zhodnotit vhodnost použití jednotlivých zjednodušených výpočetních postupů.

4.7 Numerické modelování

Nejen výpočty přenosu tepla se čím dál obvykleji řeší numericky na počítači pomocí Metody Konečných Prvků (MKP), objemů nebo diferencí, který využívají rozdělení řešeného prostoru do sítě a výpočtu hodnot v jejích bodech.

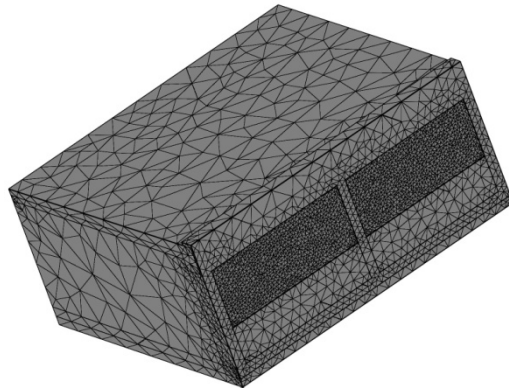
Mezi nejznámější metody pro numerické řešení ODR patří [58]:

- Jednokrokové metody (Eulerova metoda, Metoda Runge-Kutta).
- Vícekrokové metody (Adamsovy metody).
- Extrapoláční metody.

Mezi nejznámější metody pro numerické řešení PDR patří [58]:

- Metoda sítí.
- Variační metody.
- Metoda konečných prvků.

Jednou z nejpoužívanějších metod v moderní výpočetní technice je MKP. Tato metoda je vhodná pro simulaci průběhů napětí, deformací, proudění tepla nebo proudění tekutin na vytvořeném fyzikálním modelu. Přestože je její princip znám již delší dobu (počátky vývoje sahají do 40. let 20. století), tak k jejímu širšímu využití došlo teprve s nástupem počítačů s dostatečným výkonem pro její výpočet (zejména se zvětšováním paměti). MKP využívá rozklad oblasti nejčastěji na trojúhelníky nebo čtyřúhelníky, jedná-li se o řešení ve 2D, resp. na čtyřstěny nebo šestistěny jedná-li se o výpočet ve 3D viz obrázek 4.2. Rozkladem oblasti s nepravidelným tvarem na tyto útvary se dopouštíme na okraji řešeného objektu chyby, kterou lze zmenšit zjemněním rozkladu.



Obr. 4.2 - Vytvořená síť pro numerický výpočet na modelu místnosti

Po provedení diskretizace modelu dochází k výpočtu soustavy algebraických rovnic pomocí zadaných okrajových podmínek s následným výpočtem jednotlivých veličin.

Z naznačeného postupu je zřejmé, že pro obdržení dostatečně kvalitního řešení je třeba vytvořit síť s vhodnou hustotou. Dalším parametrem, který ovlivňuje přesnost řešení je nastavení akceptovatelné chyby numerického postupu (MKP patří k numerickým metodám, které nedávají přesný ale pouze přibližný výsledek). Více o numerickém řešení DR lze naléznou v kapitole 6.

5 NÁSTROJE PRO MODELOVÁNÍ FYZIKÁLNÍCH DĚJŮ

Vývoj výpočetní techniky umožnil v minulých desetiletích rozvoj metod, které podporují jak navrhování budov, tak jejich technického zařízení. Pojmem simulační programy se v této práci rozumí výpočtové programy, které dokážou popsat chování systému (vzhledem k tématice této práce se jedná zejména o oblast energetických systémů budov) nebo jeho části (při uvažování proměnných klimatických a provozních podmínek). Pod pojmem popis chování budovy si lze představit například predikci průběhu teploty v závislosti na okolních podmínkách, průběh okamžité potřeby tepla, výpočet celoroční energetické bilance, dvoj- i troj-rozměrné zobrazení proudění vzduchu v místnostech apod. Účelem těchto programů je před vlastní realizací budovy prověřit její předpokládané chování za různých podmínek, a dát tak podklady k optimalizaci návrhu.

Mezi hlavní důvody pro využívání počítačových simulací se obvykle uvádí jejich následující přednosti:

- Lze s její pomocí počítat i velmi složité technologické procesy (pomocí analytických metod by tyto procesy mohly být neřešitelné nebo obtížně řešitelné). Je možné prověřit výsledky získané z experimentů a následnou úpravou modelu ověřit chování systému při odlišných podmínkách.
- Umožňují sledování chování systémů ve zrychleném nebo zpomaleném čase. V prostředí simulace chování budov se jedná zejména o děje, u kterých by experiment trval příliš dlouho.
- Výstupy ze simulace nabízí ucelený přehled o modelovaném problému, a umožňují tak jeho vícekritériální analýzu. Úpravou hodnoty jednoho parametru, tak lze sledovat jeho vliv na chování celého systému.
- Pomocí simulace je možné ověřit různé varianty řešení, posoudit jejich silné a slabé stránky s následnou realizací nejvhodnějšího řešení.

Hlavní kritéria, která musí program pro numerické výpočty splňovat:

- Možnost výpočtu PDR tří-dimensionálních modelů.

- Možnost importu geometrie z CAD programů nebo tvorba geometrie přímo v daném prostředí.
- Umožnění exportu výsledků simulace pro následné zpracování a porovnání hodnot s dalšími programy.
- Názorná interpretace simulačních výsledků.

5.1 Simulační programy schopné paralelního výpočtu vícero dějů

Schopnost obecného modelování procesů se v anglické literatuře označuje termínem “multiphysics”. Tato vlastnost se vyskytuje dokonce i přímo v názvu některých simulačních programů, čímž je deklarován v současné době rostoucí význam této schopnosti simulačních programů. Programy schopné multifyzikálních simulací jsou založeny na obecném principu řešení PDR (nejsou specializovány např. pouze na řešení parabolické PDR druhého řádu, kterou je popsáno vedení tepla) a zároveň často umožňují paralelní výpočet několika fyzikálních dějů, které se vzájemně ovlivňují. Tato schopnost umožňuje využití těchto programů např. pro vzájemné ovlivňování výpočtu přenosu tepla a hmoty nebo pro ohřev vodiče vlivem protékajícího elektrického proudu, jehož zvyšující se teplota zpětně ovlivňuje jeho odpor.

Možnost výpočtu vzájemně se ovlivňujících několika dějů je v různých programech implementována na různém stupni. V tabulce 5.1 jsou porovnány schopnosti výpočtu vybraných fyzikálních dějů několika simulačních programů (ADINA⁵, ANSYS Multiphysics⁶, OOFELIE⁷ a CM⁸), které umožňují výpočet více fyzikálních dějů. Bližší výčet možností simulace fyzikálních dějů těchto programů je dále uvedeno v příloze C.

⁵ <http://www.adina.com>

⁶ <http://www.ansys.com>

⁷ <http://www.open-engineering.com>

⁸ <http://www.comsol.com>

Tab. 5.1: Srovnání možností vybraných programů pro numerické simulace

	<i>ADINA</i>	<i>ANSYS Multiphysics</i>	<i>OOFELIE</i>	<i>CM¹⁾</i>
Přenos tepla	Ano	Ano	Ano	Ano
Elektromagnetismus	Ano	Ano	Ano	Ano
Dynamika tekutin	Ano	Ano	Ano	Ano
Elektrické pole	Ano	Ne	Ano	Ano
Výpočet tlaku	Ano	Ne	Ano	Ano
Statické výpočty	Ano	Ano	Ano	Ano
Akustika	Ano	Ano	Ano	Ano

1) Program kromě uvedených fyzikálních analýz poskytuje také moduly pro výpočty s plasmou, elektrického pokovování, podpovrchový a mikro tok tekutin, ale také přímé spojení s konstrukčními programy jako SolidWorks⁹, Pro/ENGINEER¹⁰, Inventor¹¹, CATIA¹² nebo programem pro technické výpočty MATLAB¹³

Výše uvedená tabulka dokumentuje, že většina výše uvedených programů je schopná modelovat základní fyzikálních děje. Nicméně je důležité upozornit, že u některých dějů je možné v konkrétním programu modelovat např. pouze ustálený děj, ale již nikoli jeho nestacionární variantu. Další odlišností je schopnost tvorby multifyzikálních úloh, kde v programu ANSYS Multiphysics lze vzájemně kombinovat pouze děje, které jsou explicitně vyjmenované v popisu programu, zatímco program CM je svou strukturou koncipován tak, aby bylo možné kombinovat v podstatě libovolné děje, které lze v programu modelovat.

⁹ <http://www.solidworks.com/>

¹⁰ <http://www.ptc.com>

¹¹ www.autodesk.com

¹² <http://www.3ds.com>

¹³ <http://www.mathworks.com>

Kromě výše zmíněných programů bylo zvažováno i použití nástroje ESP-r. Přes značné využívání tohoto nástroje pro obdobné problémy na vysokých školách po celém světě, program nesplnil požadavky kladené na použitelnost nástroje a i díky problémům představených v [59] bylo od použití tohoto programu upuštěno.

Po zkušenostech s předchozím použitím nástroje CM na autorově pracovišti [60], [61], díky jeho přednostem představeným v [17] a z důvodům vysvětlených výše, byl jako hlavní program validovaný v této práci vybrán program CM, a tak bude v následující kapitole představena práce s tímto simulačním programem.

5.2 COMSOL Multiphysics

Simulační nástroj CM obsahuje grafické rozhraní, pomocí něhož lze vytvořit náčrt geometrie, následně vytvořit síť pro numerické řešení (jak automaticky tak i s manuálně nastavenými parametry) a po vlastním výpočtu modelu umožňuje zpracování výsledků pomocí vykreslení grafů, interpolace nebo výpočtu integrálu nad jednotlivými hranicemi.

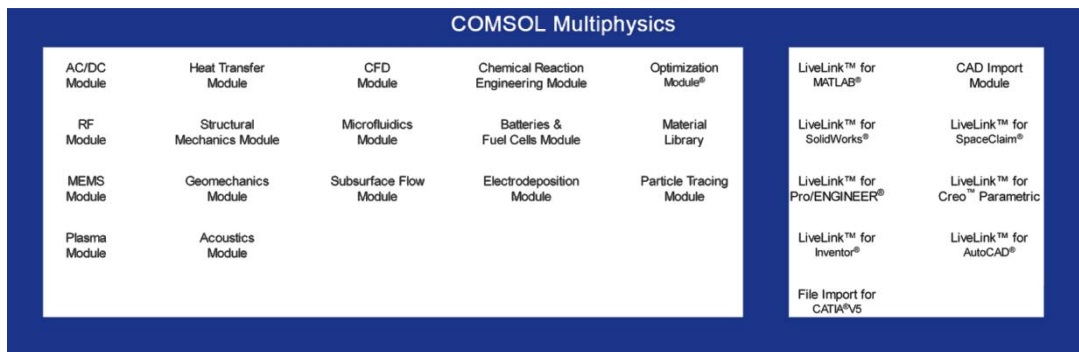
Program obsahuje předdefinovanou knihovnu modelů, které usnadňují zadávání parametrů inženýrských problémů v oblastech konvekce a difuze, dynamiky tekutin, přenosu tepla a dalších oblastí. Samozřejmostí je schopnost modelovat i problémy, pro které tyto knihovny neexistují. Fyzikální rovnice, na kterých je daný děj založen se zadávají pomocí „PDE módu“, který je jádrem jednotlivých specializovaných knihoven. Pro následný numerický výpočet obsahuje program několik vestavěných přímých i nepřímých řešičů, které lze použít jak pro stacionární a nestacionární analýzy, tak i pro výpočet parametrické simulace. Základní schopností programu je tak řešení PDR (možno volby rozměru geometrie od jedno- až po tří-dimensionální) s příslušnými okrajovými podmínkami.

Jednou z výhod tohoto simulačního programu je možnost pomocí tzv. „propojení“ (v originále LiveLinks) s dalšími programy – SolidWorks, Pro/ENGINEER, Inventor, CATIA nebo MATLAB. Zatímco propojení s programy pro tvorbu geometrie umožňuje její automatickou aktualizaci je umožněno až v posledních verzích programu, tak propojení s MATLABem je přítomno od jeho prvních verzí, protože CM byl zpočátku vyvíjen jako

MATLAB toolbox s názvem FEMLAB (do verze 3.1). Program od verze 3.2 používá současný název a funguje jako samostatná aplikace, nicméně si stále zachoval datovou strukturu programu MATLAB, což umožňuje komunikaci mezi těmito nástroji.

Pro spektrum fyzikálních dějů, které je možné modelovat v tomto programu, lze využít některý z níže uvedených modulů, které mají jednotlivé dialogové boxy uzpůsobené těmto dějům. V současné verzi programu existuje přibližně patnáct specializovaných modulů, jak je patrné z obrázku 5.1. Mezi nejdůležitější moduly patří:

- AC/DC modul (AC/DC module).
- Radio-frekvenční modul (RF Module).
- Modul pro chemické inženýrství (Chemical Reaction Engineering Module).
- Simulace přenosu tepla (Heat Transfer Module).
- Modelování elektro-mechanických systémů v malých rozměrech (MEMS module).
- Simulace namáhání (Structural mechanics module).



Obr. 5.1: Moduly programu CM

CAD Import module umožňuje import geometrií modelů z některého z CAD nástrojů. Mezi nejdůležitější typy souborů, které lze do programu importovat, patří nativní soubory programů CATIA V4, CATIA V5, Pro/ENGINEER, Autodesk Inventor nebo Parasolid, ale lze využít i import z obecných grafických formátů IGES nebo STEP. Kromě běžného importu geometrie lze pomocí „LiveLinks“ přímo propojit prostředí CAD nástrojů se simulačním programem CM.

5.2.1 Postup tvorby modelu

Postup tvorby modelu lze rozdělit do následujících základních kroků, které jsou popsány v níže uvedených odstavcích.

Nejprve je třeba vybrat prostorovou dimenzi modelu (jedno-, dvou- nebo tří-dimensionální) a fyzikální děj/e, na který bude v modelu počítán.

Dalším krokem je tvorba vlastní geometrie modelu nebo její import pomocí CAD import modulu.

Následně je třeba nastavit fyzikální parametry jednotlivých částí modelu, počáteční a okrajové podmínky. Předposledním krokem je tvorba sítě, kterou lze nechat vytvořit plně automaticky, poloautomaticky nebo nastavit její jednotlivé parametry (pre-processing).

V posledním kroku dochází k výpočtu fyzikálních parametrů dle vybrané fyzikální podstaty děje nejčastěji opět plně automaticky, ale lze samozřejmě zasahovat i do nastavení jednotlivých řešičů (processing). Lze vybrat mezi výpočtem stacionárních, nestacionárních modelů, výpočtem vlastních čísel nebo parametrickou analýzou.

5.2.2 Zpracování simulačních výstupů

Po dokončení simulačního výpočtu nastává fáze vyhodnocení vypočtených hodnot (post-processing) s případnou následnou úpravou modelu.

Vypočtené hodnoty v programu CM lze využít pro výpočet integrálu fyzikálních veličin nad jednotlivými hranicemi, pro vykreslení jednoho z devíti druhů grafů (případně exportu těchto grafů ve formě videa u nestacionárního výpočtu) případně je možno data exportovat do textového souboru a následně porovnat je s jinými hodnotami.

5.3 Ověření přesnosti simulačních výstupů

Důležitou vlastností simulačních nástrojů je jak jejich přesnost, tak i snadnost jejich reálného využití. Nezbytnou součástí praktického využití každého simulačního programu je tak ověření hodnověrnosti (tj. správnost a přesnost výsledků získaných simulačním výpočtem) jeho simulačních výstupů (validace). Jak již bylo uvedeno v cílech

disertační práce, tak dle publikace [2] jsou k posuzování hodnověrnosti (validaci) simulačních nástrojů doporučeny následující tři kroky:

- Analytické ověření.
- Porovnání s ostatními simulačními nástroji (komparace).
- Validování s použitím naměřených hodnot (experimentální validace).

Tyto tři validační kroky tvoří hlavní část této disertační práce, a proto se jimi budou zabývat jednotlivé oddíly praktické části v kapitole 7.

6 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ DIFERENCIÁLNÍCH ROVNIC

Využití počítačové techniky pro výpočet DR popisujících fyzikální děje vyžaduje řešení těchto rovnic pomocí numerických metod. Druhým důvodem současného širokého rozšíření numerických metod (přestože mnohé metody byly známy dříve než počítače, se kterými jsou v současné době silně spjaty) je umožnění výpočtu rovnic nejen pro základní geometrické útvary kde existuje analytické řešení, ale také pro nepravidelné tvary nebo jejich komplikované kombinace či možnost výpočtu s nelineárními okrajovými podmínkami. V předmětech matematické analýzy se studují speciální případy DR, které lze řešit pomocí elementárních funkcí, nicméně pro využití v prakticky významných úlohách je nutné využití numerických metod.

Protože se disertační práce nezabývá vlastním řešením PDR, ale pouze staví na jejich aplikaci v simulačním softwaru, zabývá se tato kapitola pouze základními fakty numerického řešení PDR. Detailnější informace zabývající se touto tematikou lze nalézt v publikacích [42] nebo [58]-[64].

6.1 Řešení obyčejných diferenciálních rovnic

ODR, resp. jejich soustavy, které popisují reálný systém, není možné v řadě případů řešit analyticky. Numerické metody slouží k získání přibližné hodnoty řešení v konečném počtu uzlových bodů (prvků sítě). Tato práce se bude zabývat numerickým výpočtem funkce, která na intervalu $\langle a, b \rangle$ vyhovuje soustavě rovnic

$$y_1'(x) = f_1(x, y_1, \dots, y_n) \quad (11)$$

$$y_n'(x) = f_n(x, y_1, \dots, y_n) \quad (12)$$

Tento systém rovnic je nazýván soustavou n ODR prvního řádu a je o něm známo, že řešení (pokud existuje) je určeno až na n volitelných parametrů. K jednoznačnosti řešení tak musí výše uvedených n rovnic splňovat n podmínek, které se obvykle nazývají počátečními podmínkami.

ODR m -tého řádu lze řešit obdobně s využitím převodu na soustavu m DR prvního řádu.

Numerické metody rozdělujeme na dvě základní skupiny podle počtu předchozích hodnot, pomocí nichž se počítá budoucí odhad. Rozlišuje tudíž metody:

- Jednokrokové (Eulerova metoda a jeho modifikace, metody Runge-Kutta).
- Vícekrokové (algoritmy prediktor-korektor).

6.2 Řešení parciálních diferenciálních rovnic

PDR mají fyzikální význam v popisu veličiny, která kromě času je závislá také na prostorových souřadnicích. Protože k častému popisu fyzikálních dějů slouží PDR druhého řádu, tak se tato kapitola zaměří zejména na tyto rovnice.

Uvažujme lineární PDR druhého řádu ve tvaru

$$A(x, y) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + B(x, y) \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial y} + C(x, y) \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + E(x, y) \frac{\partial T}{\partial x} + F(x, y) \frac{\partial T}{\partial y} + G(x, y)T = f(x, y). \quad (13)$$

Uvažujme bod $[x_0, y_0] \in \Omega$ a definujme

$$D(x_0, y_0) = B^2(x_0, y_0) - 4A(x_0, y_0)C(x_0, y_0). \quad (14)$$

Podle hodnoty takto definované veličiny $D(x_0, y_0)$ lze PDR, dle jejich hodnoty v daném bodě, rozdělit do následujících tří skupin:

- $D(x_0, y_0) < 0$ nazývá se PDR eliptickou rovnicí v tomto bodě.
- $D(x_0, y_0) = 0$ nazývá se PDR parabolickou rovnicí v tomto bodě.
- $D(x_0, y_0) > 0$ nazývá se PDR hyperbolickou rovnicí v tomto bodě.

Výše uvedená rovnice se nazývá eliptická, resp. parabolická, resp. hyperbolická v oblasti Ω , jestliže v každém bodě oblasti Ω je tato rovnice eliptická, resp. parabolická, resp. hyperbolická.

Každou PDR druhého řádu můžeme převést na tzv. kanonický tvar. Níže jsou uvedeny kanonické tvary rovnice (13), při uvažování výše popsaných typů PDR:

a) eliptický typ:
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = f(x, y, \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y})$$

- b) parabolický typ:
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = f(x, y, \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y})$$
- c) hyperbolický typ:
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = f(x, y, \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y})$$

Pro jednoznačné vyřešení nestacionárních úloh, je třeba navíc definovat počáteční a okrajové podmínky, jak bylo zmíněno výše:

- Počáteční podmínka – udává rozložení veličiny u v počátečním čase.
- Dirichletova okrajová podmínka – udává hodnotu veličiny u na hranici.
- Neumannova okrajová podmínka – udává hodnotu hustoty toku veličiny u na hranici (při uvažování přenosu tepla se jedná o tepelný tok).

Speciálním případem parabolické rovnice je rovnice vedení tepla, kterou lze zapsat ve tvaru

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\lambda}{c_p \rho} \Delta T = 0, \quad (15)$$

kde Δ je Laplaceův operátor vzhledem k prostorovým proměnným

$$\Delta T = \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}. \quad (16)$$

6.3 Ukázka numerického řešení rovnice vedení tepla

Pro numerické řešení DR i PDR se často používá metoda sítí. Při jejím využití je oblast, na které se řeší daný problém nejprve rozdělena na konečný počet bodů (sít'), v nichž jsou hledány hodnoty řešení. Pro vyřešení daného problému je zpravidla potřebné vypočítat velmi rozsáhlé soustavy lineárních algebraických rovnic, a proto se pro tyto výpočty používají výkonné počítače. Tyto soustavy lze řešit jak přímými, tak i iteračními postupy, přičemž prvně zmíněné metody jsou samozřejmě více náročné na výkon i paměť počítače.

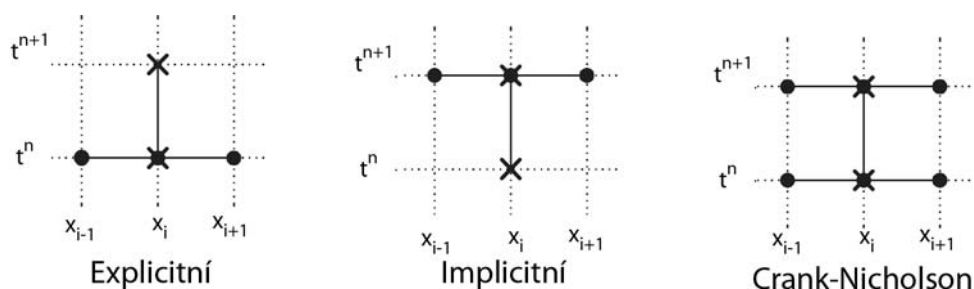
Uvažujme rovnici vedení tepla ohraničenou intervalem $\langle a, b \rangle$ s počáteční a dvěma okrajovými podmínkami

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}, \quad (17)$$

$$T(x, 0) = T_0(x), \quad (18)$$

$$T(a, t) = \alpha(t), \quad T(b, t) = \beta(t). \quad (19)$$

Na obrázku Obr. 6.1 je zobrazeno explicitní, implicitní a Crank-Nicholsonovo schéma řešení parabolické rovnice, jejichž matematický popis je uveden níže v této kapitole.



Obr. 6.1: Schémata pro numerické řešení parabolické rovnice

Numerické řešení metodou sítí je založeno na využití následující posloupnosti kroků:

- Ověříme tzv. podmínky souhlasu, tj. shody hodnot $T(x, t)$ daných počáteční a okrajovými podmínkami v bodech $[a, 0]$ a $[b, 0]$

$$T_0(a) = \alpha(0), T_0(b) = \beta(0). \quad (20)$$

- Zvolíme prostorový krok h a časový krok τ a ověříme stabilitu numerické metody

- explicitní schéma je podmíněně stabilní pro $\frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} \leq \frac{1}{2}$
- implicitní schéma je nepodmíněně stabilní
- Crank-Nicholsonovo schéma je nepodmíněně stabilní

- Vybereme numerickou metodu: explicitní, implicitní nebo Crank-Nicholsonovo schéma pro řešení pomocí metody sítí.

- Podle zvolených kroků h, τ vytvoříme síť: uzly sítě jsou body

$$P_i^k = [x_i, t_k], x_i = a + ih, t_k = \tau k. \quad (21)$$

Množina uzlů P_i^k tvoří při pevném k tzv. k -tou časovou vrstvu. Tímto krokem se rozdělí řešený problém na jednotlivé vrstvy s tloušťkou h . Numerickým řešením jsou následně vypočteny hodnoty

$$T_i^k \approx T(x_i, t_k) \quad (22)$$

v uzlech sítě a tyto hodnoty T_i^k určujeme ve směru rostoucího t , po jednotlivých časových vrstvách.

- e) Prostorové derivace v uzlu P_i^k nahradíme druhou centrální diferencí

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x_i, t_k) \approx \frac{T_{i-1}^k - 2T_i^k + T_{i+1}^k}{h^2}. \quad (23)$$

- f) Časové derivace v uzlu P_i^k nahradíme buď dopřednou diferencí, tj.

$$\frac{\partial T}{\partial t}(x_i, t_k) \approx \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\tau} \quad (24)$$

nebo zpětnou diferencí

$$\frac{\partial T}{\partial t}(x_i, t_k) \approx \frac{T_i^k - T_i^{k-1}}{\tau}. \quad (25)$$

- g) Použijeme-li dopředné difference, tak po dosazení do rovnice vedení tepla dostaneme explicitní schéma

$$\frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\tau} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{T_{i-1}^k - 2T_i^k + T_{i+1}^k}{h^2} \quad (26)$$

$$T_i^{k+1} = T_i^k + \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} (T_{i-1}^k - 2T_i^k + T_{i+1}^k). \quad (27)$$

Pokud známe řešení T_i^k v časovém okamžiku k , tak lze z této rovnice vypočítat řešení v čase následujícím. Pro uvažované $k \geq 0$ je patrné, že první hodnota musí být zadána ve formě počáteční podmínky a obdobně pro $i = \langle 1; n - 1 \rangle$ musí být krajní hodnoty zadány tentokrát ve formě příslušné okrajové podmínky.

- h) Použijeme-li zpětné difference, tak po dosazení do rovnice vedení tepla dostaneme implicitní schéma

$$\frac{T_i^k - T_i^{k-1}}{\tau} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{T_{i-1}^k - 2T_i^k + T_{i+1}^k}{h^2} \quad (28)$$

$$-\frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} T_{i-1}^k + \left(1 + 2 \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2}\right) T_i^k - \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} T_{i+1}^k = T_i^{k-1}. \quad (29)$$

Pro $i = \langle 0; n \rangle$ dostaneme lineární soustavu rovnic s neznámými hodnotami T_i^k , kterou lze psát v maticovém zápisu

$$\begin{bmatrix} 1+2\frac{\lambda}{c_p\rho}\frac{\tau}{h^2} & -\frac{\lambda}{c_p\rho}\frac{\tau}{h^2} & & & \\ -\frac{\lambda}{c_p\rho}\frac{\tau}{h^2} & 1+2\frac{\lambda}{c_p\rho}\frac{\tau}{h^2} & -\frac{\lambda}{c_p\rho}\frac{\tau}{h^2} & & \\ & & \ddots & & \\ & & & -\frac{\lambda}{c_p\rho}\frac{\tau}{h^2} & 1+2\frac{\lambda}{c_p\rho}\frac{\tau}{h^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0^k \\ T_1^k \\ \vdots \\ T_n^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_0^{k-1} \\ T_1^{k-1} \\ \vdots \\ T_n^{k-1} \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Řešením této soustavy rovnic obdržíme hodnotu v časovém okamžiku k .

- i) Pro snížení nárůstu chyby vzniklé numerickým řešením je vhodnější použít kombinaci výše zmíněných metod, která se nazývá Crank-Nicholsonova metoda. Tato metoda namísto použití dopředné diference v čase (explicitní metoda) nebo zpětné diference (implicitní metoda) používá jejich průměrnou hodnotu

$$\frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\tau} = \frac{\lambda}{c_p\rho} \frac{1}{2} \left(\frac{T_{i-1}^{k+1} - 2T_i^{k+1} + T_{i+1}^{k+1}}{h^2} + \frac{T_{i-1}^k - 2T_i^k + T_{i+1}^k}{h^2} \right) \quad (31)$$

$$T_i^{k+1} - T_i^k = \frac{\lambda}{c_p\rho} \frac{\tau}{h^2} \frac{1}{2} (T_{i-1}^{k+1} - 2T_i^{k+1} + T_{i+1}^{k+1} + T_{i-1}^k - 2T_i^k + T_{i+1}^k). \quad (32)$$

Z této rovnice opět nelze přímo obdržet řešení v novém časovém okamžiku. Řešení je obdobné implicitnímu schématu. Po úpravě předchozí rovnice lze psát

$$\begin{aligned} -\frac{\lambda}{c_p\rho} \frac{\tau}{h^2} \frac{1}{2} T_{i-1}^{k+1} + \left(1 + \frac{\lambda}{c_p\rho} \frac{\tau}{h^2} \frac{1}{2} \right) T_i^{k+1} - \frac{\lambda}{c_p\rho} \frac{\tau}{h^2} \frac{1}{2} T_{i+1}^{k+1} = \\ = T_i^k + \frac{\lambda}{c_p\rho} \frac{\tau}{h^2} \frac{1}{2} (T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k). \end{aligned} \quad (33)$$

Převodem výše uvedené rovnice do maticového tvaru lze psát

$$\begin{bmatrix}
1 + \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} & -\frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} \frac{1}{2} \\
-\frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} \frac{1}{2} & 1 + \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} \\
& & -\frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} \frac{1}{2} \\
& & -\frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} \frac{1}{2} & 1 + \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} \\
& & & & \ddots
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
T_0^{k+1} \\
T_1^{k+1} \\
T_2^{k+1} \\
\vdots
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
T_0^k + \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} \frac{1}{2} (T_1^k - 2T_0^k) \\
T_1^k + \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} \frac{1}{2} (T_2^k - 2T_1^k + T_0^k) \\
T_2^k + \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} \frac{1}{2} (T_3^k - 2T_2^k + T_1^k) \\
\vdots
\end{bmatrix}.
\tag{34}$$

Crankova-Nicholsonova metoda je nepodmíněně stabilní stejně jako implicitní metoda, ale její chyba je menší při obdobné časové náročnosti.

Ukázka numerického řešení rovnice vedení tepla s porovnáním s výsledky z programu CM je popsána v příloze D.

6.4 Metoda konečných prvků

MKP (v anglosaské literatuře označovaná termínem Finite Element Method – FEM) vznikla při řešení úloh z oblasti pružnosti materiálů a v inženýrské praxi se používá od padesátých let dvacátého století. Její princip spočívá v rozdělení oblasti na vhodné části (pro dvou-dimensionální problém se nejčastěji jedná o trojúhelníky, ale lze využít i obdélníky nebo kosodélníky, které mají společnou nejvýše jednu hranu nebo vrchol), jež na sebe vzájemně působí. Řešení této metody vychází z jiných předpokladů než metoda sítí, ale vede k řešení podobných rovnic.

Myšlenkou je aproximace funkce u pomoci konečného množství parametrů, které se nazývají stupně volnosti (z anglického Degrees Of Freedom - DOF).

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

7 ZÁKLADNÍ KROKY VALIDACE PROGRAMU COMSOL MULTIPHYSICS

První validační krok vychází z informací uvedených v teoretické části a zabývá se porovnáním simulačních výsledků s analyticky odvozenými modely. Nejprve tak díky těmto modelům dochází k základnímu ověření přesnosti simulačního programu. Na příkladu ochlazované desky s různým druhem okrajových podmínek dochází k ukázce řešení pomocí různých druhů sítí a k potřebnému nastavení numerického řešiče. Tyto první dva modely jsou uvedeny včetně analyticky odvozených vztahů, zatímco u modelů představených organizací ASHRAE nejsou jednotlivé odvozené analytické vztahy modelů popsány v této práci, ale lze je dohledat v publikaci [33].

Jako druhý validační krok se v literatuře zabývající se touto problematikou doporučuje využití několika simulačních nástrojů s následným porovnáním jejich výsledků. V této práci jsou vytvořeny jednotlivé varianty modelu představeného v rámci metodiky BESTEST publikované organizací IEA v úloze 34 [34]. Výstupy z validovaného softwaru CM, tak budou porovnány s výsledky z dalších devíti simulačních programů.

Třetím validačním krokem je experimentální ověření přesnosti simulačního programu. V tomto kroku dochází k porovnání naměřených hodnot průběhů teploty vnitřního vzduchu místnosti s výstupy ze simulačního programu. Zatímco první dva kroky jsou založeny obvykle na výpočtu jedno- nebo dvou-dimenzionálních modelů, tak v tomto kroku dochází k ověření přesnosti na komplexním tří-dimenzionálním modelu.

Výše vyjmenované tři validační kroky jsou obecně doporučované při ověřování výstupů přesnosti simulačních programů i přes některé jejich nevýhody, které budou shrnuty v následujících odstavcích a lze je v podrobněji rozvedené nalézt v [65].

Nevýhodou analytických modelů je jejich relativní jednoduchost (z důvodu možnosti analytického odvození jejich výsledného tvaru), ale na druhou stranu jejich výsledky poskytují nejpřesnější informaci o kvalitě výstupů ze simulačního programu. Tento validační krok tak má zejména vliv při vlastním vývoji programu a má menší význam při jeho používání.

Komparativní testování naopak umožňuje tvorbu složitých modelů, na kterých lze porovnat vliv jednotlivých parametrů, ale nedává žádné potvrzení o „správnosti“ výsledků. Protože ale nejsou založena na analyticky odvozených vztazích ani na hodnotách získaných měřeními, tak pouze porovnávají vypočtené hodnoty s výstupy z dalších programů (příčemž hodnoty těchto výstupů mohou být zkreslené).

Empiricky získané hodnoty jsou při následném porovnání se simulačními výsledky na druhou stranu zase zatížena chybou měřicí techniky a navíc získání těchto informací je velmi náročné jak na časovou realizaci jednotlivých experimentů, tak i na zabezpečení měřicí techniky.

V tabulce 7.1 jsou shrnuty výhody a nevýhody jednotlivých kroků validačního postupu, které jsou uvedeny v publikaci [2] a [35].

Tab. 7.1: *Výhody a nevýhody jednotlivých kroků validačního postupu [2], [35]*

<i>Validační krok</i>	<i>Výhody</i>	<i>Nevýhody</i>
Analytický test	<ul style="list-style-type: none"> • Bez nejistoty hodnot jednotlivých parametrů • Přesný matematický popis • „Levná“ tvorba modelu 	<ul style="list-style-type: none"> • Nemožnost ověřit správnost modelu • Omezení na případy, které lze analyticky odvodit
Komparativní test	<ul style="list-style-type: none"> • Bez nejistoty hodnot jednotlivých parametrů • Libovolná úroveň složitosti • Možnost srovnání různých simulačních výstupů • „Levná“ a rychlá tvorba modelu 	<ul style="list-style-type: none"> • Výsledkem porovnání není „prokazatelné“ tvrzení o schopnostech programu, ale pouze statisticky podložené tvrzení o řešení daných případů

<i>Validační krok</i>	<i>Výhody</i>	<i>Nevýhody</i>
Srovnání s naměřenými hodnotami	<ul style="list-style-type: none"> • Libovolná úroveň složitosti • Porovnání výstupů z modelu s hodnotami získanými měřením reálného objektu 	<ul style="list-style-type: none"> • Experimentální nejistoty <ul style="list-style-type: none"> ○ Kalibrace senzorů, vliv prostorového umístění a teploty na naměřené hodnoty ○ Nemožnost tvorby přesného modelu objektu • Vysoké časové a finanční nároky na přesná měření • Omezené množství testovacích podmínek

8 VALIDACE POMOCÍ ANALYTICKÝCH MODELŮ

Jako základní test pro ověření přesnosti použitého simulačního programu pro výpočet nestacionárního přenosu tepla, byl zvolen model využívající jednorozměrné šíření tepla v desce. Jsou uvažovány dva případy, které mají shodné rozměry, ale využívají rozdílné okrajové podmínky. První varianta modelu využívá okrajové podmínky prvního druhu, zatímco u druhého modelu je nastavena na jednotlivých hranicích okrajová podmínka třetího druhu.

Kromě těchto dvou variant odvozeného modelu byly ještě využity analyticky odvozené modely z benchmarku vyvinutého společností ASHRAE.

Všechny tyto modely byly vytvořeny ve verzi 3.5 programu CM.

8.1 Validace pomocí odvozených analytických modelů

Pomocí separace proměnných lze odvodit z rovnice vedení tepla rozložení teploty v desce. Při uvažovaném jednorozměrném šíření tepla s okrajovou podmínkou prvního druhu je výsledný vztah popisující teplotu dán rovnicí

$$\theta^* = \frac{\theta(x,t) - \theta_o}{\theta_p - \theta_o} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\lambda_n)}{\lambda_n} \cos(\lambda_n x) e^{-\lambda_n^2 Fo}, \quad (35)$$

kde θ^* , θ_o , θ_p označují bezrozměrnou, okolní a počáteční teplotu, $\theta(x,t)$ označuje teplotu v daném místě a čase, parametr λ_n je roven lichým násobkům π

$$\lambda_n = (2n-1) \frac{\pi}{2} \quad (36)$$

a Fo je Fourierovo číslo

$$Fo = \frac{a \cdot t}{d^2}, \quad (37)$$

kde a je teplotní vodivost, t čas a d charakteristický rozměr.

Obdobně pro rozložení teploty s uvažovanou okrajovou podmínkou třetího druhu lze psát

$$\theta^* = \frac{\theta(x,t) - \theta_o}{\theta_p - \theta_o} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\lambda_n)}{\lambda_n + \sin(\lambda_n) \cos(\lambda_n)} \cos(\lambda_n x) e^{-\lambda_n^2 F_0}, \quad (38)$$

kde opět θ^* , θ_o , θ_p , $\theta(x,t)$ označují hodnoty teploty, ale parametr λ_n je tentokrát roven kořenům transcendentní rovnice

$$\operatorname{ctg} \lambda = \frac{\lambda}{Bi}, \quad (39)$$

kde Bi je Biotovo číslo

$$Bi = \frac{h \cdot d}{\lambda}, \quad (40)$$

kde h označuje SPT a λ tepelnou vodivost.

V tabulce 8.1 jsou zobrazeny fyzikální parametry a rozměry geometrie modelu vytvořeného pro ověření přesnosti testovaného simulačního programu s analytickým řešením.

Tab. 8.1: Parametry modelu pro srovnání s analytickým řešením

<i>Veličina</i>	<i>Hodnota</i>
Vnější teplota	60°C
Počáteční teplota	20°C
Hustota	1130 kg.m ⁻³
Tepelná vodivost	0,29 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Měrná tepelná kapacita	1700 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Rozměry	0,2 × 1,6 × 0,012 m
Hodnota SPT	21 W.m ⁻² .K ⁻¹

Aby byla zajištěna vysoká přesnost analytického řešení, tak byly výše uvedené rovnice popisující rozložení teploty v desce vypočteny pro 8 kořenů hodnot parametru λ_n . Výpočet hodnot teploty pro následné porovnání probíhal ve třinácti rovnoměrně rozmístěných bodech pro 5 hodnot Fourierova kritéria (37) v programu MS Excel.

8.1.1 Výpočet teploty v simulačním rozhraní COMSOL Multiphysics

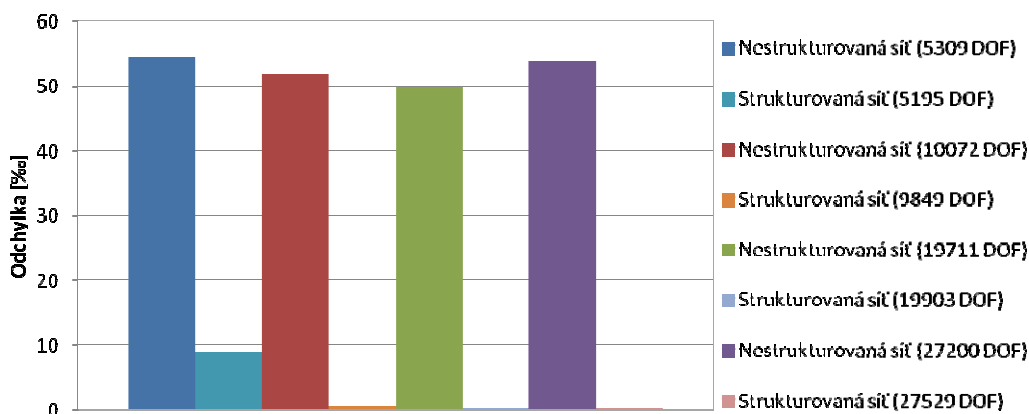
Ve validovaném simulačním softwaru byla vytvořena geometrie desky, která byla poté doplněna fyzikálními parametry a příslušnými okrajovými podmínkami dle hodnot představených výše v tabulce 8.1.

Během porovnání jednotlivých simulačních výstupů byl potvrzen významný vliv kvality sítě (množství a rozložení jednotlivých prvků) na výsledky numerického výpočtu pomocí MKP (vyšší počet DOF → vyšší přesnost výpočtu). Další důležitou informací, která vyplynula z řešení, je potřeba snížení hodnoty zbytkových reziduí numerických řešičů. Opakovanými simulacemi bylo zjištěno, že pro dosažení dostatečně přesných výsledků numerického řešení je vhodné snížit hodnotu těchto reziduí alespoň o jeden řád.

Posouzení kvality sítě bylo provedeno porovnáním součtu absolutních hodnot odchylek ve zvolených třinácti místech mezi numerickým a analytickým řešením ve zvoleném čase 120 s viz tabulka 8.2 a obrázek 8.1. Je patrné, že strukturovaná síť (využívající šestistěny) je schopna i s podstatně menším počtem prvků dosahovat menších odchylek v porovnání s nestrukturovanou sítí (využívající na čtyřstěny). Nevýhodou tohoto druhu sítě je její omezené použití pouze na pravoúhlé útvary bez vnitřních výřezů. Vzájemným porovnáním jednotlivých simulací bylo prokázáno, že nevhodným počtem prvků sítě nebo jejich rozložením se numerický výpočet teploty liší až o desetiny stupně Celsia v porovnání s analytickým řešením.

Tab. 8.2: Vývoj odchylky mezi analytickým a numerickým řešením v závislosti na DOF

<i>Nestrukturovaná síť</i>			<i>Strukturovaná síť</i>	
<i>DOF</i>	<i>Odchylka [%o]</i>		<i>DOF</i>	<i>Odchylka [%o]</i>
5309	54,52		5195	9,07
10072	51,81		9849	0,53
19711	49,80		19903	0,21
27200	53,86		27529	0,16

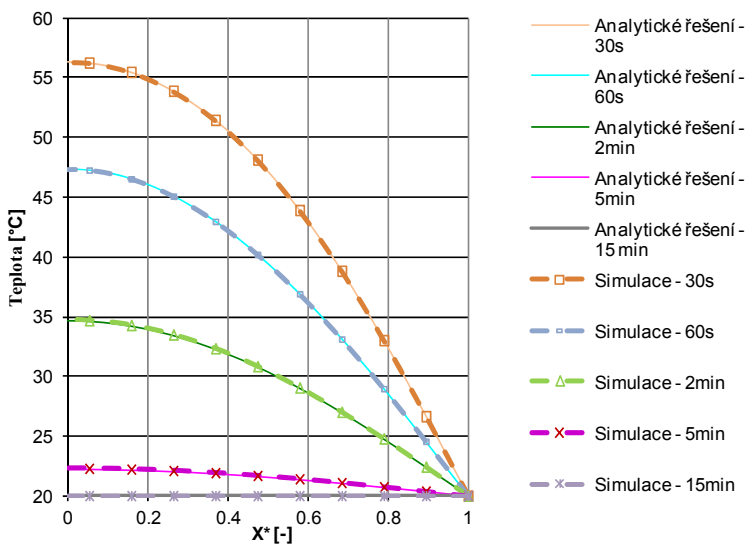


Obr. 8.1: Srovnání odchylek mezi analytickým a numerickým řešením v závislosti na počtu *DOF*

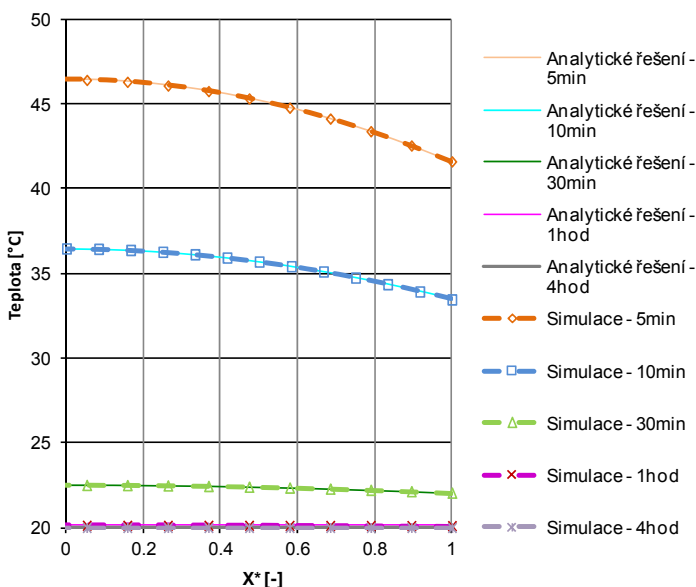
S ohledem na uvedené porovnání byla při každém následujícím výpočtu numerických modelů volena strukturovaná síť (pokud to situace dovoľovala). Zároveň pomocí opakovaných simulací byly vybrány takové sítě, u nichž při navýšení jejich prvků nedošlo k praktickému zpřesnění simulačních výstupů.

8.1.2 Porovnání průběhu teploty analytického a numerického modelu

Obrázky 8.2 a 8.3 zobrazují porovnání vypočtených průběhů teploty v desce pomocí analyticky odvozeného a numerického modelu. Model byl řešen jako symetrický, a proto je v obrázcích zobrazeno řešení pouze poloviny výše popsané geometrie. Grafy průběhů teplot obdrženy z analytického řešení rovnice jsou zobrazeny spojitou čarou, zatímco výstupy ze simulačního programu jsou vykresleny čarou čárkovanou. Z obrázků je patrná vysoká shoda mezi analytickým a numerickým řešením, která se nicméně u těchto modelů očekávala.



Obr. 8.2: Srovnání průběhu teploty v desce s okrajovou podmínkou prvního druhu



Obr. 8.3: Srovnání průběhu teploty v desce s okrajovou podmínkou třetího druhu

Uvedené porovnání tak slouží zejména jako nutný první krok k ověření schopností validovaného nástroje a vedlejším cílem tohoto validačního kroku, bylo zejména ověření vlivu DOF a nastavení řešiče na přesnost numerického řešení DR.

8.2 Validace pomocí modelů popsaných v ASHRAE 1052-RP Toolkit

V minulých letech vzniklo několik analytických testů, mezi které se řadí i benchmark vyvinutý společností ASHRAE, který je představen v publikaci [33]. Publikace obsahuje popis testů a to včetně jejich geometrie a nastavení fyzikálních dějů, ale také prezentuje výsledky jednotlivých testů a obsahuje odvození analytických řešení s odkazy na jejich autory. Závěrečná kapitola obsahuje zdrojové kódy programu pro výpočet těchto testů v jazyce Fortran. Tento benchmark dohromady popisuje šestnáct testů, které jsou založeny převážně na přenosu tepla, ale nachází se zde i několik testů založených na přenosu hmoty. Testy jsou rozděleny do pěti skupin podle specifického zaměření testu na konkrétní oblast:

- Skupina 1 – Vedení a proudění (5 modelů).
- Skupina 2 – Sluneční zisky a vliv zastínění (5 modelů).
- Skupina 3 – Infiltrace (2 modely).
- Skupina 4 – Dlouhovlnné záření (2 modely).
- Skupina 5 – Ostatní (2 modely).

Jednotlivé modely jsou založeny na krychlové geometrii s vnitřními rozměry $3 \times 3 \times 3$ m, nicméně z důvodu analytického odvození jsou některé testy vypočteny pouze jako jednorozměrné problémy.

Výsledky analytického řešení jednotlivých testů budou v následující podkapitole porovnány s výsledky získanými programem CM. Navíc jsou v této práci ještě uvedeny výsledky z obdobného testování softwaru EnergyPlus, který tímto testem prošel na podzim roku 2011 [67] (ze závěrečné zprávy z tohoto testování jsou převzaty hodnoty uvedené v následujících několika tabulkách).

8.2.1 Popis jednotlivých modelů

Z šestnácti testů popsaných v tomto benchmarku jich bylo vytvořeno osm. K tomu kroku muselo být přistoupeno z následujících důvodů. Nebylo možno vytvořit modely ze skupiny 2 (celkem se jedná o pět modelů), protože využívají k výpočtu polohu slunce v jednotlivých dnech v roce (tuto závislost není možné popsat v současné verzi

validovaného programu). Kromě této skupiny dále nebylo možno vytvořit jeden test ze skupiny 5 z důvodu nemožnosti zadání radiačního zdroje tepla, jak je popsán v testu a třetím důvodem snížení počtu tvořených testů je tematické zaměření této práce, které se orientuje na přenos tepla, a proto byly vynechány testy ze skupiny 3.

Tabulka 8.3 obsahuje krátký popis jednotlivých testů, které byly v programu CM vytvořeny. Modely testů IntLWRad a GrdCoup nebylo možno vytvořit přesně dle jejich specifikací, a proto budou úpravy těchto testů blíže rozvedeny v následujících odstavcích.

Tab. 8.3: Popis jednotlivých tvořených testů představených v práci [33]

Označení testu		Popis test
Skupina 1	SSConv	Steady state Convection – Účelem tohoto testu je naleznout hodnoty tepelného toku mezi vnitřní zónou a vnějšími prostředím v ustáleném stavu. Tepelný tok je uskutečňován konvekcí jak na vnitřních, tak na vnějších površích.
	SSCond	Steady state Conduction – Test je obdobný předchozímu, ale stěna je uvažována jako vícevrstvá.
	TC1	Transient Conduction (Adiabatic Wall) – Tento test zkoumá odezvu na skokovou změnu vnější teploty při uvažování adiabatické podmínky na vnitřních zdech místnosti.
	TC2	Transient Conduction (Step Response) – Jedná se o obdobu předchozího testu, ale přenos tepla konvekcí se uvažuje jak na vnějších, tak i na vnitřních površích.
	TC3	Transient Conduction (Sinusoidal Driving temperature and Multi-layer Wall) – Test je variantou předchozího, ale vnější teplota v něm má tvar sinusoidy.
Skupina 4	ExtLWRad	External Long Wave Radiation – Test ověřuje přenos tepla radiací daného simulačního programu. Jedná se o modelování záření mezi oblohou a střechou budovy.

<i>Označení testu</i>		<i>Popis test</i>
	IntLWRad	Interior Long Wave Radiation – Tento test se zaměřuje na přenos tepla radiací uvnitř místnosti. Test nebylo možno vytvořit v programu CM přesně dle jeho popisu.
Skupina 5	GrdCoup	Ground Coupling (Slab on Ground Floor) – Test zkoumá stacionární tepelný tok mezi podlahou a zeminou. Test nebylo možno vytvořit v programu CM přesně dle jeho popisu.

Test IntLWRad je díky popisu svých rozměrů ve formě pěti rozdílných poměrů stran (jedná se vždy o čtvercovou podstavu s rozdílnou délkou třetího rozměru) a třech variant nastavení hodnot emisivit vnitřních stěn výjimkou. Jedna čtvercová stěna je dle popisu modelu ovlivňována vnějšími podmínkami, zatímco ostatní stěny jsou uvažovány s adiabatickou okrajovou podmínkou. Kromě těchto podmínek je ovšem definován i přenos tepla konvekcí a radiací na vnitřních površích místnosti. Tento popis proto vyžaduje nastavení dvou (vnitřních a vnějších) okrajových podmínek na jednom povrchu, což není v programu CM možné. Proto nebyla vytvořena geometrie přesně dle popisu, ale bylo přistoupeno k její úpravě do tvaru dvou těles. Vnitřní prostor má požadované rozměry, zatímco vnější má každý rozměr o 0,2 m delší (šlo vytvořit i menší šířku stěn, ale v příliš tenkých stěnách by se vytvářela problematicky síť pro numerické řešení). Z tohoto uspořádání následně vyplynuly dva dodatečné problémy. Zprvce bylo třeba určit hodnoty tepelné vodivosti jednotlivých stěn. Její hodnota byla experimentálně určena dle simulačních výsledků (pro geometrii s poměrem stran 1 a emisivitami popsány v první variantě) s hodnotou $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Dále vznikl problém s tokem tepla na vnější stěně, která nemá rozměry (3x3) m jak je popsáno ve specifikaci testu, ale rozměry (3,2x3,2) m. Tato zvětšená plocha by vedla ke zvýšenému toku tepla do povrchu stěny, a proto byla úměrně tomuto zvětšení zmenšena hodnota SPT tak, aby se tyto vlivy vzájemně vykompenzovaly.

Druhý jmenovaný test požaduje nastavenou hodnotu teploty vnitřního prostředí budovy při stacionárním ději, což přímo nelze v testovaném programu zajistit. Nastavení tohoto parametru lze provést pouze na hranicích, ale nikoli v oblasti. Pro dosažení výsledné vnitřní teploty blízké požadované hodnotě, tak byly nastaveny teploty

jednotlivých vnitřních povrchů stěn (kromě podlahy, kde je nastavena okrajová podmínka třetího druhu) na konstantní hodnotu. Protože se ale místnost ochlazuje únikem tepla do zeminy, tak teplota těchto stěn nemohla být nastavena na teplotu požadovanou, ale na teplotu o 1,9°C vyšší (nastaveno pomocí opakovaných simulací a zkoumání vnitřní teploty vzduchu místnosti).

8.2.2 *Vyhodnocení výsledků testů z první skupiny*

V tabulkách 8.4 a 8.5 jsou srovnány výsledky stacionárních testů SSConv a SSCond. Tabulky obsahují srovnání výsledků analytického a numerického řešení (z programu CM i EnergyPlus) těchto dvou modelů. Porovnávané parametry ukazují na vysokou přesnost numerických řešení, nicméně je opět třeba poznamenat, že vzhledem k relativně jednoduchým modelům, se obdobný výsledek očekával.

Tab. 8.4: Srovnání výsledků analytického a numerického řešení stacionárního testu SSConv

<i>Srovnávaná veličina</i>	<i>Analytické řešení</i>	<i>Výsledky z programu CM</i>	<i>Relativní odchylka</i>	
			<i>CM [%]</i>	<i>EnergyPlus [%]</i>
Tepelný tok [$W.m^{-2}$]	34,46	34,46	0,00	0,00
Tepelný zisk místnosti [W]	310,14	310,14	0,00	0,00
Teplota na vnitřním povrchu [$^{\circ}C$]	20,33	20,33	0,00	0,00
Teplota na vnějším povrchu [$^{\circ}C$]	23,78	23,78	0,00	0,00
SPT na vnitřním povrchu [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	3,33	3,33	0,00	0,00

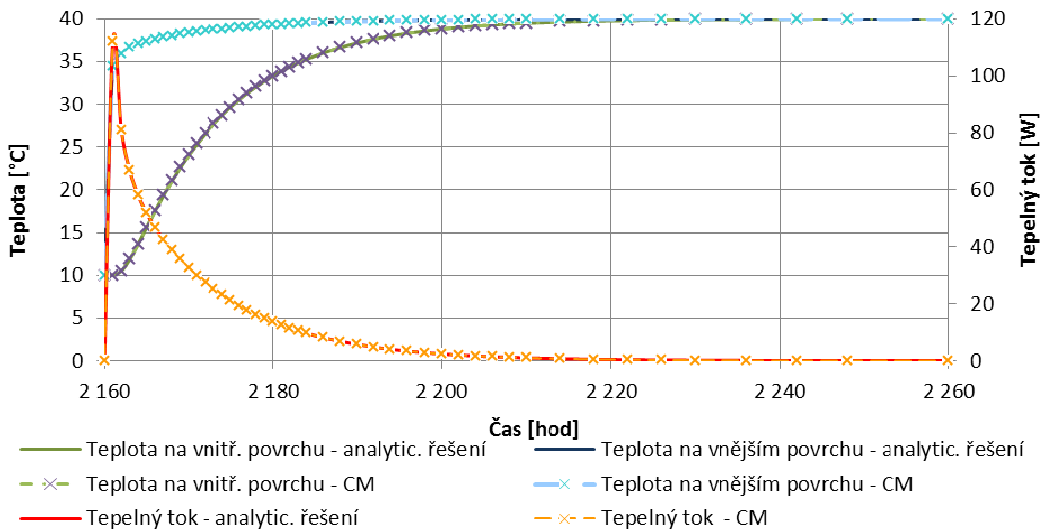
Srovnávaná veličina	Analytické řešení	Výsledky z programu CM	Relativní odchylka	
			CM [%]	EnergyPlus [%]
SPT na vnějším povrchu [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	2,12	2,12	0,00	0,00

Tab. 8.5: Srovnání výsledků analytického a numerického řešení stacionárního testu SSCond

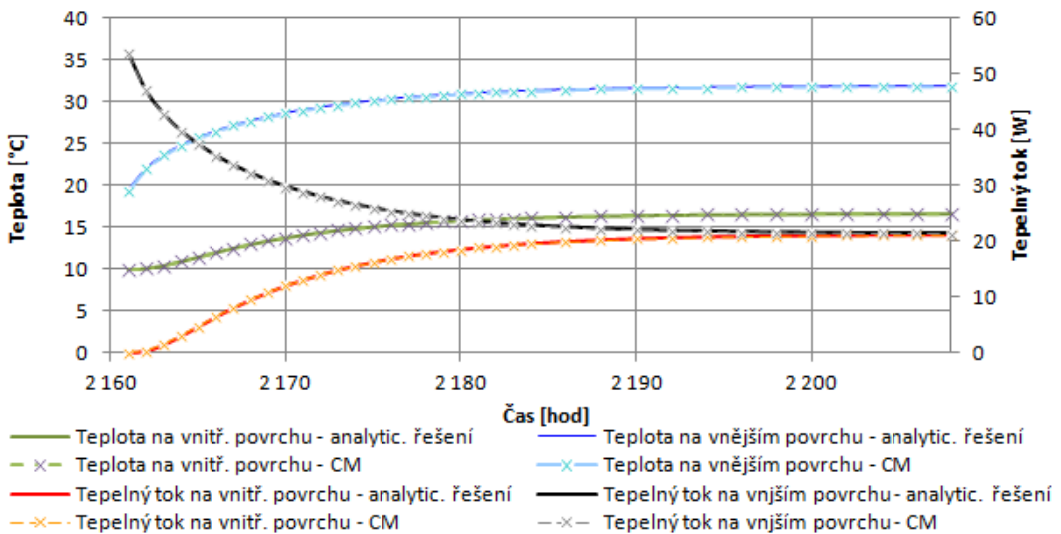
Srovnávaná veličina	Analytické řešení	Výsledky z programu CM	Relativní odchylka	
			CM [%]	EnergyPlus [%]
Tepelný tok [$W.m^{-2}$]	9,16	9,16	0,00	0,00
Tepelný zisk místnosti [W]	82,40	82,40	0,00	0,00
Teplota na vnitřním povrchu [$^{\circ}C$]	13,86	13,86	0,00	0,00
Teplota na vnějším povrchu [$^{\circ}C$]	34,00	34,00	0,00	0,00
SPT na vnitřním povrchu [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	2,37	2,37	0,00	0,00
SPT na vnějším povrchu [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	1,53	1,53	-0,01	0,00

Následující obrázky zobrazují části vypočtených řešení nestacionárních úloh TC1 (obrázek 8.4), TC2 (obrázek 8.5) a TC3 (obrázek 8.6). Jednotlivé průběhy reprezentují teploty na vnitřním a vnějším povrchu stěny a tepelný tok po skokové změně vnější teploty v čase 2160 hod. Hodnoty získané z analytického řešení jsou zobrazeny plnými čarami,

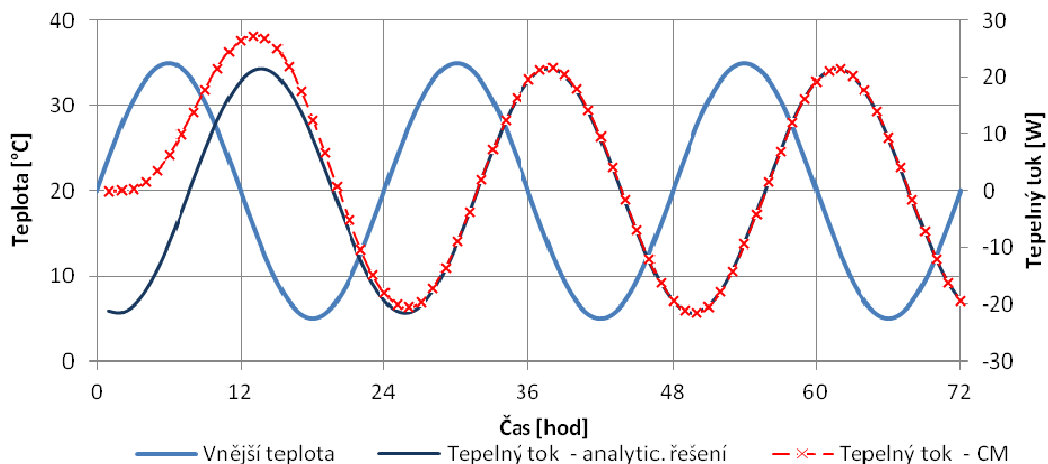
zatímco výstupy z numerických modelů jsou vykresleny čárkovanými čarami se značkami. Na prvních dvou obrázcích je opět patrná vysoká shoda mezi jednotlivými průběhy.



Obr. 8.4: Porovnání průběhů hodnot (teploty na vnějším a vnitřním povrchu a tepelného toku) analytického řešení a hodnot získaných výpočtem v programu CM testu TC1



Obr. 8.5: Porovnání průběhů hodnot (teploty na vnějším a vnitřním povrchu a tepelného toku) analytického řešení a hodnot získaných výpočtem v programu CM testu TC2



Obr. 8.6: Porovnání průběhů hodnot (vnější teploty a tepelného toku) analytického řešení a hodnot získaných výpočtem v programu CM testu TC3

Pro bližší pohled na jednotlivé odchylky je zobrazeno statistické vyhodnocení těchto průběhů v tabulce 8.6, kde je navíc přidána hodnota vypočtená z hodnot prezentovaných v práci obsahující validaci programu EnergyPlus (protože v ní nejsou uvedeny jednotlivé srovnávací parametry uvedené v benchmarku).

Tab. 8.6: Statistické zhodnocení průběhů hodnot z nestacionárních testů ze skupiny 1

Testovaný případ	Srovnávaná veličina	Relativní odchylka		Směrodatná odchylka	
		CM	EnergyPlus ¹⁾	CM	EnergyPlus ¹⁾
		[%]	[%]	[%]	[%]
TC1	Teplota na vnitřním povrchu [°C]	0,00	N	0,00	N
	Teplota na vnějším povrchu [°C]	0,00	N	0,01	N

Testovaný případ	Srovnávaná veličina	Relativní odchylka		Směrodatná odchylka	
		CM	EnergyPlus ¹⁾	CM	EnergyPlus ¹⁾
		[%]	[%]	[%]	[%]
	Tepelný tok [$W.m^{-2}$]	0,30	N	1,03	N
TC2	Teplota na vnitřním povrchu [$^{\circ}C$]	0,01	N	0,01	N
	Teplota na vnějším povrchu [$^{\circ}C$]	0,00	N	0,00	N
	Tepelný tok na vnitřním povrchu [$W.m^{-2}$]	0,23	N	0,96	N
	Tepelný tok na vnějším povrchu [$W.m^{-2}$]	0,03	N	0,01	N
TC3	Tepelný zisk místnosti [W]	37,86	2,9	108,37	N

1) N – hodnoty nebyly k dispozici

Vyšší hodnoty směrodatné odchylky tepelného toku u modelu TC1 a tepelného toku na vnitřním povrchu u modelu TC2 jsou způsobeny odchylkami hodnot těchto veličin v čase před ustálením, kdy jejich hodnoty jsou téměř rovny 0 W a absolutní hodnoty těchto odchylek jsou v řádu tisícín. Přestože se jedná o prakticky bezvýznamné rozdíly, tak při

relativním vyjádření představují odchylky v řádu jednotek procent (v porovnání s ostatními hodnotami odchylek) významnou neshodu.

Nesoulad mezi tepelným tokem během první periody u modelu TC3 je způsoben akumulací tepla ve stěně, díky které trvalo přibližně 18 *hod* přiblížení numerického modelu k analyticky odvozenému řešení. Popis testu TC3 neobsahuje hodnotu počáteční teploty stěny, a proto bylo přistoupeno k její volbě na hodnotu 20°C, což je hodnota okolo které osciluje vnější teplota (nebylo dosaženo nalezení počáteční teploty vhodné pro nastavení simulačního výpočtu, aby nalezené řešení vykazovalo výrazně lepší shodu s analytickým řešením). Kdyby statistické vyhodnocení bylo provedeno pouze u hodnot zobrazených ve druhé polovině grafu, tak by průměrná hodnota a směrodatná odchylka byly rovny 0,49% resp. 0,85%. Tyto hodnoty by byly přibližně šestkrát menší s hodnotami vypočtenými programem EnergyPlus.

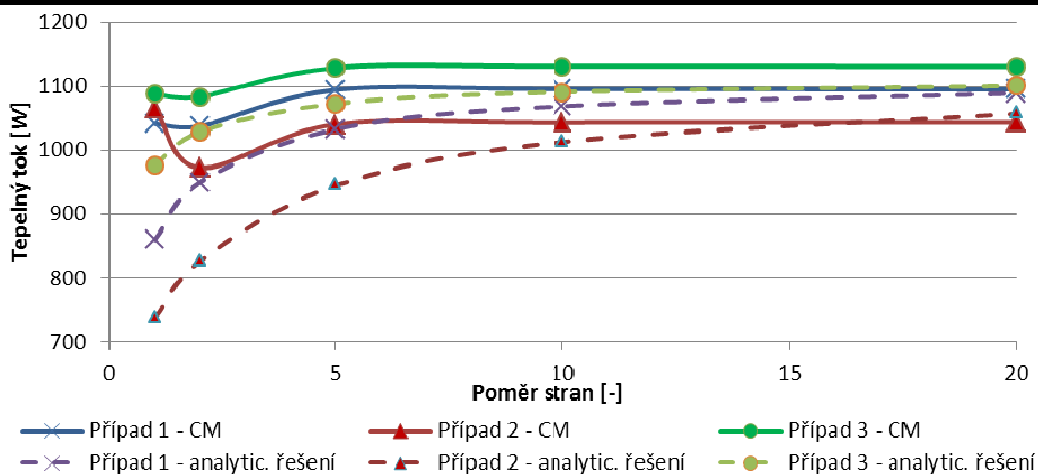
8.2.3 *Vyhodnocení výsledků testů ze čtvrté skupiny*

Test ExtLWRad je zaměřen na přenos tepla radiací mezi oblohou a střechou budovy. Hodnoty uvedené v tabulce 8.7 deklarují vysokou přesnost programu CM pro výpočet vnějšího sálání. Jednotlivé hodnoty sledovaných veličin jsou v podstatě shodné s analytickým řešením, zatímco výsledky vypočtené programem EnergyPlus poukazují na určité nesrovnalosti. V závěrečné zprávě z validace programu EnergyPlus je uvedeno, že původ těchto odchylek je nejasný, ale že se pravděpodobně jedná o rozdílný přístup k modelování sálání oblohy ve vnitřní struktuře programu.

Průběh hodnot obdržných numerickým řešením modelu popsaného v testu IntLWRad je zobrazeno na obrázku 8.7. Z obrázku je patrná slabá shoda mezi jednotlivými průběhy tepelných toků, a to zejména pro malé hodnoty poměru stran. Nejvyšší odchylky nastaly u varianty s hodnotou poměru stran rovnou jedné nebo dvěma zatímco protáhlé geometrie poskytují výsledky blízké analytickému řešení. Pro krychlovou geometrii modelu jsou velmi výrazné rozdíly pro všechny tři kombinace použitých hodnot emisivit u jednotlivých variant modelu.

Tab. 8.7: Statistické vyhodnocení průběhů hodnot výsledků testu ExtLWRad

Srovnávaný parametr	Analytické řešení	Výsledky z programu CM	Relativní odchylka	
			CM [%]	EnergyPlus [%]
Tepelný tok [$W.m^{-2}$]	-17,79	-17,79	0,00	29,45
Tepelný zisk místnosti [W]	-160,15	-160,15	0,00	29,45
Teplota na vnitřním povrchu [$^{\circ}C$]	13,68	13,68	0,00	9,45
Teplota na vnějším povrchu [$^{\circ}C$]	11,90	11,90	0,00	6,68
SPT na vnitřním povrchu [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	2,81	2,81	0,00	0,00
SPT na vnějším povrchu [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	1,69	1,69	0,00	0,00



Obr. 8.7: Tepelný tok mezi jednotlivými stěnami místnosti testu IntLWRad

Statistické zhodnocení jednotlivých průběhů popisuje tabulka 8.8 (pro natolik detailní srovnání nebylo možno využít hodnot vypočtených v programu EnergyPlus).

Absolutní hodnoty relativních odchylek validovaného programu jsou v intervalu 1 - 45% hodnoty získané z analytického řešení tohoto modelu; hodnoty vypočtené v programu EnergyPlus mají odchylku do 0,65%. Nabízejícím se důvodem takto vysokých hodnot odchylek je možnost tvorby pouze přibližného modelu, jak bylo vysvětleno výše, nicméně natolik vysoké hodnoty odchylek jsou poměrně překvapivé. Tento model tak poukázal na určité problémy s výpočtem přenosu tepla radiací mezi jednotlivými vnitřními povrchy místnosti v tomto programu.

Tab. 8.8: Statistické zhodnocení průběhů hodnot výsledků testu IntLWRad

<i>Poměr</i> <i>strana</i> <i>n</i>	<i>Analytické řešení</i>			<i>Výsledky z programu</i> <i>CM</i>			<i>Relativní odchylka</i> <i>[%]</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
1	860	737	860	1042	1066	1088	-21.14	-44.63	-26.54
2	950	826	950	1038	973	1084	-9.27	-17.78	-14.15
5	1033	945	1033	1095	1041	1129	-6.02	-10.14	-9.34
10	1070	1013	1070	1096	1044	1132	-2.45	-3.03	-5.75
20	1090	1058	1090	1096	1044	1131	-0.51	1.34	-3.76

8.2.4 *Vyhodnocení výsledků testů z páté skupiny*

Posledním modelovaným testem je GrdCoup, který je založen na výpočtu přenosu tepla mezi podlahou místnosti a zemínou. Srovnání hodnot z analytického řešení s numerickým výpočtem přibližného modelu v programu CM je zobrazeno v tabulce 8.9. Tento model nebylo problematické vytvořit pouze v programu CM, ale s ještě většími problémy se setkali i autoři validující program EnergyPlus. Program CM měl problém zejména s nastavením vnitřního vzduchu na konstantní teplotu (hodnotu lze nastavit pouze

jako okrajovou podmínku, ale nikoli jako vlastnost dané zóny), zatímco v programu EnergyPlus nastal problém s tvorbou modelu podlahy na zemině v obecné rovině. Vypočtená hodnota tepelného zisku/ztráty místnosti v programu CM je o 32% větší ve srovnání s analytickým řešením; hodnota teploty na vnitřním povrchu je naopak o 9% menší. Program EnergyPlus vypočetl obě tyto veličiny s absolutní hodnotou relativní odchylky okolo 45%.

Tab. 8.9: Statistické zhodnocení výsledků testu GrdCoup

Srovnávaná veličina	Analytické řešení	Výsledky z programu CM	Relativní odchylka	
			CM [%]	EnergyPlus [%]
Tepelný zisk místnosti [W]	-179,00	-236,79	32,28	-44,18
Teplota na vnitřním povrchu [°C]	18,13	16,43	-9,38	47,83

8.3 Závěr

V tomto validačním kroku byla ověřena přesnost simulačního nástroje CM pro výpočet tepelných dějů aplikovaných ve stavební problematice.

Nejprve byly odvozeny rovnice pro dva případy, které posloužily zejména k nastavení velikosti reziduí numerického řešiče a informaci o rozdílnosti vypočtených hodnot při využití strukturované a nestrukturované sítě.

Poté bylo vytvořeno vybraných osm testovacích modelů představených v publikaci ASHRAE 1052-RP pro ověření přesnosti programu CM, což je polovina modelů popsaných v benchmarku ASHRAE 1052-RP. Výstupy z analytického řešení byly porovnány s výsledky z programu CM navíc i s hodnotami vypočtenými programem EnergyPlus, který prošel stejným testem v průběhu loňského roku.

Modely, které bylo možno v programu CM vytvořit, byly většinou vypočteny s dostatečnou přesností. Z výše uvedeného srovnání lze vyvodit, že testy založené na přenosu tepla vedením nebo prouděním lze počítat v programu CM s vysokou mírou přesnosti. Naopak modely využívající sálání mezi jednotlivými vnitřními povrchy místnosti vykazují znatelné rozdíly od hodnot vypočtených analyticky. S tímto problémem je částečně spojena také nemožnost tvorby modelů popsaných ve druhé skupině, které vyžadují schopnost zadávání hodnot parametrů v závislosti na světové orientaci a zeměpisné šířce a délce.

9 VALIDACE POMOCÍ SROVNÁVACÍHO TESTU IEA BESTEST TASK 34

Jedním z vytvořených srovnávacích testů simulačních nástrojů je americký „Building Energy Simulation Test“ známý pod akronymem BESTEST představený Mezinárodní agenturou pro energii (International Energy Agency - IEA) v úloze 34 [33]. Protože se jedná o benchmark z oblasti komparativního testování, tak primárně neslouží k porovnání výsledků s analytickým řešením, ale ke vzájemnému porovnání výstupů různých simulačních programů.

Tento test obsahuje sedmnáct variant referenčního modelu místnosti reprezentujících průchod tepla skrze podlahu budovy a kombinujících vedení tepla s okrajovými podmínkami prvního a třetího druhu. Jednotlivé varianty modelu byly vytvořeny s takovým počtem DOF, aby při jejich dalším zvýšení nedošlo mezi modely k větší odchylce o více než 1% vypočteného tepelného toku.

Přenos tepla je v tomto testu charakterizován zejména:

- Tepelným tokem plochou podlahy, který závisí na jejím složení a rozměrech.
- Tepelným tokem po obvodu podlahy.
- Ročním periodickým tepelným tokem, který vyplývá z tepelné setrvačnosti zeminy.

V úloze 34 jsou srovnány výstupy z následujících devíti programů: BASECALC, EnergyPlus, ESP-r-BASESIMP, FLUENT, GHT, MATLAB, SUNREL-GC, TRNSYS, VA114-ISO13370. S těmito programy jsou na následujících stranách porovnávány hodnoty obdržené ze simulačního programu CM.

Potřebné klimatické podmínky pro provedení jednotlivých srovnávacích testů byly staženy z internetu¹⁴ pro oblast Colorada ve formátu typického roku – TMY (Typical Meteorological Year).

¹⁴ www.nrel.gov/docs/fy08osti/43388-01.zip

9.1 Popis jednotlivých variant modelu

Z jednotlivých variant modelu představených úloze 34 je níže popsáno sedmáct variant modelu – šest z nich se zabývá stacionárním a jedenáct nestacionárním přenosem tepla. Jednotlivé modely se odlišují především v nastavení okrajových podmínek a uvažovanou velikostí zeminy v okolí budovy. Výchozí parametry jednotlivých variant modelu jsou popsány v tabulce 9.1.

Tab. 9.1: Výchozí nastavení fyzikálních a geometrických parametrů modelu

<i>Parametry modelu</i>	<i>Označení</i>	<i>Hodnota</i>
Šířka a délka podlahy	$a \times b$	12 m
Výška stropu místnosti	c	2,7 m
Tloušťka stěn	d	0,24 m
Vnitřní teplota	θ_{int}	30°C
Vnější teplota	θ_{ext}	Proměnlivá
Teplota spodního okraje zeminy	θ_{dg}	10°C
Hloubka zeminy	G	15 m
Šířka pásu zeminy okolo budovy	F	15 m
SPT na vnitřním povrchu místnosti	h_{int}	100 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
SPT na povrchu zeminy	h_{ext}	100 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Měrná tepelná kapacita podlahy a zeminy	λ	1800 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Hustota podlahy a zeminy	ρ	1400 $kg \cdot m^{-3}$
Tepelná vodivost podlahy a zeminy ¹⁾	c_p	1,9 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

1) České normy uvádějí hodnoty tepelná vodivost zeminy mírně odlišné: hodnota 1,5 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pro hlíny a jíly, 2 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pro písky a šterky a 3,5 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ pro stejnorodou skálu [66]; norma [51] uvádí jednotnou hodnotu 2 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

Představené varianty modelu jsou založeny na vedení tepla mezi podlahou a okolní zemínou. Jednotlivé modely počítají s konstantní zadanou teplotou na spodní hranici zeminy (θ_{dg}); konkrétní hloubka zeminy je závislá na specifické variantě modelu. Hodnota teploty v dostatečné hloubce vychází z průměrné roční teploty vnějšího vzduchu, která se v ČR pohybuje v rozmezí cca od 3 do 8°C (dle oblastí, resp. nadmořských výšek). Protože modely vycházejí z oblasti Colorado, U. S., tak se hodnota teploty zeminy použitá při výpočtech v jednotlivých variantách modelu od hodnoty používané v českých normách odlišuje. Dle české normy [46] se obvykle doporučuje pro výpočty použít hodnotu 5°C.

Tok tepla v jednotlivých variantách modelu ovlivňují zejména hodnoty SPT, a to jak na povrchu mezi podlahou a vnitřním klimatizovaným prostředím, tak i na styku zeminy s okolním vzduchem. Rozdíly v hodnotách parametrů jednotlivých variant modelu jsou zobrazeny v tabulce 9.2 a popsány v následujících podkapitolách.

Tab. 9.2: Nastavení odchylek jednotlivých parametrů variant modelu od výchozího nastavení

Druh testu		$a \times b^{2)}$	$G^{2)}$	$F^{2)}$	$h_{int}^{3)}$	$h_{ext}^{3)}$	$\lambda^{2)}$
Označení	Typ ¹⁾	[m]	[m]	[m]	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
GC10a	st.	Vých.	40	40	N. t.	N. t.	Vých.
GC30a	st.	Vých.	30	20	N. t.	N. t.	Vých.
GC30b	st.	Vých.	Vých.	Vých.	Vých.	Vých.	Vých.
GC30c	st.	Vých.	Vých.	8	7,95	N. t.	Vých.
GC40a	nest.	Vých.	30	20	N. t.	N. t.	Vých.
GC40b	nest.	Vých.	Vých.	Vých.	Vých.	Vých.	Vých.
GC40c	nest.	Vých.	15	8	7,95	N. t.	Vých.
GC45b	nest.	36x4	15	15	100	100	Vých.
GC45c	nest.	36x4	15	8	7,95	N. t.	Vých.
GC50b	nest.	80x80	Vých.	Vých.	Vých.	Vých.	Vých.
GC55b	nest.	Vých.	2	15	Vých.	Vých.	Vých.

<i>Druh testu</i>		$a \times b^{2)}$	$G^{2)}$	$F^{2)}$	$h_{int}^{3)}$	$h_{ext}^{3)}$	$\lambda^{2)}$
<i>Označení</i>	<i>Typ¹⁾</i>	[m]	[m]	[m]	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	[W.m ⁻² .K ⁻¹]	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
GC55c	nest.	Vých.	5	8	7,95	N. t.	Vých.
GC60b	st.	Vých.	Vých.	Vých.	7,95	Vých.	Vých.
GC65b	st.	Vých.	Vých.	Vých.	7,95	11,95	Vých.
GC70b	nest.	Vých.	Vých.	Vých.	7,95	11,95	Vých.
GC80b	nest.	Vých.	Vých.	Vých.	Vých.	Vých.	0,5
GC80c	nest.	Vých.	15	8	7,95	N. t.	0,85

1) St. – stacionární, Nest. – nestacionární

2) Vých. – výchozí parametr, tj. dle tabulky 9.1

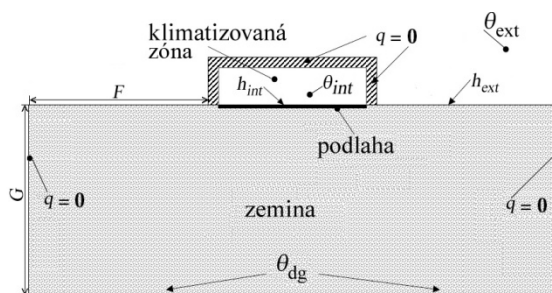
3) N. t. – nastavená teplota, tj. dle tabulky 9.1

Z prvního sloupce tabulky 9.2 je patrné, že varianty referenčního modelu použitého v úloze 34 se podle posledního znaku v označení dělí do tří skupin, a to na varianty:

- série “a”, která slouží k ověření základního nastavení modelů a simulačního rozhraní.
- série “b”, která slouží k porovnání změny parametrů jednotlivých modelů.
- série “c”, která má upravené okrajové podmínky tak, aby byly kompatibilní se simulačním rozhraním BASESIMP.

Modely ze série „a“ jsou oproti sériím „b“ a „c“ vypočteny jak numericky, tak i analyticky, a proto slouží k primárnímu ověření přesnosti simulačních nástrojů.

Schematický náčrt vytvořených modelů je zobrazen na obrázku 9.1. Rozměry nadzemní části jsou $a \times b$ s tloušťkou stěn d . Na okrajích zeminy se neuvažuje s výměnou tepla, protože se předpokládá symetrický přenos tepla okolní zeminou (adiabatická okrajová podmínka).



Obr. 9.1: Schematický náčrt geometrie jednotlivých variant modelu s vyznačenými okrajovými podmínkami [33]

9.1.1.1 Popis stacionárních variant modelu

Případ GC10a slouží k základnímu ověření přesnosti numerického simulačního programu, protože umožňuje srovnání výstupů ze simulace s analytickým řešením. Pro tento případ neplatí, na rozdíl od ostatních variant modelu, adiabatická okrajová podmínka pro nadzemní část modelu.

Modely GC30x se od předchozího případu odlišují rozměry zeminy a adiabatickou okrajovou podmínkou klimatizované zóny jak je popsána na obrázku 9.1. Případ GC30a využívá přímo zadané hodnoty teploty na površích podlahy a zeminy, zatímco modely GC30b a GC30c počítají přenos tepla na styku klimatizované zóny a podlahy, resp. mezi zeminou a okolním vzduchem s využitím okrajové podmínky třetího druhu.

Případ GC60b kombinuje při výpočtu přenosu tepla konvekcí SPT s reálnou ($7,95 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) a vysokou ($100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) hodnotou, zatímco případ GC65b počítá s reálnými hodnotami SPT jak na vnitřních ($7,95 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), tak i na vnějších ($11,95 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) površích.

9.1.1.2 Popis nestacionárních variant modelu

Nestacionární varianty referenčního modelu se vyznačují harmonickým průběhem modelové teploty okolního vzduchu v čase s krokem po jedné hodině. Změny reálné teploty vnější atmosféry dané veličinou θ_{ext} reflektují jak denní, tak i její sezónní průběh.

Jednotlivé modely ze skupiny případů GC40x se odlišují rozdílnými hodnotami SPT na vnitřním a vnějším povrchu zeminy.

Varianty modelu GC45x jsou jediné, které mají protáhlou geometrii místnosti, a přestože mají plochu podlahy shodnou s ostatními variantami modelu, tak mají o 66% zvětšený její obvod, což vede ke zvětšenému přenosu tepla mezi místností a zemínou.

Zvětšená velikost plochy podlahy v případě GC50b způsobuje ve srovnání s ostatními modely masivní přenos tepla, a proto hodnota toku tepla zobrazená na obrázku 9.3 tvoří pouze 10% vypočtené hodnoty.

Případy GC55x reprezentují oblasti s vysokou hladinou podzemní vody, což vede k vyšším tepelným ztrátám budovy. Hloubka zeminy je v těchto případech zmenšena na hodnotu 33% (případ GC55c) resp. 13% (případ GC55b) výchozích rozměrů.

Model GC70b oproti výchozím parametrům počítá s reálnou hodnotou SPT jak na vnitřním ($7,95 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), tak i vnějších površích ($11,95 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

Vliv zmenšené hodnoty tepelné vodivosti zeminy a podlahové desky je zkoumán v případech GC80x. Hodnoty tepelné vodivosti jsou zmenšeny na 26% ve variantě GC80b a 50% u varianty GC80c.

9.2 Porovnání výsledků

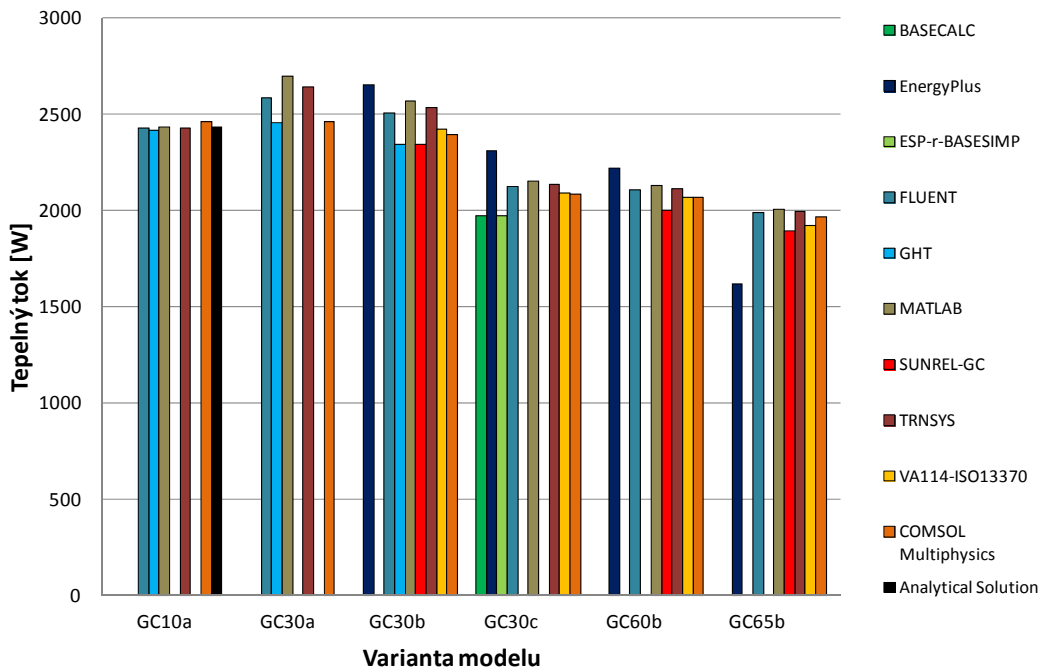
Pokud jde o hodnocení simulačních výsledků pomocí úlohy 34 představené v rámci metodiky BESTEST, je důležité upozornit, že případné rozdíly mezi výsledky (vypočtené teploty, SPT nebo toky tepla) získanými při použití různých modelovacích a simulačních nástrojů neznamenají, že jeden z nástrojů je „lepší“ a jiný „horší“. Možným závěrem je pouze tvrzení, že jsou-li výsledky poskytnuté několika nástroji obdobné, je pravděpodobnější, že vypočítané hodnoty jednotlivých parametrů odpovídají správným hodnotám.

Nejprve bylo přistoupeno k porovnání odchylek stacionárních modelů ve dvou verzích uvedeného simulačního nástroje, aby byla vyloučena chyba simulace daná aktuální verzí programu – konkrétně se jedná o CM ve verzi 3.5 a 4.1. Maximální odchylka mezi těmito verzemi použitého simulačního nástroje byla zjištěna s hodnotou 0,6% vypočtené hodnoty tepelného toku, a tudíž pro další simulace bude použita vždy pouze jedna verze

programu (verze 3.5). Starší verze programu je využívána z důvodu již vytvořených modelů pro analytické ověření programu v této verzi.

9.2.1 Porovnání výsledků stacionárních variant modelu

Porovnání výstupů stacionárních variant modelu z programu CM s devíti simulačními nástroji, které jsou v současné době úspěšně validovány pomocí představeného komparativního testu, je zobrazeno na obrázku 9.2. Jednotlivé sloupce na tomto obrázku představují vypočtený tepelný tok v ustáleném stavu mezi klimatizovanou zónou a zemínou s použitím příslušného nástroje. Spolu s tepelnými toky vypočtenými ve vybraných simulačních programech (ne ve všech validovaných programech bylo možno vytvořit všechny varianty modelu) je uveden také výsledek varianty GC10a vypočtený analyticky.



Obr. 9.2: Porovnání výsledků tepelných toků stacionárních variant modelu

Z důvodu problematického porovnání dílčích výsledků jednotlivých variant modelu z obrázku je v tabulce 9.3 zobrazeno statistické vyhodnocení výsledků stacionárních variant modelu. Jako míru neshody programu CM se skupinou validovaných

programů lze dále použít hodnotu ukazatele $\overline{\varepsilon_{rel}}$, což je střední hodnota z absolutních hodnot relativních odchylek toků tepla $\overline{\varepsilon_{rel}}$, (pravý krajní sloupeček tabulky 9.3). Střední hodnota absolutních hodnot relativních odchylek toků tepla pro stacionární varianty modelu vypočtená programem CM je $\overline{\varepsilon_{rel}} = 2,74\%$. Z jednotlivých zobrazených hodnot je patrné, že odchylky tepelného toku podlahou vypočítané programem CM jsou u čtyř ze šesti představených stacionárních variant modelu menší, než hodnota získaná jako průměr z hodnot tepelného toku vypočtená uvedenými validovanými programy. Největší odchylky vykazují varianty modelu označené GC30a (-5,23%), GC30b (-3,56%) a GC65b (3,34%). Zbylé varianty modelu byly vypočteny s absolutními hodnotami odchylek v intervalu 1,1 – 1,7%.

Tab. 9.3: Odchylky toku tepla vypočteného v programu CM od průměrné hodnoty vypočtené validovanými programy – stacionární případy

Varianta modelu	Tepelný tok vypočítaný programem CM [W]	Průměr tepelných toků vypočítaných validovanými programy ¹⁾ [W]	Odchylka	
			absolutní [W]	relativní ²⁾ [%]
GC10a	2459	2425	35	1,14
GC30a	2459	2595	-136	-5,23
GC30b	2392	2480	-88	-3,56
GC30c	2084	2109	-25	-1,18
GC60b	2069	2105	-36	-1,71
GC65b	1967	1903	64	3,34

1) Basecalc, EnergyPlus, ESP-r-Basesimp, Fluent, GHT, Matlab, Sunreal-GC, TRNSYS, VA114-ISO13370

2) Střední hodnota absolutních hodnot relativních odchylek toků tepla vypočtená programem CM $\overline{\varepsilon_{rel}} = 2,74\%$ (viz text)

V tabulce 9.4 jsou uvedeny hodnoty ukazatele $\overline{\varepsilon}_{rel}$ a jejich standardní odchylky současně pro program CM a ty z validovaných programů, v nichž byly vypočítány alespoň čtyři z představených šesti stacionárních variant modelu. Je patrné, že hodnota ukazatele odchylky $\overline{\varepsilon}_{rel}$ výsledků získaných při použití programu CM (tj. jeho neshoda) je mírně větší v porovnání s validovanými programy, které se k simulování tepelných pochodů v budovách používají už několik let (Fluent, TRNSYS), ale na druhou stranu výrazně menší než jakou vykazuje program EnergyPlus, úspěšně validovaný na podzim roku 2010 [67]. Z důvodu značného ovlivnění průměrné hodnoty jednotlivých odchylek validovaných programů programem EnergyPlus byla vypočtena v posledním řádku tabulky 9.4 tato hodnota také bez uvažování tohoto programu. Při srovnání odchylky programu CM s takto upravenou průměrnou hodnotou odchylky validovanými programy je třeba upozornit na skutečnost, že odchylka programu CM je vyšší než tato upravená střední hodnota, a proto výsledky stacionárních variant modelu vypočtené programem CM jsou spíše podprůměrné.

Tab. 9.4: Srovnání odchylek stacionárních variant modelu

Název	$\overline{\varepsilon}_{rel}$ [%]	Standardní odchylka $\overline{\varepsilon}_{rel}$ [%]
TRNSYS	1,75	1,52
Fluent	1,11	1,59
MATLAB	2,72	1,71
EnergyPlus	9,22	3,70
VA114-ISO13370	1,45	0,66
CM	2,74	1,44
Průměrná hodnota ¹⁾	3,17	1,77
Průměrná hodnota ²⁾	1,95	1,39

1) Přes všechny programy uvedené v tabulce

2) Přes všechny programy uvedené v tabulce kromě programu EnergyPlus

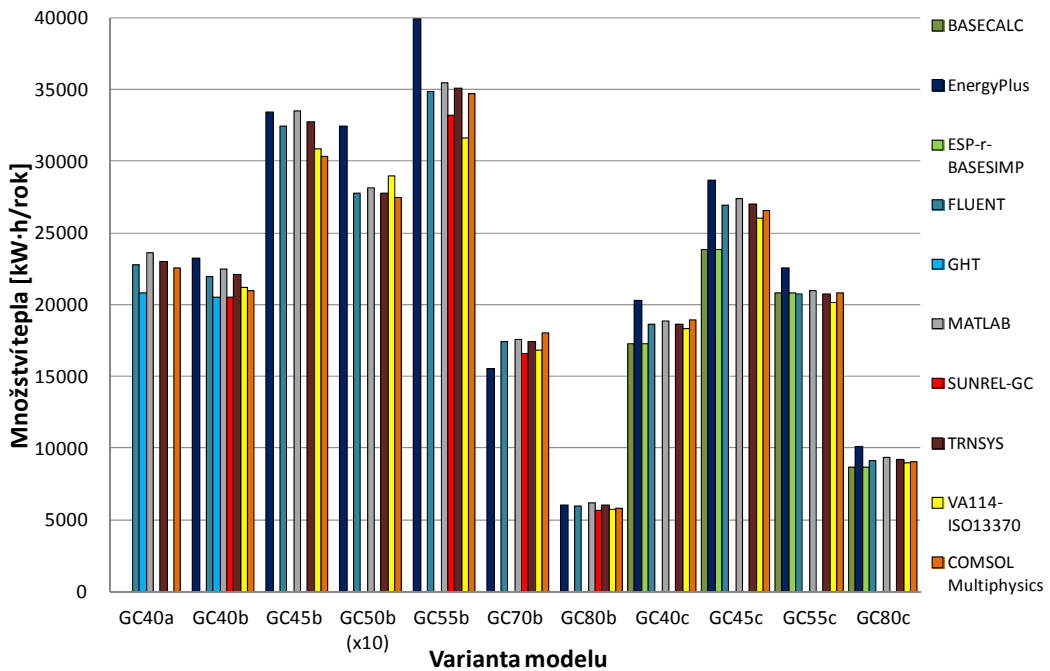
9.2.2 Porovnání výsledků nestacionárních variant modelu

Obdobně jako jsou výsledky získané výpočty stacionárních variant referenčního modelu zobrazeny na obrázku 9.2, jsou na obrázku 9.3 souhrnně zobrazeny výsledky výpočtů nestacionárních variant modelu získané při použití celkem deseti simulačních nástrojů (ověřovaný CM a devět simulačních nástrojů již validovaných úlohou 34 metodiky BESTEST).

Jednotlivé sloupce grafu na obrázku 9.3 představují množství tepla přeneseného mezi klimatizovanou zónou a zemínou během jednoho roku vypočtené jednotlivými simulačními programy. Výjimku tvoří sloupce reprezentující vypočtené hodnoty varianty modelu GC50b kde je zobrazeno pouze 10% takto vypočteného množství tepla z důvodu masivního přenosu tepla podlahou způsobeného její zvětšenou plochou v této variantě modelu. Naopak vypočtené množství přeneseného tepla u variant modelu GC80x je poměrně malé z důvodu snížené hodnoty tepelné vodivosti zeminy použité v těchto modelech.

Z obrázku je patrná zejména odchylka programu EnergyPlus u varianty GC55b. Hodnotící statistický pohled na výsledky nestacionárních variant modelu uvedené na obrázku 9.3 poskytují tabulky 9.5 a 9.6.

Jak je patrné z tabulky 9.5, jsou odchylky množství tepla přeneseného podlahou za rok vypočítané programem CM od průměru hodnot vypočtených validovanými programy opět převážně záporné. Jak u stacionárních, tak i u nestacionárních variant modelu je pouze přibližně 30% vypočtených variant modelu v programu CM s kladnými odchylkami. Absolutní hodnoty odchylek nestacionárních variant modelu ε_{rel} se pohybují v rozmezí od 0,13% do 3,83%. Největší odchylky ε_{rel} vykazují varianty modelu počítající na površích modelu s hodnotou SPT $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Jedná se zejména o varianty modelu GC40b, GC45b, GC50b a GC80b. V porovnání s průměrnou odchylkou stacionárních variant modelu je vypočtená průměrná odchylka nestacionárních variant modelu o 0,77 procentního bodu menší.



Obr. 9.3: Porovnání výsledků množství přeneseného tepla za jeden rok nestacionárních variant modelu

Tab. 9.5: Odchylky toku tepla vypočteného v programu CM od průměrné hodnoty vypočtené validovanými programy – nestacionární případy

Varianta modelu	Množství tepla vypočítané programem CM [kWh/rok]	Průměr hodnot množství tepla vypočítané validovanými programy ¹⁾ [kWh/rok]	Odchylka	
			absolutní [kWh/rok]	relativní ²⁾ [%]
GC40a	22584	22554	30	0,13
GC40b	20982	21711	-730	-3,36
GC45b	31657	32594	-937	-2,87

Varianta modelu	Množství tepla vypočítané programem CM [kWh/rok]	Průměr hodnot množství tepla vypočítané validovanými programy ¹⁾ [kWh/rok]	Odchylka	
			absolutní [kWh/rok]	relativní ²⁾ [%]
GC50b	279173	290302	-11129	-3,83
GC55b	34744	35031	-288	-0,82
GC70b	16510	16893	-383	-2,27
GC80b	5765	5928	-163	-2,75
GC40c	18922	18468	454	2,46
GC45c	26534	26249	285	1,08
GC55c	20822	20986	-164	-0,78
GC80c	9019	9136	-118	-1,29

1) Basecalc, EnergyPlus, ESP-r-Basesimp, Fluent, GHT, Matlab, Sunreal-GC, TRNSYS, VA114-ISO13370

2) Střední hodnota absolutních hodnot relativních odchylek toků tepla vypočtená programem CM $\overline{\varepsilon}_{|rel|} = 1,97\%$

Porovnání hodnot ukazatele $\overline{\varepsilon}_{rel}$ a jeho standardní odchylky současně pro program CM a ty z validovaných programů, v nichž bylo vypočítáno alespoň pět z představených jedenácti nestacionárních variant modelu, je zobrazeno v tabulce 9.6.

Střední hodnota ukazatele $\overline{\varepsilon}_{|rel|}$ programu CM (tj. jeho neshoda s průměrem) je v porovnání s programem Fluent opět větší, ale v celkovém porovnání třetí nejmenší. Z důvodu značného ovlivnění průměrné hodnoty odchylek validovaných programů programem EnergyPlus byla opět vypočtena v posledním řádku tabulky 9.6 tato hodnota také bez uvažování tohoto programu. Na rozdíl od stacionárních variant modelu je odchylka programu CM menší i při srovnání s takto upravenou střední hodnotou odchylky validovaných programů nestacionárních variant modelu.

Tab. 9.6: Srovnání odchylek nestacionárních variant modelu

Název	$\overline{\varepsilon_{ rel }}$ [%]	Standardní odchylka $\overline{\varepsilon_{ rel }}$ [%]
TRNSYS	1,73	1,20
Fluent	1,36	1,30
MATLAB	2,88	1,35
EnergyPlus	8,21	3,52
VA114-ISO13370	2,87	2,81
CM	1,97	1,15
Průměrná hodnota ¹⁾	3,17	1,89
Průměrná hodnota ²⁾	2,16	1,56

1) Přes všechny programy uvedené v tabulce

2) Přes všechny programy uvedené v tabulce kromě programu EnergyPlus

9.3 Závěr

Výsledky získané výpočtem šesti stacionárních a devíti nestacionárních variant referenčního modelu v programu CM byly porovnány s výsledky získanými výpočtem těchto úloh s využitím simulačních programů, které se k simulaci tepelných dějů v budovách používají a jsou validovány podle testu BESTEST.

Zjištěná podobnost výsledků ukazuje, že simulační program CM umožňuje dostatečně přesně určit hodnoty tepelného toku v budovách, přestože u výpočtů jednotlivých variant referenčního modelu je v porovnání s výsledky poskytovanými ostatními validovanými programy u něj patrná mírná systematická odchylka směrem k menším hodnotám tepelného toku.

V celkovém hodnocení stacionárních variant modelu dosahuje program CM velikosti odchylky programu MATLAB. Tato hodnota je ale přibližně dvojnásobná v porovnání s programem Fluent, a tak je ji třeba hodnotit jako podprůměrnou.

Průměrná odchylka programu CM nestacionárních variant modelu naopak dosahuje z porovnávaných programů třetího nejlepšího výsledku (na úrovni programu TRNSYS).

Souhrnným zhodnocením vypočtených variant modelu publikovaných v úloze 34 v rámci metodiky BESTEST je potvrzení schopností využití programu CM pro výpočet přenosu tepla v budovách. Validovaný program v tomto benchmarku dosáhl průměrné absolutní hodnoty odchylky 2,3%.

10 EXPERIMENTÁLNÍ VALIDACE POMOCÍ PROVEDENÉHO MĚŘENÍ

Veškeré simulace probíhaly na počítači se dvěma procesory – Intel Xeon (2.33 GHz, 2x6 MB L2 cache, čtyři-jádra) a 4 GB operační paměti – v programu CM verze 3.5. Průměrná doba běhu jedné simulace na tomto počítači trvala přibližně 930 s. Pro výpočet byl zvolen řešič PARDISO z důvodu schopností jeho programového jádra, které umožňuje rozdělit výpočet daného modelu na jednotlivá procesorová vlákna. Během jednotlivých simulací byl nastaven řešič tak, aby počítal s maximální hodnotou relativní odchylky místní chyby v řádu 10^{-3} a absolutní odchylky místní chyby v řádu 10^{-4} .

Při experimentech, které budou popsány v následujících podkapitolách, byly jako zdroje tepla použity přímotopy, u kterých byl měřen odběr elektrické energie, a tato hodnota byla při simulacích použita pro hodnoty vnitřního zdroje tepla.

10.1 Měření teploty v místnosti

Teplota byla v místnosti monitorována v desetiminutovém intervalu pomocí kulového teploměru (operativní teplota) a zároveň třech termočlánků typu K (NiCr-Ni, teplota vnitřního vzduchu), přičemž jednotlivé použité měřící sondy obsahovaly konektory s kompenzací studeného spoje. Měřené hodnoty byly automaticky zaznamenávány a ukládány pomocí měřící stanice Almemo 2390-8. Uvedená měřící technika pracovala s rozlišením $0,1^{\circ}\text{C}$ u termočládkových čidel resp. $0,01^{\circ}\text{C}$ u kulového teploměru. Tímto způsobem naměřená data byla následně přenesena a vyhodnocena v PC. Měřící technika byla kompletně použita od německého výrobce Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH.

Umístění kulového teploměru bylo přibližně uprostřed místnosti, aby nebyly naměřené hodnoty neúměrně ovlivněny teplotou jedné stěny dle doporučení ČSN normy [46] pro měření výsledné vnitřní teploty. Hlavní měření teploty probíhalo pomocí kulového teploměru umístěného na stativu, jehož poloha byla 1300 mm nad podlahou, 6000 mm od stěny sousedící s místností 54/308 a 5200 mm od stěny sousedící s chodbou. Na stativu byl kromě kulového teploměru umístěn i jeden termočládkový teploměr,

přičemž další dva tyto teploměry byly umístěny na dalších místech laboratoře (700 mm nad podlahou, 450 mm od stěny sousedící s místností 54/308 a 4500 mm od stěny sousedící s chodbou; 1800 mm nad podlahou, 8350 mm od stěny sousedící s místností 54/308 a 6860 mm od stěny sousedící s chodbou). Obrázky laboratoře a měřící aparatury jsou zobrazeny v příloze E.

10.2 Tvorba geometrie objektu

Provedené experimenty jsou založené na nestacionárním přenosu tepla a byly uskutečněny v laboratoři 54/307 Ústavu automatizace a řídicí techniky. Tato místnost se nachází ve třetím nadzemním podlaží a má vnitřní rozměry $7,2 \times 8,7 \times 3$ m.

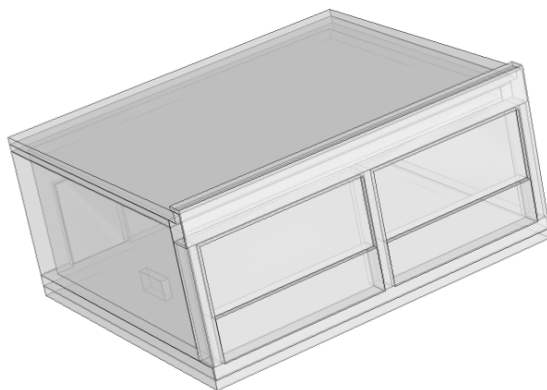
Prvním krokem tvorby modelu, na kterém budou porovnány simulační výsledky s hodnotami obdrženými měřeními, bylo vytvoření geometrie modelu laboratoře, která se nachází v nejvyšším patře jižního křídla budovy Fakulty Aplikované Informatiky (FAI).

Půdorysy laboratoře a jejího přilehlého okolí jsou zobrazeny na obrázku 10.1 (více obrázků je zobrazeno v příloze F). Protože se nejedná o rohovou místnost tak jsou vnějším prostředím přímo ovlivňovány pouze dva povrchy – vnější stěna a strop místnosti. Zbylé tři stěny a podlaha místnosti sousedí s okolními učebnami nebo chodbou. Největší vliv na vnitřní teplotu, tak má zejména vnější stěna obsahující rozměrná okna a v menší míře i strop. Okolní stěny, jak bude podrobněji vysvětleno níže, lze s dostatečnou přesností považovat za adiabatické hranice.

Vytvořená geometrie modelu laboratoře (při jejím kreslení se vycházelo ze stavebních výkresů budovy) je zobrazena na obrázku 10.2. Přestože lze v programovém prostředí CM nakreslit základní geometrické tvary, tak tvorba natolik komplikovaného třídimensionálního objektu nebyla v programu prakticky realizovatelná, a proto byla vytvořena v programu CATIA a do programu CM byla naimportována ve formátu .stp souboru.



Obr. 10.1: Okolí modelované laboratoře



Obr. 10.2: Geometrie modelu laboratoře

Při tvoření modelu nebylo uvažováno s tepelně-akumulačními vlastnostmi vnitřního vybavení laboratoře, nicméně se nepředpokládá, že by měly provedená měření významně ovlivnit. Vlastní ověření tohoto předpokladu bude provedeno pomocí sledování reakce vnitřní teploty na skokovou změnu hodnoty tepelného zisku místnosti.

10.3 Tvorba numerického modelu

Takto vytvořená geometrie modelu byla následně v programu CM doplněna o fyzikální rovnice popisující přenos tepla s příslušnými okrajovými a počátečními podmínkami. Okrajové podmínky jsou zadány pomocí funkcí, a umožňují tak variabilitu

těchto podmínek v čase (vhodné zejména u nestacionárních modelů pro nastavení proměnné hodnoty venkovní teploty).

Základní rovnice popisující přenos tepla v jednotlivých doménách má tvar PDR

$$\nabla(-\lambda \cdot \nabla T) + \rho \cdot c_p \cdot v \cdot \nabla T + \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \dot{Q}, \quad (41)$$

kde λ je tepelná vodivost, T je termodynamická teplota, ρ je hustota, c_p je měrná tepelná kapacita, v je rychlost, t je čas a \dot{Q} je výkon tepelného zdroje.

Jednotlivé fyzikální veličiny byly během jednotlivých simulací považovány za konstanty. Tento předpoklad je přijatelný z důvodu nepřiliš velkého teplotního rozdílu mezi jednotlivými částmi experimentu (minimální teplota 14°C a maximální 30°C).

Jednotlivé oblasti modelu popisuje výše uvedená rovnice 41. První část této rovnice popisuje vedení tepla, druhá část proudění tepla (tato část rovnice má nenulovou hodnotu pouze pro oblast vnitřního vzduchu), třetí člen rovnice popisuje tepelnou akumulaci a člen na pravé straně rovnice reprezentuje potenciální zdroj tepla.

Kromě výše uvedené rovnice je počítáno na jednotlivých hranicích modelu s paralelní kombinací přestupu tepla konvekcí a sáláním. Okrajové podmínky jednotlivých ploch na hranici jsou popsány buď rovnicemi popisujícími přenos tepla konvekcí uvedenými v kapitole 4.4 (zejména okrajové podmínky prvního a třetího druhu), sáláním nebo jejich vzájemnou kombinací. Přenos radiací je v programu CM implementován pomocí následující rovnice

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_o^4 - T^4), \quad (42)$$

kde \dot{Q} je tepelný tok, ε je emisivita, A je plocha, σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, T_o je teplota okolí a T je teplota sálajícího povrchu.

10.4 Ověření přesnosti modelu pomocí naměřených hodnot

Přesnost validovaného nástroje byla provedena vyhodnocením údajů získaných během dvou experimentů v letech 2010 a 2011. První experiment trval přibližně deset dní a sloužil zejména k ověření jednotlivých součástí tři-dimensionálního modelu a vyzkoušení

realizace podobného typu experimentu za běžného chodu okolních místností. Druhý experiment trval necelých devatenáct dní a sloužil již k vlastnímu ověření přesnosti použitého simulačního programu.

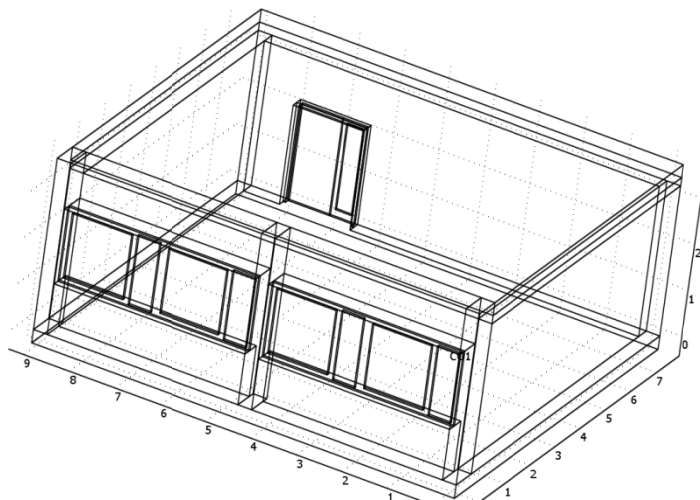
Během obou experimentů byla vypnuta deskové otopná tělesa a namísto nich byly pro ohřev vnitřního vzduchu místnosti použity elektrické přímotopy umístěné u protilehlých vnitřních zdí. Celkový tepelný výkon, který byl dle požadavků na průběh experimentu dodáván do místnosti, tak dosahoval až 5 kW .

Simulace probíhaly se sítí, která měla přibližně 51 000 DOF a průměrná délka jedné simulace trvala okolo 930 s. Kromě sítě s tímto počtem DOF byly samozřejmě vyzkoušeny také sítě s vyšší a menší hustotou. Na použité geometrii bylo problematické vytvoření sítě s menším počtem DOF než přibližně 16 000 (kritickým místem byly podle očekávání tenké vrstvy modelu). Naopak tvorba sítě s více DOF neměla smysl z důvodu významného nárůstu simulačního času, který ale měl pouze zanedbatelný účinek na změnu vypočtených hodnot tepelných toků jdoucích jednotlivými povrchy a teploty jednotlivých zón.

10.4.1 Popis prvního experimentu

Během prvního experimentu uskutečněného v únoru 2010 byla termočláanky monitorována teplota nejen v laboratoři, kde probíhalo hlavní měření, ale také v přilehlých prostorách – chodba, sousední učebna, kancelář a laboratoř umístěná o patro níže. Parametry venkovního prostředí byly zaznamenávány pomocí meteorologické stanice umístěné na střeše budovy FAI (<http://meteo.utb.cz/>).

Při tomto experimentu (resp. jeho simulacích) byla použita geometrie místnosti představená v práci [60], která je mírně odlišná od současného stavu a je zobrazena na obrázku 10.3.



Obr. 10.3: Geometrie modelu místnosti použita při prvním experimentu

Použitá geometrie laboratoře je zjednodušením skutečného stavu a neobsahuje tak prvky, které na vlastní tepelný tok mezi místností a jejím okolím nemají velký vliv jako např. parapety nebo vnitřní vybavení laboratoře. Kromě toho, že model neobsahuje toto vybavení, tak je v tomto modelu také zjednodušena konstrukce vnějších stěn a stropu, k čemuž bylo přistoupeno z důvodu problematické tvorby sítě v těchto částech modelu (resp. tvorby sítě s velkým množstvím DOF, což vedlo jednak časově náročným simulacím a také k velkým požadavkům na výkon počítače pro výpočet tohoto nestacionárního modelu). Vytvořený model tak neobsahuje tepelnou izolaci okolo železobetonových částí venkovní stěny, které díky jejich malé tloušťce (vůči celkovým rozměrům modelu místnosti) způsobovaly značné problémy při tvorbě sítě.

Model obsahoval tyto hlavní části: vnitřní stěnu, boční stěny, podlahu, strop (konstrukce, izolace), vnější stěnu (samotná vnější stěna pod okny, železobetonové pilíře), rámy oken a vlastní okna, nadokenní konstrukce, vnitřní vzduch místnosti. Rozměry a fyzikálně-tepelné vlastnosti použitých materiálů jednotlivých částí modelu jsou uvedeny v tabulce 10.1.

Tab. 10.1: Rozměry a materiálové vlastnosti částí geometrie modelu použité při numerickém výpočtu prvního experimentu

Část modelu	Tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	Hustota [$kg \cdot m^{-3}$]	Měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
Vnitřní stěny	0,27	900	960
Zárubně dveří	58	7850	440
Dveře	0,11	800	1500
Podlaha, konstrukce stropu, železobetonový pilíř	1,43	2300	1020
Izolace stropu	0,039	30	1270
Podokenní stěna	0,15	800	960
Rám okna	0,18	400	2510
Okno	0,76	2600	840
Nadokenní konstrukce	1,43	2300	1020
Vnitřní vzduch	0,025	1,17	1010

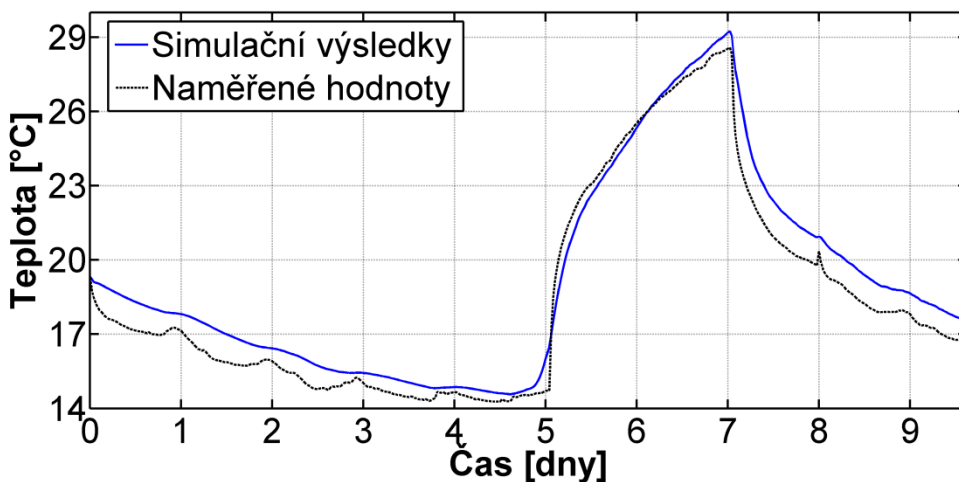
Jak bude blíže popsáno v následující kapitole, tak fyzikální model využívající tuto geometrii vykazoval významné odchylky od provedeného měření, a tak byla geometrie modelu pro druhý experiment upravena. Současně podoba je v porovnání s původní geometrií méně zjednodušenou variantou skutečného stavu objektu a vykazuje podstatně lepší shodu s naměřenými hodnotami, jak je ukázáno v kapitole 10.4.4.

10.4.2 Vyhodnocení dat získaných během prvního experimentu

Během experimentu se nejprve nechala místnost volně vychlázet z počáteční teploty přibližně 19°C na teplotu 14°C. Následně byly v místnosti zapnuty zdroje tepla,

kteře zapříčinily vzestup teploty až k hodnotě 29°C. Ve třetí fázi experimentu se nechala místnost opět volně vychlázdat.

Na obrázku 10.4 je zobrazeno porovnání průběhů teploty vnitřního vzduchu získané při experimentu a pomocí modelu v programu CM. Černou čárkovanou čarou jsou znázorněny naměřené hodnoty teploty v jednotlivých časových okamžicích pomocí kulového teploměru a modrou plnou čarou hodnoty teploty získané simulací (vybrané hodnoty měřených parametrů z prvního experimentu obsahuje příloha G).



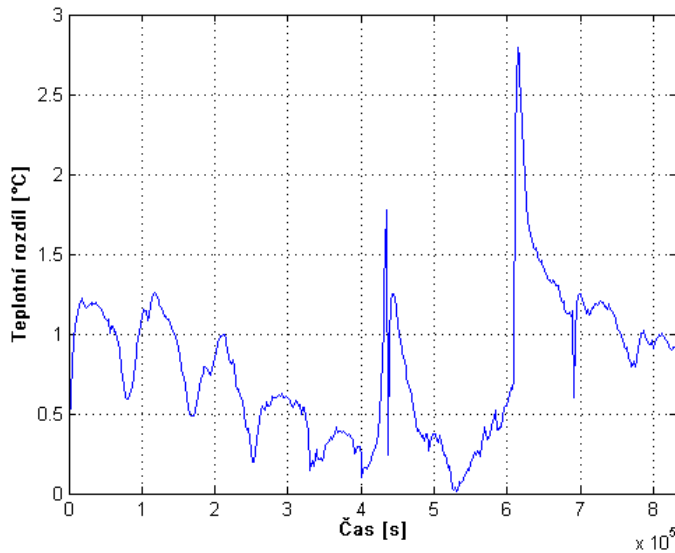
Obr. 10.4: Srovnání průběhů teploty vnitřního vzduchu při prvním experimentu

Z výše uvedeného obrázku je patrný rozdíl mezi oběma průběhy zejména v první a třetí části grafu. Oba zobrazené průběhy teploty mají stejný trend, ale hodnoty získané simulací jsou zjevně méně ovlivněny výkyvy vnějších podmínek. Průběh teploty získaný simulací je tak v porovnání s naměřenými hodnotami výrazně hladší a neobsahuje lokální výkyvy způsobené rozdílnou teplotou mezi dnem a nocí.

Při vytápění místnosti je patrná dobrá shoda mezi oběma průběhy. Protože skoková změna vnitřního zdroje tepla nevedla k významně rychlejší reakci vytvořeného numerického modelu, lze zjednodušující předpoklad o zanedbání tepelné kapacity vnitřního vybavení laboratoře považovat za správný.

Absolutní hodnoty odchylky teploty mezi naměřeným průběhem teploty a hodnotami získanými simulací je zobrazen na obrázku 10.5. Největší rozdíl mezi teplotami

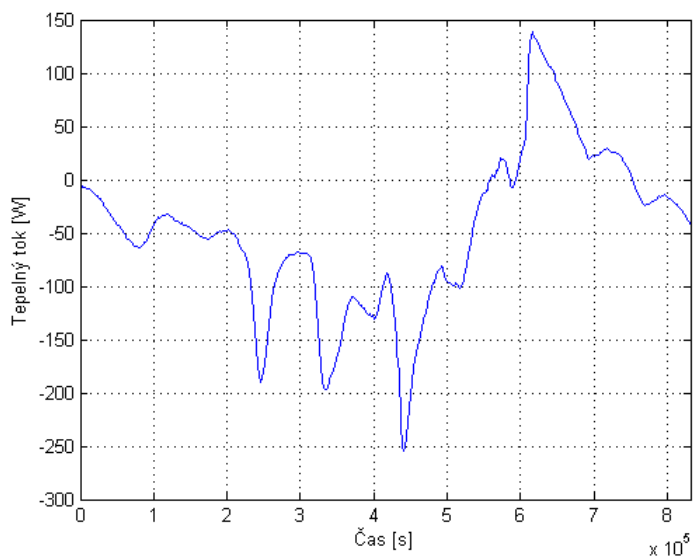
nastal na konci druhé části experimentu – maximální rozdíl mezi oběma průběhy teploty je $2,80^{\circ}\text{C}$, průměrný rozdíl je $0,79^{\circ}\text{C}$.



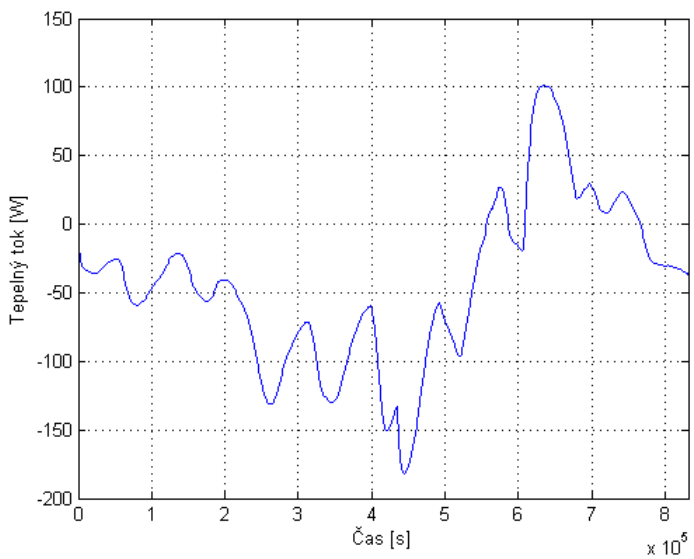
Obr. 10.5: Průběh absolutní hodnoty odchylky mezi teplotou naměřenou během prvního experimentu a získanou simulací

Značné hodnoty této odchylky vedly k následnému překreslení geometrie modelu do současné podoby.

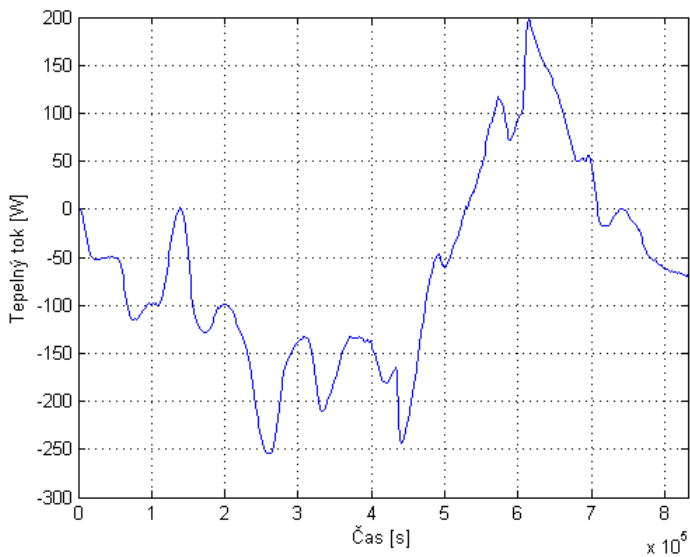
Před vlastním překreslením geometrie do současné podoby byla snaha o nalezení povrchů, které jsou nejvíce citlivé na přesnou tvorbu modelu. Jako ukazatel pro překreslení geometrie tak posloužily průběhy tepelných toků zobrazených na obrázcích 10.6-10.11 skrze jednotlivé stěny laboratoře. Dle očekávání jsou největší tepelné ztráty místnosti stropem a vnější stěnou. Kladné hodnoty v těchto obrázcích reprezentují tepelný tok jdoucí z místnosti do jejího okolí a naopak záporné hodnoty tepelný tok jdoucí do místnosti.



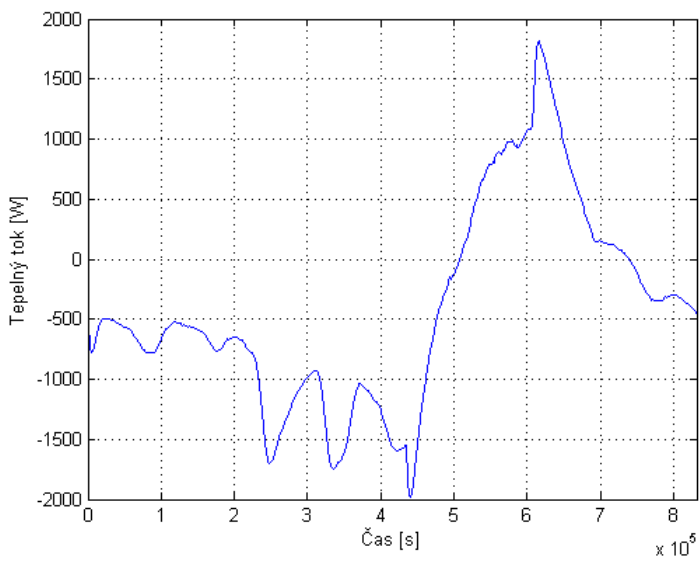
Obr. 10.6: Tepelný tok procházející stěnou sousedící s místností 54/306



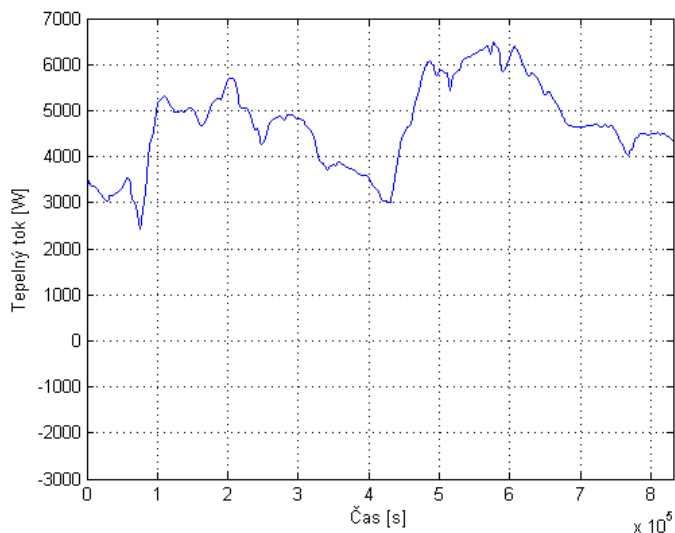
Obr. 10.7: Tepelný tok procházející stěnou sousedící s místností 54/308



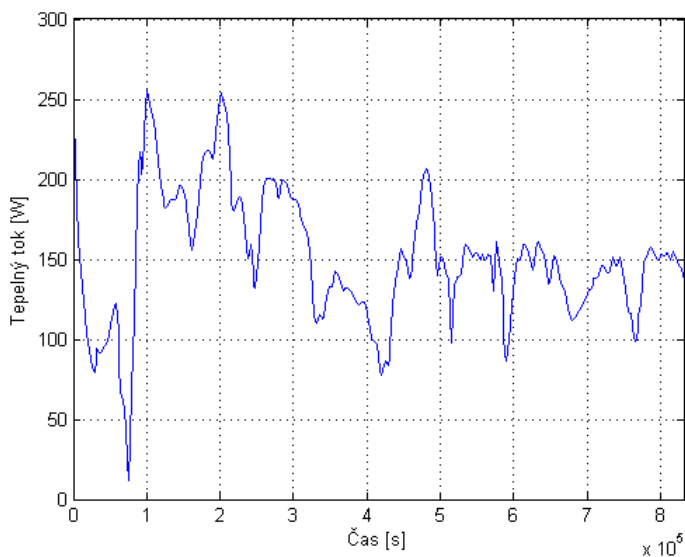
Obr. 10.8: Tepelný tok procházející stěnou sousedící s chodbou



Obr. 10.9: Tepelný tok procházející podlahou



Obr. 10.10: Tepelný tok procházející vnější stěnou



Obr. 10.11: Tepelný tok procházející stropem

Pro detailnější porovnání hodnot tepelných toků zobrazených v těchto obrázcích byla vytvořena tabulka 10.2, která podává souhrnný pohled na jednotlivé vypočtené hodnoty tepelné energie jdoucí přes vnitřní povrchy místnosti do jejího okolí (jedná se o výpočet integrálu tepelného toku přes jednotlivé časové okamžiky). Tepelná ztráta do okolních místností tvoří přibližně 17,5% celkových ztrát, přičemž téměř 14 procentních

bodů připadá na tepelný tok podlahou. Prvním poznatkem vyplývajícím z této tabulky je možnost zanedbání prostupu tepla do/z okolních vnitřních prostor kromě tepla prostupující podlahou. Tento závěr umožnil v následujícím experimentu umístit více termočlánků do měřené místnosti namísto monitorování teplot okolních vnitřních prostor. Druhým zjištěním je potřeba přesné tvorby modelu zejména v oblasti vnější stěny, přes kterou prochází 80% tepelných ztrát místnosti.

Tab. 10.2: Tepelná energie jdoucí přes jednotlivé povrchy místnosti

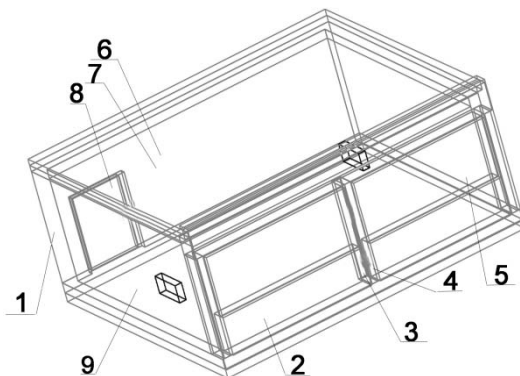
<i>Povrch</i>	<i>Tepelná energie</i> [J]	<i>Tepelná energie¹⁾</i> [%]	<i>Povrch</i>	<i>Tepelná energie</i> [J]	<i>Tepelná energie¹⁾</i> [%]
Vnější stěna	$3,928 \times 10^9$	79,94	Vnitřní stěna – 54/308	$5,07 \times 10^7$	1,03
Strop	$1,251 \times 10^8$	2,55	Vnitřní stěna – 54/306	$5,87 \times 10^7$	1,19
Podlaha	$6,673 \times 10^8$	13,58	Vnitřní stěna – chodba	$8,40 \times 10^7$	1,71

1) Poměr vlivu jednotlivých povrchů na celkový přenos tepelné energie mezi místností a jejím okolím

10.4.3 Popis druhého experimentu

Během druhého experimentu, který se uskutečnil na přelomu prosince 2010 a ledna 2011, byl cyklus vyzkoušený během předchozího pokusu opakován 4x. Díky tomu narostla celková doba trvání experimentu na téměř 19 dní. Pro fáze experimentu, ve kterých byla místnost zahřívána, byly použity rozdílné hodnoty výkonů vnitřního zdroje tepla, aby mohly být sledovány reakce místnosti a následně jejího modelu na rozdílné hodnoty počáteční teploty a skokové změny tohoto zdroje tepla. Jako zdroje tepla byly opět použity dva přímotopy umístěné u protilehlých vnitřních stěn, jejichž výkon byl v průběhu experimentu nastavován na hodnoty 0-5kW.

Geometrie modelu použitá u tohoto experimentu je zobrazena na obrázku 10.12. Oproti geometrii představené v předchozí kapitole došlo k několika změnám, a model se tak skládá dohromady z devatenácti oblastí, přičemž nejdůležitější části modelu jsou v obrázku vyznačeny čísly: vnitřní stěna (1), vnější stěna (2), železobetonový sloup (3), polystyrénová izolace (4), okno (5), stropní konstrukce složená z polystyrénové izolace (6) a betonu (7), dřevěné dveře (8) a betonová podlaha (9).

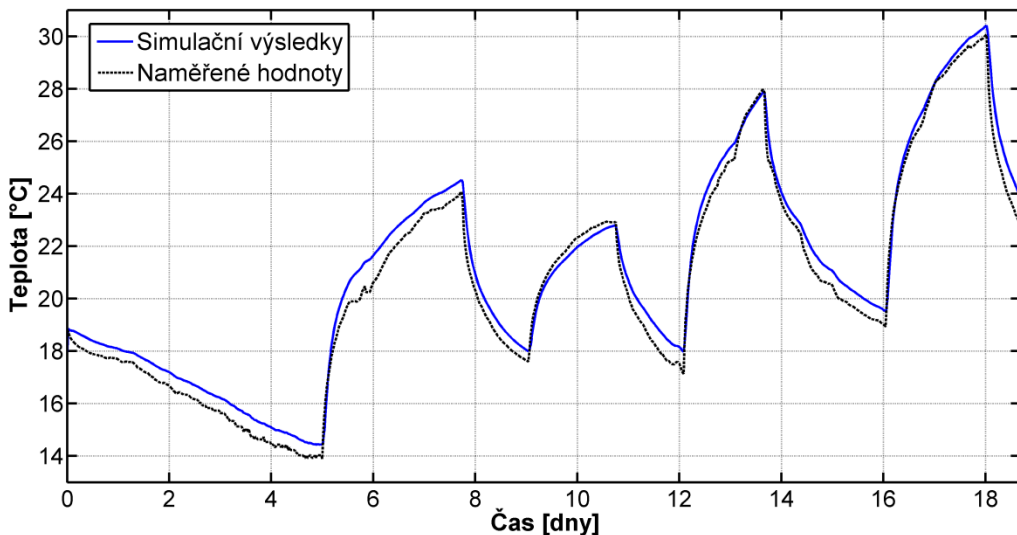


Obr. 10.12: Geometrie modelu místnosti použitá při druhém experimentu

10.4.4 Vyhodnocení dat získaných během druhého experimentu

Porovnání hodnot získaných simulací a měřeními vnitřní teploty místnosti během druhého experimentu je zobrazeno na obrázku 10.13. Černá čárkovaná čára reprezentuje naměřené hodnoty kulovým teploměrem, zatímco hodnoty získané simulací jsou zobrazeny plnou modrou čarou. Z průběhu hodnot teploty vnitřního vzduchu je zřejmé, že simulace je blízká naměřeným hodnotám opět zejména v těch částech experimentu, kdy byly zapnuty zdroje tepla. V jednotlivých oblastech grafu kde dochází k volnému vychládání místnosti, je průběh poklesu hodnoty vypočtený simulací rozdílný oproti naměřeným hodnotám. Na konci těchto fází nastávají největší hodnoty odchylek mezi těmito průběhy.

Vybrané hodnoty jednotlivých parametrů naměřených během tohoto experimentu obsahuje příloha H.



Obr. 10.13: Srovnání průběhů teploty vnitřního vzduchu při druhém experimentu (model počítal s konstantní hodnotou SPT na vnitřních površích)

Změnou geometrie modelu sice tak došlo k poklesu průměrné odchylky z hodnoty $0,79^{\circ}\text{C}$ na $0,65^{\circ}\text{C}$, ale tato hodnota je stále poměrně významná.

Detailním prozkoumáním jednotlivých parametrů modelu byla jako hlavní příčina odchylek těchto průběhů identifikována hodnota SPT. Tento model počítal s konstantní hodnotou SPT na vnitřních površích po celou dobu simulace. Přestože byla použita pro simulace hodnota SPT běžně uváděná v českých resp. evropských normách pro přenos tepla konvekci na svislých vnitřních površích tj. $2,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ viz příloha A, tak nesoulad mezi simulačními a naměřenými hodnotami je poměrně výrazný.

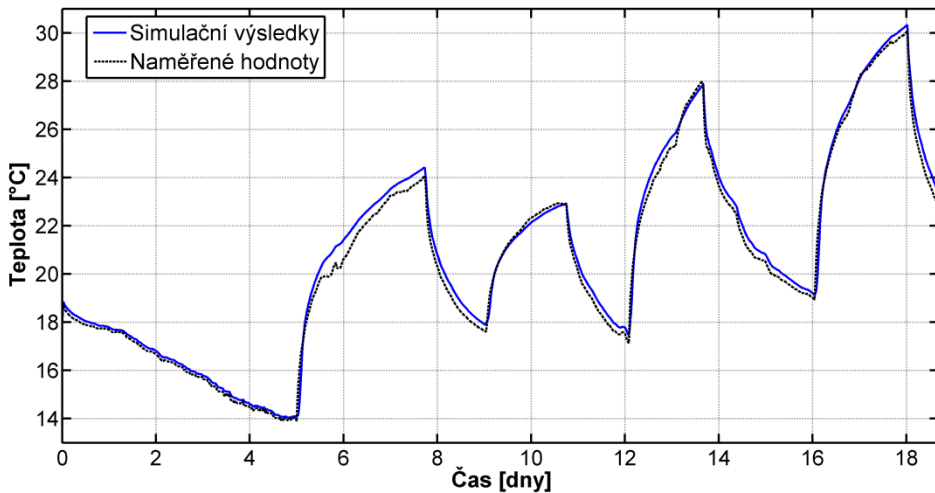
Vývoj této odchylky v závislosti na hodnotě SPT dokumentuje tabulka 10.3. Z průměrných vypočtených hodnot odchylek mezi simulací a měřením pro rozdílné hodnoty SPT je patrné, že pro její zvyšující se hodnotu klesá průměrná střední hodnota odchylky mezi naměřenými hodnotami a výstupy ze simulací.

Tab. 10.3: Statistické vyhodnocení rozdílů mezi simulací a měřením pro několik hodnot SPT

Konstantní hodnota SPT [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	Průměrná hodnota odchyly mezi simulací a měřením [$^{\circ}C$]	Maximální teplotní rozdíl mezi simulací a měřením [$^{\circ}C$]
2,5	0,65	1,91
8	0,53	1,77
16	0,45	1,53

Vysoká citlivost modelu na hodnotu SPT na povrchu vnější stěny a oken způsobená majoritním přenosem tepla z laboratoře do jejího okolí vedla k přepracování modelu do podoby, kdy se v jednotlivých simulačních krocích počítají hodnoty SPT podle aktuálních hodnot rozdílů teploty mezi vnitřním vzduchem a daným povrchem stěny. Takto počítané hodnoty SPT v jednotlivých okamžicích vykazují rozdíly zejména mezi jednotlivými hodnotami u stěn, které mají relativně malý tepelný odpor (velkou U-hodnotu), resp. velký teplotní rozdíl mezi svými povrchy.

Porovnání výsledků získaných simulací s výpočtem hodnoty SPT v jednotlivých simulačních krocích a měřením je zobrazeno na obrázku 10.14. V porovnání průběhů je patrný významný pozitivní vliv provedených úprav na shodnost modelu s provedeným měřením. Kromě patrné odchylky při prvním cyklu experimentu je simulační průběh dostatečně shodný s naměřenými hodnotami. Vliv na hodnotu průměrné odchylky mezi měřením a simulací měla tato úprava modelu vyšší než v případě změny geometrie modelu. Průměrná odchylka při výpočtu SPT v jednotlivých simulačních krocích je rovna $0,38^{\circ}C$. Během jednotlivých fází experimentu se hodnoty SPT pohybovaly v intervalu mezi $2 W.m^{-2}.K^{-1}$ až $4,5 W.m^{-2}.K^{-1}$, což potvrzuje informace nalezené v literatuře uvedené v kapitole 2 této práce.



Obr. 10.14: Srovnání průběhů teploty vnitřního vzduchu při druhém experimentu (model počítal s proměnnou hodnotou SPT na vnitřních površích)

10.5 Závěr

Naměřené hodnoty teploty byly porovnány s výsledky z numerických simulací provedených v programu CM. Protože nebylo dosaženo po vyhodnocení hodnot obdržených z prvního měření dostatečné přesnosti, tak byla následně upravena geometrie modelu. Tento krok vedl ke zkvalitnění shody mezi naměřenými hodnotami a simulačními výstupy, ale ve srovnání byly přítomny příliš velké odchylky. Dalším krokem tak byla úprava modelu založená na průběžném počítání hodnoty SPT na vnější stěně. Po této úpravě modelu již výstupy z programu CM vykazují dostatečnou shodu s naměřenými průběhy.

11 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Jak bylo uvedeno v teoretické části práce, simulační program CM se v současné době používá k výpočtu širokého spektra dějů. Proto bylo překvapujícím zjištěním, že program nebyl validován pomocí některého z mezinárodních benchmarků a následně, že měl problémy s výpočtem šíření tepla sáláním mezi jednotlivými vnitřními povrchy modelu místnosti, které nastaly u modelu z analytického benchmarku ASHRAE 10152-RP [33]. Problém s vytvořením několika modelů z tohoto benchmarku by měla odstranit nová verze programu, které by již měla umožňovat při tvorbě modelu zadávat funkční závislost veličin dle zeměpisné šířky, délky a aktuální data a času. Toto rozšíření funkčnosti programu by tak výrazně zmenšilo počet modelů, které nebylo v aktuální verzi programu možno vytvořit.

U komparativního testu nenastaly obdobné problémy s tvorbou modelů. U porovnání hodnot tepelného toku stacionárních i nestacionárních variant modelu vypočtených programem CM je patrné mírné podhodnocení vypočtených hodnot. Hodnota průměrné odchylky nestacionárních variant modelu je oproti hodnotám této odchylky získané ze stacionárních variant modelu vypočtena s chybou menší o 0,77 procentního bodu. CM nemá problémy s tvorbou jednotlivých variant modelu představených v tomto benchmarku jako některé validované programy, ale při porovnání výstupů s programem Fluent vykazuje vyšší střední hodnoty odchylek a celkově se řadí k průměru validovaných programů.

Při následném porovnání simulačních výstupů s naměřenými hodnotami prokázal CM svou přesnost také pomocí třídimensionálního modelu využívající přenosu tepla pomocí vedení, proudění a sálání. Při tvorbě modelu s konstantní hodnotou SPT uváděnou v ČSN je do modelu uměle vnesena chyba, která ve svém důsledku způsobí značnou odchylku od naměřených hodnot, a proto je u obdobných modelů třeba počítat hodnotu SPT v jednotlivých simulačních krocích. Částečně se tak potvrdila zjištění uvedená v literární rešerši jinými autory, kdy hodnota SPT v některých částech simulace výrazně převyšuje hodnotu běžně doporučovanou pro tyto výpočty.

Validovaný program se může svými výsledky srovnávat s programy používanými pro výpočet tepelného chování budov již několik let, nicméně jeho výsledky jsou zatíženy mírně větší nejistotou. Výhodou tohoto softwaru je ale možnost tvorby modelů zahrnující i další fyzikální děje (stejně jako některých dalších programů) a také možnost zapojení těchto modelů jako řízených soustav do regulačních obvodů a následným využitím řízení parametrů modelu.

12 PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Provedená validace programu CM v předchozích kapitolách potvrdila přesnost výsledků simulačního programu, který je v současné době využíván jako program pro numerické výpočty. Apriorní domněnku, kterou předpokládali autoři využívající tento program, bylo nicméně třeba ověřit obvyklými validačními kroky.

Tato práce je ukázkou propojení práce v akademickém prostředí s řešením aktuálního problému vyskytujícím se v technické praxi. Dílčí výsledky této práce lze rozdělit do několika úrovní. Na základní úrovni se jedná o splnění dílčí cílů reprezentovaných analytickým testem ASHRAE 1052-RP, porovnáním výsledků programu CM s dalšími devíti simulačními programy pomocí úlohy 34 metodiky BESTEST a také porovnání průběhů hodnot teploty získaných experimentálně se simulačními výstupy. Následným souhrnným zhodnocením odchylek jednotlivých modelů představených v této práci, lze vyvodit tvrzení o úspěšné validaci programu CM.

Význam disertační práce pro rozvoj vědního oboru je tak především v podložení možnosti budoucího dalšího rozšiřování využití programu CM. Pro budoucí rozvoj technické praxe se jeví jako přínosné navázání na téma této disertační práce a využití možnosti propojení programu CM s programem pro simulaci řízení procesů. Tato spolupráce by umožnila ještě širší uplatnění programu CM a zdůraznila důležitost kooperace mezi programy pro modelování a řízení procesů.

Publikované dílčí výsledky v recenzovaných časopisech i na zahraničních konferencích (ale i obdobné kroky provedeného autory při validaci programu EnergyPlus) naznačují, že podobné snahy jsou aktuálním trendem, který vede k efektivnějšímu využití stávajících energetických zdrojů.

13 ZÁVĚR

Disertační práce se v předchozích kapitolách zabývala ověřením možnosti využití simulačního programu CM pro modelování tepelných pochodů v budovách. Tento program proto byl použit k tvorbě dílčích kroků doporučených pro validaci simulačních programů. Prvním je porovnání výsledků numerických modelů s analytickým řešením, druhým krokem je vzájemné porovnání hodnot vypočtenými vícero simulačními programy a ve třetím kroku došlo k ověření přesnosti tohoto programu porovnáním vypočtených a naměřených hodnot.

Následující podkapitoly obsahují informace o plnění jednotlivých cílů disertační práce dle jejich struktury vytyčených v kapitole 3.

13.1 Teoretický a analytický rozbor dané problematiky

První cíl disertační práce byl splněn v jednotlivých kapitolách teoretické části, kde je postupně popsána problematika přenosu tepla v budovách, vhodnost využití simulačních programů v této oblasti a ukázka numerického výpočtu DR.

13.2 Analytická verifikace – porovnání výsledků modelů získaných analytickým a numerickým výpočtem

Druhý cíl disertační práce je obsažen v kapitole 8. V tomto kroku jsou odvozeny rovnice pro dva případy nestacionárního přenosu tepla a poté porovnány výstupy z programu CM s osmi modely představenými v publikaci ASHRAE 1052-RP [33]. Výsledky z programu CM jsou tak porovnány jak s analytickým řešením, tak i s hodnotami vypočtenými programem EnergyPlus, ve kterém byly modely představené v tomto benchmarku vytvořeny na podzim roku 2011 [67].

Představené modely v tomto benchmarku byly většinou vypočteny s dostatečnou přesností. Z analytického srovnání lze vyvodit, že testy založené na přenosu tepla vedením, prouděním nebo radiací mezi oblohou a střechou budovy lze počítat v programu CM s vysokou mírou přesnosti. Modely počítající sálání mezi jednotlivými vnitřními povrchy místnosti vykazují rozdíly od hodnot vypočtených analyticky.

13.3 Komparativní test – porovnání hodnot vypočtených několika simulačními programy

Kapitola 9 se zabývá třetím cílem disertační práce. Program CM je v této kapitole použit k výpočtu stacionárních a nestacionárních variant referenčního modelu přenosu tepla v budovách představených v rámci porovnávacího testu popsaného v úloze 34 [34] publikovaných IEA v rámci metodiky BESTEST. Výsledky získané pro šest stacionárních a jedenáct nestacionárních variant referenčního modelu byly porovnány s výsledky získanými výpočtem shodných úloh při použití simulačních programů, které se k simulaci tepelných dějů v budovách používají a jsou validovány podle metodiky BESTEST.

Zjištěná hodnoty jednotlivých výsledků dokazují, že simulační program CM umožňuje dostatečně přesně určit hodnoty tepelného toku v budovách, přestože je z výsledků patrné mírné podhodnocení výsledků jednotlivých variant modelu. Při porovnání programu CM s výsledky poskytovanými validovanými programy se řadí hlediska velikosti vypočtené odchylky mezi průměrné programy. Na rozdíl od některých již validovaných simulačních programů však umožňuje modelovat všechny varianty modelu obsažené v úloze 34 [34].

13.4 Experimentální validace – porovnání naměřených hodnot průběhů teploty s numerickým modelem

Poslední validační krok je popsán v kapitole 10, kde jsou porovnány naměřené hodnoty teploty s výsledky získanými z numerických simulací provedených v programu CM. Celkově byly provedeny dva experimenty, kde první sloužil k ověření dílčích schopností simulačního programu a realizovatelnosti podobných experimentů, zatímco naměřené hodnoty z druhého měření slouží k vlastní validaci programu.

Po vyhodnocení průběhů získaných z druhého experimentu se jako citlivý parametr mající vliv na shodu simulačních výstupů s měřením jeví hodnota SPT na vnitřních površích. Pro dosažení dostatečné shody musí být hodnota tohoto součinitele počítána v jednotlivých simulačních krocích, aby tak byly zohledněny aktuální podmínky. Po této úpravě modelu dosahuje průměrné odchylka mezi simulačními výstupy a naměřenými průběhy teploty hodnotu $0,38^{\circ}\text{C}$.

13.5 Zhodnocení schopností simulačního softwaru

Kapitola 11 obsahuje souhrnné vyhodnocení možností tvorby modelů validovaného simulačního programu. V této kapitole jsou shrnuty výhody tohoto programu, ale je v ní také upozorněno na problematické situace, které při jednotlivých validačních krocích nastaly.

14 PUBLIKAČNÍ AKTIVITY

Vztahující se k tématu disertační práce

Časopisy:

- I. GERLICH, Vladimír a Martin ZÁLEŠÁK. Ověření hodnověrnosti programu Comsol Multiphysics pro výpočty přenosu tepla v budovách. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. Praha: FCC Public, 2012, roč. 18, č. 4, s. 24-27. ISSN 1210-9592.
- II. GERLICH, Vladimír, Michal OPLUSTIL, Radim PISAN a Martin ZALESÁK. Benchmark of COMSOL Multiphysics via in-depth floor slab test - Transient cases. *Energy Procedia*. 2012, vol. 14, 744-749. ISSN 1876-6102. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.12.1005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610211044250>.
- III. GERLICH, Vladimír. Influence of Radiative Heat Transfer to Room Temperature. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research* [online]. 2011, roč. 1(č. 2), 125-127 [cit. 2012-02-02]. Dostupné z: <http://www.magnanimitas.cz/ADALTA/0102/>. ISSN 1804-7890.
- IV. ZÁLEŠÁK, Martin; GERLICH, Vladimír. Využití softwarových nástrojů pro simulaci tepelných dějů. *Jemná mechanika a optika*. 2011, 56, 10, s. 285-287. ISSN 0447-6441.
- V. GERLICH, Vladimír. Aplikace simulačních metod pro zjištění tepelného chování systémů v budovách – 3. část. *Posterus : Portál pre odborné publikovanie* [online]. 2011, roč. 4, č. 7, [cit. 2011-07-19]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=11122>. ISSN 1338-0087.
- VI. GERLICH, Vladimír. Aplikace simulačních metod pro zjištění tepelného chování systémů v budovách – 2. část. *Posterus : Portál pre odborné publikovanie* [online]. 2011, roč. 4, č. 7, [cit. 2011-07-19]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=11112>. ISSN 1338-0087.
- VII. GERLICH, Vladimír. Aplikace simulačních metod pro zjištění tepelného chování systémů v budovách – 1. část. *Posterus : Portál pre odborné publikovanie* [online]. 2011, roč. 4, č. 7, [cit. 2011-07-11]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=11055>. ISSN 1338-0087.

Konference:

- VIII. GERLICH, Vladimír; ZALESÁK, Martin. Elementary benchmark of COMSOL Multiphysics: analytical model verification. In KATALINIC, Branko. *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings : of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity"*.

Vienna : DAAAM International Vienna, 2011. s. 679-680. ISBN 1726-9679, ISSN 978-3-901509-83-4.

- IX. GERLICH, Vladimír; PISAN, Radim; ZALESK, Martin. Benchmark of COMSOL Multiphysics: analytical via in-depth floor slab test - stationary cases. In KATALINIC, Branko. *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings : of the 22nd International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Power of Knowledge and Creativity"*. Vienna : DAAAM International Vienna, 2011. s. 681-682. ISBN 1726-9679, ISSN 978-3-901509-83-4.
- X. GERLICH, Vladimír. Modelling of Heat Transfer in Buildings. In *Proceedings of 25th European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2011*. [s.l.] : [s.n.], 2011. s. 244. ISBN 978-0-9564944-2-9.
- XI. GERLICH, Vladimír. Validation Heat Transfer Model by Experimental Measurement. In *Proceedings of 12th International Carpathian Control Conference*. [s.l.] : [s.n.], 2011. ISBN 978-1-61284-359-9.
- XII. GERLICH, Vladimír. Influence on room temperature by radiative heat transfer. *Sborník příspěvků z mezinárodní vědecké konference QUAERE 2011 : interdisciplinární mezinárodní vědecká konference doktorandů*. Hradec Králové : [s.n.], 2011.
- XIII. GERLICH, Vladimír; PROCHÁZKA, Michal. Introduction to model creation with new graphical interface of COMSOL Multiphysics. *Sborník příspěvků z mezinárodní vědecké konference Internet, Competitiveness and Organizational Security: Process Management and the Use of Modern Technologies*. Zlín : [s.n.], 2011. s.371. ISBN 978-80-7454-012-7.
- XIV. ZÁLEŠÁK, Martin; GERLICH, Vladimír. Modelling and Experimental Validation Possibilities of Heat Transfer Room Model. *Proceedings of the COMSOL Conference 2010 Paris*. [s.l.] : [s.n.], 2010. ISBN 978-0-9825697-7-1.
- XV. GERLICH, Vladimír; ZÁLEŠÁK, Martin. Experimental Validation of Heat Transfer Model. *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium*. Published by DAAAM International, Vienna, Austria 2010. : [s.n.], ISBN 978-3-901509-73-5, ISSN 1726-9679.
- XVI. ZÁLEŠÁK, Martin; GERLICH, Vladimír; ŠIŠÁK, Jiří. Creation and validation of romm model based in heat transfer process. *Proceedings of XXXVth. Seminary ASR '10 "Instruments and Control"*. Ostrava : VŠB - Technical university Ostrava, 2010. s. 421. ISBN 978-80-248-2191-7.
- XVII. GERLICH, Vladimír; PROCHÁZKA, Michal. Influence on room temperature by heat transfer from surrounding areas. *Sborník příspěvků z mezinárodní vědecké konference MMK 2010 : Mezinárodní Masarykova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky*. Hradec Králové : [s.n.], 2010. s. 1380. ISBN 978-80-86703-41-1, ETTN 042-10-10003-11-4.
- XVIII. GERLICH, Vladimír. Creation of a room model based on heat transfer phenomenon. *Mezinárodní Bařova konference : pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky*. [s.l.] : [s.n.], 2010. s. 111. ISBN 978-80-7318-922-8.

- XIX. GERLICH, Vladimír. Physical phenomena in the view of multiphysics simulation tools. In *Internet, bezpečnost a konkurenceschopnost organizací : Řízení procesů a využití moderních terminálových technologií*. [s.l.] : [s.n.], 2010. s. 145-148. ISBN 978-83-61645-16-0.

Ostatní publikace autora

- XX. PROCHÁZKA, Michal, et al. Optimization of neural network inputs by feature selection methods. In *Proceedings of 25th European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2011*. [s.l.] : [s.n.], 2011. s. 619. ISBN 978-0-9564944-2-9.
- XXI. LKHAGVANSEREN, Tumenbayar; GERLICH, Vladimír; HRUSKA, Frantisek. Aspects of Wireless Communication of Sensors. In *Proceedings of 12th International Carpathian Control Conference*. [s.l.] : [s.n.], 2011. ISBN 978-1-61284-359-9.

Publikace v recenzním řízení

- XXII. GERLICH, Vladimír a Martin ZALESÁK. COMSOL Multiphysics validation with ASHRAE 1052-RP toolkit. In: *Mendel 2012: 87 th international conference on soft computing : evolutionay computation, genetic programming, fuzzy logic, rough sets, neural networks fractals bayesian methods*. Brno: University of Technology, 2012, s. 6.
- XXIII. GERLICH, Vladimír, Katerina SULOVSKA a Martin ZALESÁK. COMSOL Multiphysics validation as simulation software for heat transfer calculation in buildings. *Measurement: journal of the International Measurement Confederation*. ISSN 0263-2241.

15 LITERATURA

- [1] *Study on the Energy Savings Potentials in EU Member States, Candidate Countries and EEA Countries* [online]. Final version. 2009 [cit. 2011-11-21]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/energy/efficiency/studies/doc/2009_03_15_esd_efficiency_potentials_final_report.pdf.
- [2] JUDKOFF, R. a J. NEYMARK. *International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method: Technical Report NREL/TP-472-6231* [online]. Golden, 1995 [cit. 2011-10-01]. Dostupné z: <http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/6231.pdf>.
- [3] HEIM, Dariusz, Isothermal storage of solar energy in building construction. *Renewable Energy*. 2010, 35, 788–796. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.09.005>.
- [4] PIOT, Amandine, Monika WOLOSZYN, Jean BRAU a Charlotte ABELE. Experimental wooden frame house for the validation of whole building heat and moisture transfer numerical models. *Energy and Buildings*. 2011, 43, 6, 1322-1328. ISSN 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.01.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S037877881100017X>
- [5] EMMEL, Marcelo G., Marc O. ABADIE a Nathan MENDES. New external convective heat transfer coefficient correlations for isolated low-rise buildings. *Energy and Buildings*. 2007, 39, 3, 335-342. ISSN 0378-7788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.08.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778806001976>
- [6] LIU, Yanfeng, Dengjia WANG a Jiaping LIU. Study on heat transfer process for in-slab heating floor, Building and Environment. *Building and Environment*. 2012, 54, 36, 77-85. ISSN 0360-1323. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.007>. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132312000467>
- [7] EMMERICH Steven J., Brian POLIDORO, James W. AXLEY, Impact of adaptive thermal comfort on climatic suitability of natural ventilation in office buildings, *Energy and Buildings*. 2011, 43, 2101–2107. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.016>
- [8] BRAHME, Rohini, Zheng O'NEILL, William SISSON a Kevin OTTO. Using existing whole building energy tools for designing net-zero energy buildings – challenges and workaroundsUNDS. In: *Building simulation 2009*. Glasgow, 2009, s. 9-16.
- [9] PAN, Yiqun, Mingming ZUO a Gang WU. Whole building energy simulation and energy saving potential analysis of a large public building. In: *Building simulation 2009*. Glasgow, 2009, s. 129-136.

- [10] CÓSTOLA, Daniel, Bert BLOCKEN a Jan HENSEN. External coupling between bes and ham programs for whole-building simulation. In: *Building simulation 2009*. Glasgow, 2009, s. 316-323.
- [11] PETRONE, G.; G. Fichera; M. Scionti. Thermal and Fluid-dynamical Optimisation of Passengers Comfort in a Touring Bus Cabin. In . *Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover*. [s.l.] : [s.n.], 2008. s.
- [12] THOMAS, S.; P-Y. Franck; P. André. Optimization of Dynamic Embedded, Water Based Surface Heat (and Cold) Emitting System for Buildings. In . *Proceedings of the COMSOL Conference 2009 Milan*. [s.l.] : [s.n.], 2009. s.
- [13] RUIZ-REINA, E.; M. Sidrach-de-Cardona; P. André. Simulation of the Convective Heat Transfer and Working Temperature Field of a Photovoltaic Module using COMSOL Multiphysics. In . *Proceedings of the COMSOL Conference 2009 Milan*. [s.l.] : [s.n.], 2009. s.
- [14] DEVILLE-CAVELLIN, C.. A Heat Transfer Model for Ugitech's Continuous Casting Machine. In . *Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover*. [s.l.] : [s.n.], 2008. s.
- [15] CHEBIL, S., N. GALANIS a R. ZMEUREANU. Computer simulation of thermal impact of air infiltration through multilayered exterior walls. In: *Building simulation 2003*. Eindhoven: Organizing Committee Building Simulation 2003, 2003, s. 155-162. ISBN 9038615663. http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03_0155_162.pdf.
- [16] HUANGA, Zhiheng, Paul P. CONWAY, Rachel C. THOMSON, Alan T. DINSDALE a Jim A. J. ROBINSON. A computational interface for thermodynamic calculations software MTDATA. *Calphad*. 2008, 32(1), 129–134. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.calphad.2007.07.003>.
- [17] SCHIJNDEL, Jos van. Integrated Modeling using MatLab, *Simulink and COMSOL: with heat, air and moisture applications for building physics and systems*. 2008. Saarbrucken: VDM Verlag Dr. Muller Aktiengesellschaft & Co. KG., 197 p. ISBN 978-3-639-10669-5.
- [18] TARIKU, Fitsum, Kumar KUMARAN a Paul FAZIO. Integrated analysis of whole building heat, air and moisture transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010, 53(15-16), 3111–3120. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.001>.
- [19] TARIKU, Fitsum, Kumar KUMARAN a Paul FAZIO. Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010, 53(15-16), 3035-3044. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.001>.
- [20] KOU, X.Y., G.T. PARKS a S.T. TANA. Optimal design of functionally graded materials using a procedural model and particle swarm optimization. *Computer-Aided Design*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2011.10.007>.

- [21] CARDIFF, Michael a Peter K. KITANIDIS. Efficient solution of nonlinear, underdetermined inverse problems with a generalized PDE model. *Computers & Geosciences*. 2008(34), 1480–1491. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2008.01.013>.
- [22] WISSMEIER, Laurin a David A. BARRY. Simulation tool for variably saturated flow with comprehensive geochemical reactions in two- and three-dimensional domains. *Environmental Modelling & Software*. 2011, 26(2), 210-218. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.07.005>.
- [23] WISSMEIER, Laurin, David A. BARRY a Ian R. PHILLIPS. Predictive hydrogeochemical modelling of bauxite residue sand in field conditions. *Journal of Hazardous Materials*. 2011, 191(1–3), 306-324. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.04.078>.
- [24] RAJU, Mandhapati a Sudarshan KUMAR. System simulation modeling and heat transfer in sodium alanate based hydrogen storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011, 36(2), 1578–1591. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.10.100>.
- [25] CHANDLER, David, G. Ivan MALDONADO, R.T. PRIMM III a J.D. FREELS. Neutronics modeling of the High Flux Isotope Reactor using COMSOL. *0306-4549*. 2011, 38(11), 2594–2605. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2011.06.002>.
- [26] SCHUSS, Matthias, Claus PRÖGLHÖF, Kristina OREHOUNIG, Sokol DERVISHI, Mario MÜLLER, Heinz WASCHER a Ardeshir MAHDAVI. Predictive model-based control of ventilation, lighting, and shading systems in an office building. *IbpaNEWS*. 2010, 20(2), 24-31.
- [27] IRVING, S. J. Energy program validation: conclusions of IEA Annex I. *Computer-aided design*. 1982, 14, s. 33-38.
- [28] WALLENTÉN, P. Convective heat transfer coefficients in a full-scale room with and without furniture. *Building and Environment*. 2001, 36, s. 743–751. ISSN 0360-1323.
- [29] BEASOLEIL-MORRISON, Ian. Flow responsive modelling of internal surface convection. In *Building Simulation : Seventh International IBPSA Conference*. Rio de Janeiro : [s.n.], 2001. s. 923-930.
- [30] BEASOLEIL-MORRISON, Ian. The adaptive simulation of convective heat transfer at internal building surfaces. *Building and Environment*. 2002, 37, s. 791 – 806. ISSN 0360-1323.
- [31] KHALIFA, Abdul-Jabbar N. Natural convective heat transfer coefficient - a review I. Isolated vertical and horizontal surfaces. *Energy Conversion and Management*. 2001, 42, s. 491-504. ISSN 0196-8904.
- [32] KHALIFA, Abdul-Jabbar N. Natural convective heat transfer coefficient - a review II. Surfaces in two- and three-dimensional enclosures. *Energy Conversion and Management*. 2001, 42, s. 505-517. ISSN 0196-8904.

- [33] SPITLER, Jeffrey D., Simon J. REES a Xiao DONGYI. Development of an analytical verification test suite for whole building energy simulation programs - building fabric: ASHRAE 1052-RP. [online]. 2001, s. 482 [cit. 2012-04-05]. Dostupné z: <http://rp.ashrae.biz/page/rp-1052.pdf>.
- [34] NEYMARK, J; R. JUDKOFF. *International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method (IEA BESTEST) In-Depth Diagnostic Cases for Ground Coupled Heat Transfer Related to Slab-On-Grade Construction*. In Technical Report NREL/TP-550-43388 [online]. Golden : [s.l.] : [s.n.], 2008 [cit. 2011-10-01]. Dostupné z: http://www.iea-shc.org/publications/downloads/task34-Building_Energy_Simulation_Test.pdf.
- [35] JUDKOFF, R a J NEYMARK. Model Validation and Testing: The Methodological Foundation of ASHRAE Standard 140. [online]. 2006 [cit. 2012-03-22]. Dostupné z: <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/40360.pdf>.
- [36] ÇENGEL, Yunus A. *Heat and mass transfer : a practical approach*. Boston : McGraw-Hill, 2007. 901 s. ISBN 0073129305.
- [37] COULSON, J. M.; J. F. Richardson. *Chemical Engineering*. vol. 1. 4th edition. Pergamon Press. 1990.
- [38] LIENHARD IV, John H.; John H. LIENHARD V. *A heat transfer textbook*. 4th edition. Cambridge : Phlogiston Press, 2003. 749 s.
- [39] KOLOMAZNÍK, Karel; Jaroslav SEDLÁŘ; Alena MACHÁČKOVÁ. *Teorie technologických procesů III*. první. Brno : Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1978. 139 s. ISBN 55-588-78.
- [40] HEJZLAR, Radko. *Sdílení tepla*. 3. Praha : ČVUT, 1999. 186 s. ISBN 80-01-01982-9.
- [41] DAVIES, Morris Grenfell. *Building heat transfer*. Chichester: John Wiley, 2004, 500 s. ISBN 04-708-4731-X.
- [42] CARSLAW, H a J. C. JAEGER. *Conduction of Heat in Solids*. 2 ed. Oxford: Clarendon Press, 1959, 510 s. ISBN 01-985-3368-3.
- [43] ČSN EN ISO 13792. *Tepelné chování budov : Výpočet vnitřních teplot v místnosti v letním období bez strojního chlazení - Zjednodušené metody*. Praha : Český normalizační institut, 2005. 49 s.
- [44] ČSN 73 0540-1. *Tepelná ochrana budov - Část 1: Terminologie*. Praha : Český normalizační institut, 2005. 68 s.
- [45] ČSN 73 0540-2. *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Praha : Český normalizační institut, 2007. 44 s.
- [46] ČSN 73 0540-3. *Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Praha : Český normalizační institut, 2005. 96 s.
- [47] ČSN 73 0540-4. *Tepelná ochrana budov - Část 4: Výpočtové metody*. Praha : Český normalizační institut, 2005. 60 s.

- [48] ČSN EN ISO 6946. *Stavební prvky a stavební konstrukce - Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla - Výpočtová metoda*. Praha : Český normalizační institut, 2007. 27 s.
- [49] ČSN EN ISO 13788. *Tepelně vlhkostní chování stavebních dílců a stavebních prvků - Vnitřní povrchová teplota pro vyloučení kritické povrchové vlhkosti a kondenzace uvnitř konstrukce - Výpočtové metody*. Praha : Český normalizační institut, 2002. 38 s.
- [50] ČSN EN 15265. *Energetická náročnost budov - Výpočet potřeby tepla na vytápění a chlazení dynamickými metodami – Obecná kritéria a ověřovací postupy*. Praha : Český normalizační institut, 2008. 68 s.
- [51] ČSN EN 12831. *Tepelné soustavy v budovách : Výpočet tepelného výkonu*. Praha : Český normalizační institut, 2005. 73 s.
- [52] ČSN 06 0220. *Tepelné soustavy v budovách – Dynamické stavy*. Praha : Český normalizační institut, 2006. 20 s.
- [53] ČSN EN ISO 13790. *Energetická náročnost budov - Výpočet spotřeby energie na vytápění a chlazení*. Praha : Český normalizační institut, 2006. 140 s.
- [54] ŘEHÁNEK, Jaroslav. *Tepelná akumulace budov*. 1. vydání. Praha : Informační centrum České komory autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 2002. 280 s. ISBN 80-86364-59-3.
- [55] SCHELLEN, H.L.; A. W. M. van SCHIJNDEL; P. M. BRIGGEN. The use of COMSOL for Building Constructions Engineering regarding Heat and Moisture Transport. In . *Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Hannover*. [s.l.] : [s.n.], 2008. s.
- [56] VOGEL, Petr, et al. Rozdělení spotřeby tepla na vytápění na příkladu panelového domu. *TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. 22.11.2010, [cit. 2011-02-15]. Dostupný z WWW: <<http://stavba.tzb-info.cz/regenerace-bytovych-domu/6952-rozdeleni-spotreby-tepla-na-vytapeni-na-prikladu-paneloveho-domu>>. ISSN 1801-4399.
- [57] SCHIJNDEL, A.W.M. van, et al. Application of an integrated indoor climate, HVAC and showcase. *Energy and Buildings*. 2008, 40, s. 647–653.
- [58] VITÁSEK, Emil. *Numerické metody*. Praha : SNTL, 1987. 516 s. ISBN 04-009-87.
- [59] BABICA, Vladimír. *Ověření simulační metody ESP-r v rámci laboratoře Inteligentní budovy* [online]. [s.l.], 2007. 109 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Zálešák, CSc.
- [60] ŠIŠÁK, Jiří. *Počítačová simulace a modelování výseku objektu pomocí programu FEMLAB*. [s.l.], 2006. 97 s. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Zálešák, CSc.

- [61] MINISTR, Jakub. *Optimalizace elektrického ohřevu výměn*. Zlín, 2008. 62 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.
- [62] VICHER, Miroslav. *Numerická matematika*. 2003. Dostupné z: http://physics.ujep.cz/~mlisal/nm_1/vicher_nm1.pdf.
- [63] MÍKA, Stanislav, Petr PŘIKRYL a Marek BRANDNER. *Speciální numerické metody: numerické metody řešení okrajových úloh pro diferenciální rovnice*. 1. vyd. Plzeň: Vydavatelský servis, 2006, 305 s. Texty z aplikované matematiky. ISBN 80-868-4313-0. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~mika/SNM2/SNM2.pdf>
- [64] ČERNÁ, Růžena, Miroslav MACHALICKÝ, Jiří VOGEL a Čeněk ZLATNÍK. *Základy numerické matematiky a programování*. Praha: SNTL, 1987, 144 s. ISBN 04-003-87.
- [65] REES, Simon J., Dongyi XIAO a Jeffrey D. SPITLER. An Analytical Verification Test Suite for Building Fabric Models in Whole Building Energy Simulation Programs. In: *ASHRAE Transactions.: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.* Atlanta, 202, s. 30-41. ISSN 0001-2505. Dostupné z: http://www.hvac.okstate.edu/research/Documents/Rees_Xiao_Spitler_02.pdf.
- [66] ČSN EN ISO 13370. *Tepelné chování budov - Přenos tepla zeminou - Výpočtové metody*. Praha, 2007, 42 s.
- [67] HENNINGER, R. H.; M. J. WITTE: *EnergyPlus Testing with IEA BESTEST In-Depth Ground Coupled Heat Transfer Tests Related to Slab-on-Grade Construction* [online]. Arlington Heights: [s. n.], 2010 [cit. 2011-10-03]. Dostupné z: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/energyplus_slab-on-grade_tests.pdf.
- [68] ZMRHAL, Vladimír. *Tepelný komfort a energetická bilance systému s chladicím stropem*. Praha, 2005. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze Fakulta strojní. Vedoucí práce Prof. Ing. František Drkal, CSc.
- [69] ŠESTÁK, J., F. RIEGER. *Přenos hybnosti tepla a hmoty*. 1996. Vydavatelství CVUT, Praha. ISBN 80-01-00957-2
- [70] NOŽICKA, J. *Sdílení tepla*. 1998, Vydavatelství CVUT, Praha. ISBN 80-01-01599-8.
- [71] AWBI, H.B. Calculation of convective heat transfer coefficients of room surfaces for natural convection. *Energy and Buildings*, 1998, c. 28, s. 219-227.
- [72] CALAY, R.K.; A. E. HOLDO; G. P. HAMMOND. Natural convective heat transfer rates in rectangular enclosures. *Energy and Buildings*, 1998, 27, s. 137 – 146.
- [73] ALAMDARI, F. Displacement ventilation and cooled ceilings. In *Proceedings of Roomvent 98*, Stockholm 1998, s. 197-204.
- [74] WONG, H. Y. *Heat Transfer for Engineers*. 1977. Longman Group Ltd., New York ISBN 0-582-46050-6.

- [75] SAZIMA a kol. *Sdílení tepla*. 1993, Praha, SNTL. ISBN 04-203-92.
- [76] BEJAN, A. *Convection heat transfer*. 1995, New York: Wiley. ISBN 0-471-57972-6.
- [77] KAYS, W.M.; M. E. CRAWFORD. *Convective Heat and Mass Transfer*. 3. vydání, 1993, McGraw – Hill, New York, ISBN 0-07-033721-7.
- [78] HATTON, A.; H. B. AWBI. Convective Heat Transfer in Rooms. In *Proceedings of Roomvent 96*, 1996, Yokohama, Japan, Vol. 2, pp. 395-402.
- [79] CIHELKA, J., a kol. *Vytápění a větrání*. 1969, Praha: SNTL. ISBN 04-216-75.
- [80] FANGER, P.O. Thermal comfort – Analysis and applications in environmental engineering. 1972, Kingsport Press, Inc. ISBN 07-019915-9.
- [81] BAŠTA, J. *Intenzifikace konvekční složky tepelného výkonu deskových otopných těles*. Disertační práce, Praha 2000. CVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [82] ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals, 2001, ASHRAE, Atlanta. ISBN - 1-883413-87-7
- [83] AWBI, H.B.; A. HATTON. Mixed convection from heated room surfaces. *Energy and Buildings*, 2000, c. 32, s.153 – 166.
- [84] KITAMURA, K.; F. KIMURA. Heat Transfer and Fluid Flow of Natural Convection Adjacent to Upward-facing Horizontal Plates, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 1995, c.38, s. 3149-3159.
- [85] KHALIFA, A.J.N.; R. H. MARSHALL. Validation of Heat Transfer Coefficients on Interior Building Surfaces Using a Real-sized Indoor Test Cell, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 1990, 33, s. 2219-2236.
- [86] ZWEIFEL, G. Simulation of displacement ventilation and radiation cooling with DOE2. In *ASHRAE Transactions*, 1993, vol. 99 (2), pp. 548-555.

16 ŽIVOTOPIS AUTORA

Osobní informace

Jméno	Gerlich Vladimír
Adresa	Česká 4749, 760 05 Zlín Česká republika
Telefon	+420 734 681 112
E-mail	vgerlich@gmail.com
Národnost	česká
Datum narození	14. 11. 1983

Pracovní zkušenosti

Období	2011-dosud
Povolání nebo vykonávaná funkce	Výzkumný projektový pracovník
Hlavní pracovní náplň a oblasti odpovědnosti	Člen týmu „Aplikace inženýrské informatiky“ výzkumného směru „Inteligentní budovy“
Název/jméno a adresa zaměstnavatele	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín
Období	2009-2012
Povolání nebo vykonávaná funkce	Lektor
Hlavní pracovní náplň a oblasti odpovědnosti	Zabezpečení výuky předmětů „Technologie budov“ a „Základy výpočetní techniky“
Název/jméno a adresa zaměstnavatele	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín
Období	2008-2009
Povolání nebo vykonávaná funkce	Analytik - programátor
Hlavní pracovní náplň a oblasti	Eliminace proudových šumů způsobených zaváděním moderních typů návěstidel

odpovědnosti	
Název/jméno a adresa zaměstnavatele	CROSS Zlín, Louky 397, 763 02 Zlín
Období	2005-2008
Povolání nebo vykonávaná funkce	Informační pracovník
Hlavní pracovní náplň a oblasti odpovědnosti	Správa počítačové učebny, katalogizace nových knih
Název/jméno a adresa zaměstnavatele	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Knihovna, nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín

Vzdělání a kurzy

Období	2008-dosud
Dosažená kvalifikace	
Hlavní předměty / profesní dovednosti	Simulace tepelných dějů v budovách, Technické zařízení budov
Název a typ organizace	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky
Období	2003-2008
Dosažená kvalifikace	Inženýr / Ing.
Hlavní předměty / profesní dovednosti	Automatizace a řídicí technika, Modelování technologických procesů
Název a typ organizace	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky
Období	1999-2003
Dosažená kvalifikace	Maturita
Hlavní předměty / profesní dovednosti	Technické lyceum
Název a typ organizace	Střední průmyslová škola Zlín

Osobní schopnosti a dovednosti

Období	2006-dosud
Název a typ organizace	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta aplikované informatiky

Člen akademického senátu Fakulty aplikované informatiky

Mateřský jazyk

Čeština

Cizí jazyk

Evropská úroveň

Angličtina

Porozumění		Mluvení		Psaní
Poslech	Čtení	Ústní interakce	Samostatný ústní projev	Písemný projev
C1	B2	B2	B2	B2

Sociální schopnosti a dovednosti

Svědomitost. Zájem o nové znalosti a zkušenosti.
Týmová spolupráce. Samostatnost.

Počítačové dovednosti

Pokročilý uživatel programů Microsoft Office, nástroje pro numerické modelování COMSOL Multiphysics, středně pokročilé znalosti programového prostředí MATLAB, XHTML, CSS, PHP, MySQL

Řidičský průkaz

B

Zájmy

Sport (floorball, bruslení), čtení knih a sběratelství

17 PŘÍLOHY

Příloha A: Určení hodnoty SPT dle ČSN

Příloha B: Hodnoty SPT a Nusseltova čísla dle různých literárních zdrojů [68]

Příloha C: Možnosti tvorby multifyzikálních simulací vybraných programů

Příloha D: Ukázka numerického řešení rovnice vedení tepla

Příloha E: Obrázky laboratoře a měřicí aparatury

Příloha F: Schéma laboratoře a přilehlých prostor

Příloha G: Vybrané hodnoty měřených parametrů při prvním experimentu

Příloha H: Vybrané hodnoty měřených parametrů při druhém experimentu

Příloha A: Určení hodnoty SPT dle ČSN

Tabulka 17.1 obsahuje souhrn hodnot SPT, jak je pro různé povrchy definují jednotlivé české (a mezinárodní) technické normy. Pro vnitřní povrchy je obvykle uváděn SPT s hodnotou $7,7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ bez rozlišení jestli se jedná o povrchy vodorovné nebo svislé a $25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pro povrchy vnější.

Kromě hodnot uvedených v tabulce na příslušném řádku je v ČSN 73 0540-3 [46] navíc ještě uvedena hodnota SPT pro vnitřní vodorovné povrchy $10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a pro kouty $5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

ČSN EN ISO 6946 [48] kromě hodnot uvedených v tabulce ještě rozlišuje hodnoty SPT pro vodorovné vnitřní povrchy. Pro směr tepelného toku nahoru je uváděna hodnota $10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a pro směr dolů $5,9 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

ČSN EN ISO 13 788 [49] rozlišuje na vnitřních površích hodnoty pro zasklení a rámy, kde doporučuje počítat s hodnotou $7,7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a pro ostatní povrchy s hodnotou $4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

ČSN EN 15 265 [50] uvádí pro SPT hodnoty dané součtem konvektivní a radiační složky. V tomto případě se uvádí hodnota součinitele pro dlouhovlnné sálání $5,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (stejná hodnota platí pro vnitřní i vnější povrchy) u povrchů s teplotou přibližně 27°C a emisivitou blízkou hodnotě 0,9. Hodnota SPT prouděním je uváděna $2,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ pro vnitřní povrchy, které neslouží k vytápění či chlazení. Povrchy chladících nebo otopných zařízení jsou rozděleny na svislé s hodnotou $2,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a vodorovné s hodnotami $5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (tepelný tok vzhůru) a $0,7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (tepelný tok dolů). U vnějších povrchů je uvažována hodnota $17,5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ bez rozlišení zda se jedná o vodorovný nebo svislý povrch.

ČSN EN 12 831 [51] se s hodnotou odporu přestupu tepla na svislých i vodorovných konstrukcích odvolává na mezinárodní normu [48] a používá tudíž stejné hodnoty.

Tab. 17.1: Hodnota SPT na vnitřních a vnějších površích konstrukcí

Zdroj		SPT na vnitřních površích [W.m ⁻² .K ⁻¹]	SPT na vnějších površích [W.m ⁻² .K ⁻¹]
ČSN 73 0540-3 [46]	Zimní období	7,7	25
	Letní období	7,7	14,3
ČSN EN ISO 6946 [48]		Svislý povrch: 7,7 Tepelný tok vzhůru: 10 Tepelný tok dolů: 5,9	25
ČSN EN ISO 13 788 [49]		Zasklení a rámy: 7,7	25
		Ostatní povrchy: 4	
ČSN EN 15 265 [50]		8	23
ČSN EN 12 831 [51]		viz [48]	viz [48]

Příloha B: Hodnoty SPT a Nusseltova čísla dle různých literárních zdrojů [68]

Tab. 17.2: Vztahy pro výpočet Nusseltova čísla pro volné proudění podél svislé stěny

<i>Autor</i>	<i>Nusseltovo číslo</i> ¹⁾ [-]	<i>Platnost</i> ¹⁾	<i>Typ proudění</i> ²⁾	<i>Zdroj</i>
Šesták	$0,59Ra^{0,25}$	$10^4 < Ra < 10^9$	L	[69]
Šesták, Bailey	$0,1Ra^{0,33}$	$10^9 < Ra < 10^{13}$	T	[69]
Nožička	$0,54Ra^{0,25}$	$5 \cdot 10^2 < Ra < 10^7$	L	[70]
Nožička	$0,135Ra^{0,33}$	$2 \cdot 10^7 < Ra < 10^{14}$	T	[70]
Awbi	$0,289Gr^{0,293}$	$9 \cdot 10^8 < Gr < 6 \cdot 10^{10}$, $Pr = 0,72$	T	[71]
CIBSE (Sugawara)	$0,48Gr^{0,25}$	$Gr < 10^9$	L	[72]
ASHRAE	$0,56Ra^{0,25}$	$10^4 < Ra < 10^8$	L	[73]
ASHRAE (Jacob)	$0,13Ra^{0,33}$	$10^8 < Ra < 10^{12}$	T	[73]
Wong	$0,8Ra^{0,25} \left[\left(1 + \frac{1}{Pr^{0,5}} \right)^2 \right]^{-0,25}$	$10^4 < Ra < 10^9$	L	[74]
Wong	$0,0246Ra^{0,4} \left[\frac{Pr^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + 0,494Pr^{\frac{2}{3}} \right)} \right]^{0,4}$	$Ra > 10$	T	[74]
Alamdari, Hammond	$[(0,55Gr^{0,25})^6 + (0,095Gr^{0,33})^6]^{0,17}$	$10^8 < Gr < 10^{10}$	T	[74]
Sazima	$0,76(GrPr)^{0,25} (Pr/Pr_s)^{0,25}$	$10^3 < Ra < 10^9$	L	[75]

<i>Autor</i>	<i>Nusseltovo číslo¹⁾</i> [-]	<i>Platnost¹⁾</i>	<i>Typ proudění²⁾</i>	<i>Zdroj</i>
		$0,72 < Pr < 3 \cdot 10^3$		
Sazima	$0,15(GrPr)^{0,33}(Pr/Pr_s)^{0,25}$	$Ra > 6 \cdot 10^{10}$	T	[75]
Bejan	$(0,825 + 0,325Ra^{1/6})^2$	$10^{-1} < Ra < 10^{12}$	L,T	[76]
Churchil, Chu	$\frac{0,15Ra^{0,33}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16}\right]^{16}}$	$Ra < 10$	T	[77]
Vliet, Ross	$0,0942Ra^{0,33}$	$10^9 < Ra < 10^{13}$	T	[77]

1) $Gr = \frac{g\beta(\theta_s - \theta)d^3}{\nu^2}$, $Ra = Gr \cdot Pr$ ($Pr = 0,72$ pro vzduch), Vztažná teplota $(\theta_s + \theta)/2$

2) písmeno L – laminární a T – turbulentní proudění

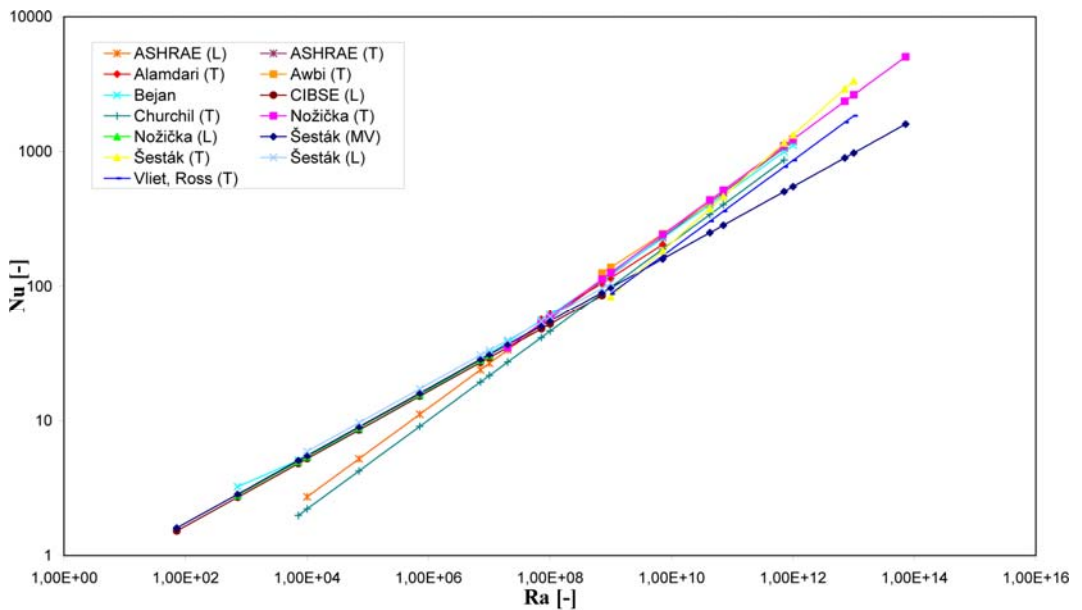
Tab. 17.3: Vztahy pro výpočet SPT konvekci podél svislé stěny

<i>Autor</i>	<i>SPT</i> [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	<i>Platnost¹⁾</i>	<i>Typ proudění²⁾</i>	<i>Zdroj</i>
Hatton, Awbi	$0,667 \Delta\theta^{0,289}$	$Ra < 10^9$ $5 < \Delta\theta < 25$	L	[78]
Hatton, Awbi	$1,49 \Delta\theta^{0,343}$	$Ra < 10^9$ $5 < \Delta\theta < 25$	T	[78]
Khalifa, Marschall	$2,07\Delta\theta^{0,23}$	-	T	[31]
Michejev	$1,55\Delta\theta^{0,33}$	-	T	[79]
King	$1,51\Delta\theta^{0,33}$	-	T	[79]
Nusselt	$2,56\Delta\theta^{0,25}$	-	T	[79]

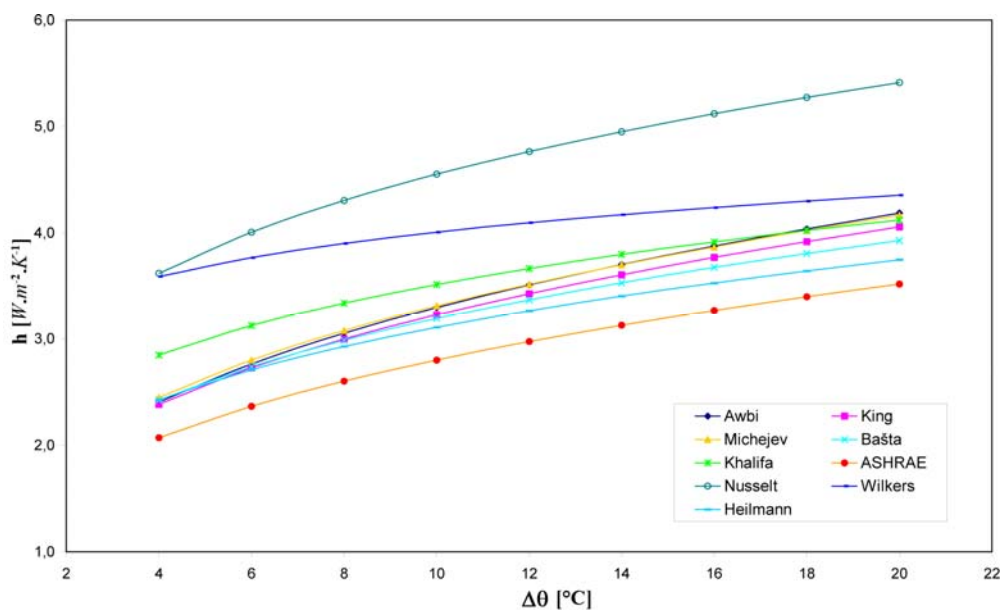
<i>Autor</i>	<i>SPT</i> [$W.m^{-2}.K^{-1}$]	<i>Platnost¹⁾</i>	<i>Typ proudění²⁾</i>	<i>Zdroj</i>
Heilman	$1,67\Delta\theta^{0,27}$	-	T	[79]
Wilkers	$3,04\Delta\theta^{0,12}$	-	T	[79]
Fanger	$1,61\Delta\theta^{0,32}d^{-0,05}$	-	-	[80]
Bašta	$1,6\Delta\theta^{0,3}$	-	T	[81]
ASHRAE	$1,42(\Delta\theta/d)^{0,25}$	$10^4 < Ra < 10^8$	L	[82]
ASHRAE	$1,31(\Delta\theta)^{0,33}$	$10^8 < Ra < 10^{12}$	T	[82]

1) $Gr = \frac{g\beta_s(\theta_s - \theta)d^3}{\nu^2}$, $Ra = Gr.Pr$ ($Pr = 0,72$ pro vzduch), Vztažná teplota $(\theta_s + \theta)/2$

2) písmeno L – laminární a T – turbulentní proudění



Obr. 17.1: Grafické porovnání Nusseltova kritéria v závislosti na Rayleighově čísle pro přirozené proudění podél svislé stěny



Obr. 17.2: Porovnání hodnot SPT konvekci podél svislé stěny

Tab. 17.4: Vztahy pro výpočet Nusseltova čísla pro volné proudění podél vodorovné stěny (ohřívána strana směřována nahoru, ochlazovaná strana směřovaná dolů)

Autor	Nusseltovo číslo ¹⁾ [-]	Platnost ¹⁾	Typ proudění ²⁾	Zdroj
Fishenden a Saunders	$0,54Ra^{0,25}$	$10^5 < Ra < 2 \cdot 10^7$	L	[77]
Fishenden a Saunders	$0,14Ra^{0,33}$	$2 \cdot 10^7 < Ra < 3 \cdot 10^{10}$	T	[77]
Lloyd a Moran	$0,54Ra^{0,25}$	$10^4 < Ra < 10^7$	L	[76]
Lloyd a Moran (Al Arabi)	$0,14Ra^{0,33}$	$10^7 < Ra < 10^9$	T	[76]

<i>Autor</i>	<i>Nusseltovo číslo¹⁾</i> [-]	<i>Platnost¹⁾</i>	<i>Typ proudění²⁾</i>	<i>Zdroj</i>
Awbi a Hatton	$0,269Gr^{0,308}$	$7 \cdot 10^8 < Ra < 4 \cdot 10^{10}$	T	[83]
Al Arabi	$0,7Ra^{0,24}$	$2 \cdot 10^5 < Ra < 4 \cdot 10^7$	L	[84]
Alamdari	$[(0,52Gr^{0,25})^6 + (0,126Gr^{0,33})^6]^{0,17}$	$0 < Gr < \infty$	-	[72]
Yousef	$0,622Ra^{0,25}$	$3 \cdot 10^6 < Ra < 4 \cdot 10^7$	L	[84]
Yousef	$0,162Ra^{0,33}$	$4 \cdot 10^7 < Ra < 1,7 \cdot 10^9$	T	[84]
CIBSE	$0,147Ra^{0,33}$	$7 \cdot 10^7 < Ra < 10^9$	T	[72]
ASHRAE	$0,56Ra^{0,25}$	$10^4 < Ra < 10^8$	L	[82]
ASHRAE	$0,13Ra^{0,33}$	$10^8 < Ra < 10^{12}$	T	[82]

1) $Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (\theta_s - \theta) \cdot d^3}{\nu^2}$, $Ra = Gr \cdot Pr$ ($Pr = 0,72$ pro vzduch), $Vztažná$ teplota $(\theta_s + \theta)/2$

2) písmeno L – laminární a T – turbulentní proudění

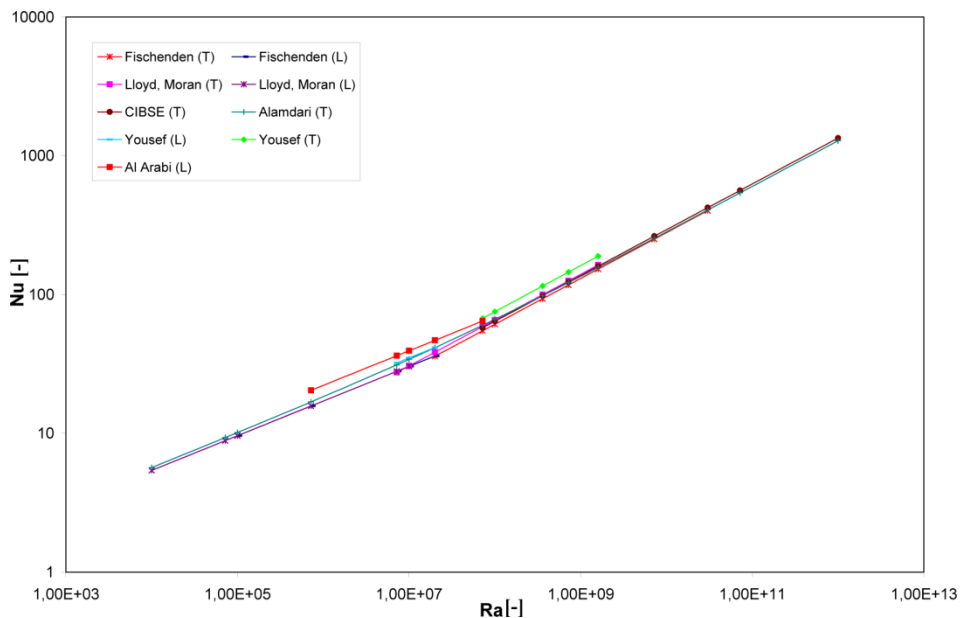
Tab. 17.5: *Vztahy pro výpočet SPT konvekci podél vodorovné steny (ohřívána strana směřována nahoru, ochlazovaná strana směřována dolů)*

<i>Autor</i>	<i>SPT</i> [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	<i>Platnost¹⁾</i>	<i>Typ proudění²⁾</i>	<i>Zdroj</i>
ASHRAE	$1,32(\Delta\theta/d)^{0,25}$	$10^4 < Ra < 10^8$	L	[82]
ASHRAE	$1,52(\Delta\theta)^{0,33}$	$10^8 < Ra < 10^{12}$	T	[82]
Awbi	$2,175(\Delta\theta)^{0,308}$	$7 \cdot 10^8 < Ra < 5 \cdot 10^{10}$	T	[71]
Fanger	$2,08\Delta\theta^{0,31}d^{-0,08}$	-	-	[80]
Khalifa, Marshall	$2,27\Delta\theta^{0,24}$	-	-	[85]

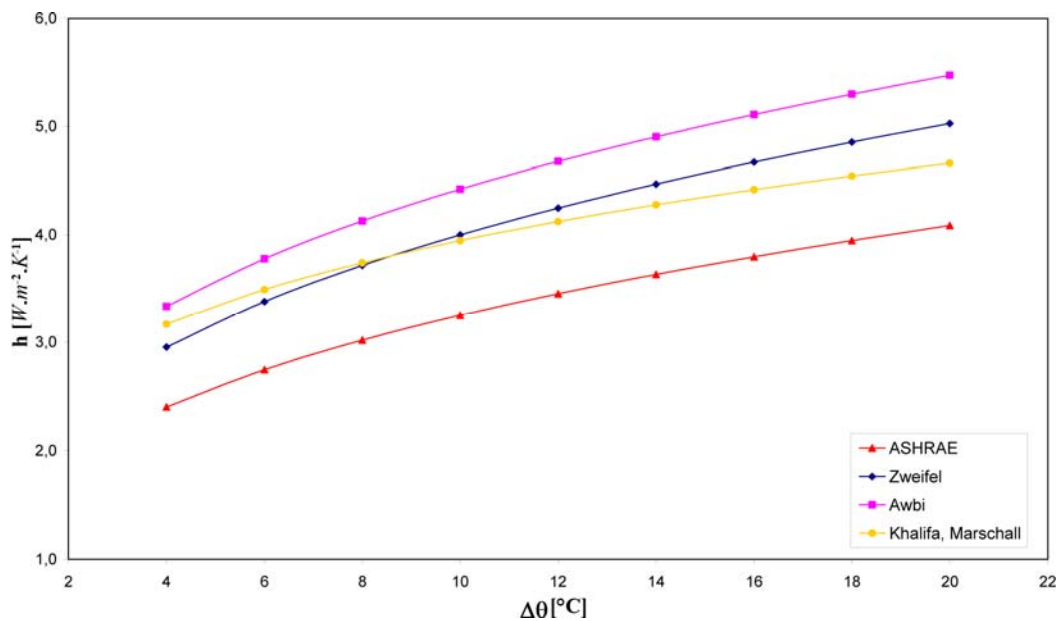
Zweifel	$1,87\Delta\theta^{0,33}$	-	T	[86]
---------	---------------------------	---	---	------

1) $Gr = \frac{g\beta(\theta_s - \theta)d^3}{\nu^2}$, $Ra = Gr \cdot Pr$ ($Pr = 0,72$ pro vzduch), Vztažná teplota $(\theta_s + \theta)/2$

2) písmeno L – laminární a T – turbulentní proudění



Obr. 17.3: Porovnání hodnot Nusseltova čísla v závislosti na Rayleighově čísle pro volné proudění na vodorovné stěně



Obr. 17.4: Porovnání hodnot SPT konvekcí podél vodorovné stěny

Příloha C: Možnosti tvorby multifyzikálních simulací vybraných programů

Tato příloha obsahuje bližší výčet možností paralelní kombinace vícero fyzikálních dějů vybraných programů (jednotlivé možnosti jsou ponechány v originálním anglickém znění z důvodu běžného použití těchto výrazů a těžkopádného českého překladu některých kombinací).

Multifyzikální schopnosti programu ADINA¹⁵:

- Fluid-structure interaction - FSI
- Thermo-mechanical coupling - TMC
- Structural-pore pressure coupling
- Thermal-fluid-structural coupling
- Electric field-structural coupling, piezoelectric
- Thermal-electrical coupling, Joule heating
- Acoustic fluid-structural coupling
- Fluid flow-mass transfer coupling
- Fluid flow-electromagnetic coupling

Multifyzikální schopnosti programu ANSYS Multiphysics¹⁶:

- Acoustics
- Acoustics–structural
- Electric–magnetic
- Fluid–structural

¹⁵ http://www.adina.com/nastran_multiphysics.shtml

¹⁶ <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-capabilities-14.0.pdf>

- Fluid–thermal
- Electromagnetic–fluid
- Electrostatic–structural
- Magnetic–structural
- Electromagnetic–thermal
- Piezoelectric
- Piezoresistive
- Thermal–electric
- Thermal–structural
- Thermal–electric–structural
- Thermal–electric–fluids
- Electromagnetic–thermal–structural
- Electromagnetic–thermal–fluids
- Reduced-order modeling (ROM)

Multifyzikální schopnosti programu OOFELIE¹⁷:

- Electro-Magnetic
 - Thermo-Mechanic
 - Piezo-electric
 - Pyro-Piezo-Electric
 - Vibro-Acoustic
 - Electro-Static actuation
 - Electro-thermo-mechanic
 - Opto-Thermo-mechanics
-

¹⁷http://www.open-engineering.com/index.php/eng/content/download/2932/41998/file/Fiche_General_Multiphysics_2012_Letter.pdf

- Fluid-Structure Interaction

Multifyzikální schopnosti programu COMSOL Multiphysics¹⁸:

- The Joule Heating Effect
- Induction Heating
- Microwave Heating
- Thermal Expansion and Thermal Stresses
- Nonisothermal Flow
- Fluid-Structure Interaction
- Acoustic-Structure Interaction
- Poroelasticity
- Squeezed and Sliding Films
- Piezoelectric and Piezoresistive Effects
- Electromechanical Effects
- Transport and Reactions
- Electroosmosis
- Electrophoretic Effects
- Electrochemical Systems
- Magnetohydrodynamics

¹⁸<http://www.comsol.com/multiphysics/>

Příloha D: Ukázka numerického řešení rovnice vedení tepla

Uvažujme rovnice vedení tepla ve tvaru

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0,5 \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} + \sin(t), \quad (43)$$

s počáteční podmínkou

$$T(x, 0) = \frac{1}{1+x^2}, \quad (44)$$

Cílem je vypočítat přibližné řešení metodou sítí s prostorovým krokem $h = 0,5$ a časovým krokem $\tau = 0,25$.

K výpočtu jednotlivých hodnot bude použita rovnice

$$T_i^{k+1} = T_i^k + 0,5 \frac{\tau}{h^2} (T_{i-1}^k - 2T_i^k + T_{i+1}^k) + 0,25 \sin(0,25k), \quad (45)$$

kde písmeno „ k “ označuje časové kroky a písmeno „ i “ kroky prostorové.

Pro výpočet pomocí explicitního schématu je třeba nejprve ověřit stabilitu metody, která je dána nerovnicí

$$\frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\tau}{h^2} \leq \frac{1}{2}. \quad (46)$$

Po dosazení dle zadání se rovnice vyčíslí na tvar

$$0,5 \frac{0,25}{0,5^2} = \frac{1}{2} \leq \frac{1}{2} \quad (47)$$

a podmínka stability je tedy splněna.

V tabulkách 17.6-17.8 jsou zobrazeny výsledky numerického řešení rovnice vedení tepla pomocí rovnice (45) s počáteční podmínkou (44). Tabulka 17.6 zobrazuje numerický výpočet pomocí diferenční rovnice, tabulka 17.7 obsahuje výsledky obdržené řešením dané rovnice pomocí programu CM. Poslední tabulka byla obdržena řešením dané rovnice s 10x jemnějším prostorovým a časovým krokem v programu CM (tabulka obsahuje pouze ty časové a prostorové kroky, pro které byla rovnice vedení tepla řešena v předchozích tabulkách). Porovnání hodnot uvedených v těchto tabulkách je zobrazeno na obrázku 17.5, na kterém je dobře vidět, že přestože pro výpočet rovnice vedení tepla byl použit velký časový a prostorový krok, tak je řešení v dobré shodě s přesnějším řešením.

Tab. 17.6: Hodnoty teploty vypočtené numerických řešením rovnice vedení tepla

	i	0	1	2	3	4	5	6
k	Čas/ x	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
0	0	1,000	0,800	0,500	0,308	0,200	0,138	0,100
1	0,25	0,800	0,750	0,554	0,350	0,223	0,150	0,138
2	0,5	0,812	0,739	0,612	0,450	0,312	0,242	0,212
3	0,75	0,859	0,832	0,714	0,582	0,466	0,382	0,362
4	1	1,002	0,957	0,877	0,761	0,652	0,584	0,552

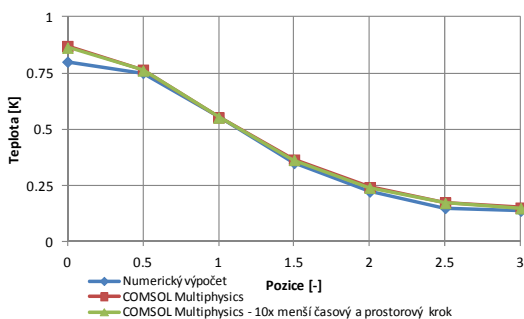
Tab. 17.7: Hodnoty teploty vypočtené numerických řešením rovnice vedení tepla
v programu CM

	i	0	1	2	3	4	5	6
k	Čas/ x	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
0	0	1,000	0,800	0,500	0,308	0,200	0,138	0,100
1	0,25	0,869	0,764	0,553	0,364	0,242	0,174	0,151
2	0,5	0,849	0,765	0,605	0,440	0,316	0,245	0,221
3	0,75	0,884	0,804	0,674	0,531	0,414	0,342	0,318
4	1	0,955	0,877	0,763	0,638	0,531	0,461	0,437

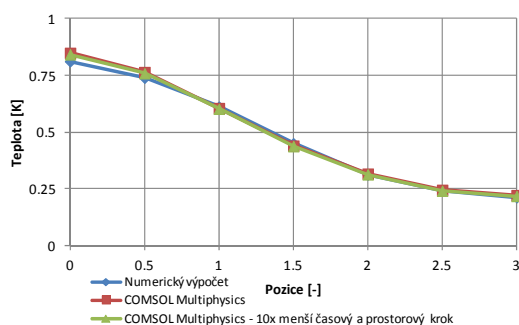
Tab. 17.8: Hodnoty teploty vypočtené numerických řešením rovnice vedení tepla
v programu CM – 10x jemnější časový a prostorový krok

	i	0	1	2	3	4	5	6
k	Čas/ x	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
0	0	1,000	0,800	0,500	0,308	0,200	0,138	0,100

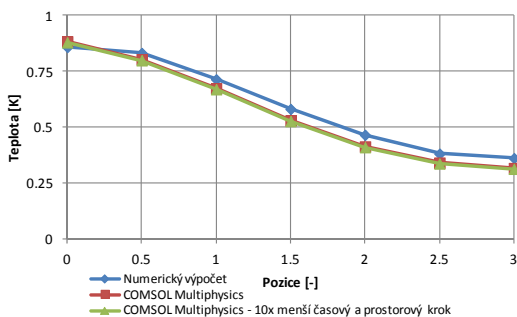
	i	0	1	2	3	4	5	6
k	$\check{C}as/x$	0	$0,5$	1	$1,5$	2	$2,5$	3
1	0,25	0,862	0,761	0,552	0,363	0,240	0,172	0,149
2	0,5	0,842	0,759	0,602	0,437	0,313	0,241	0,217
3	0,75	0,879	0,799	0,670	0,528	0,411	0,338	0,314
4	1	0,951	0,873	0,759	0,635	0,527	0,458	0,434



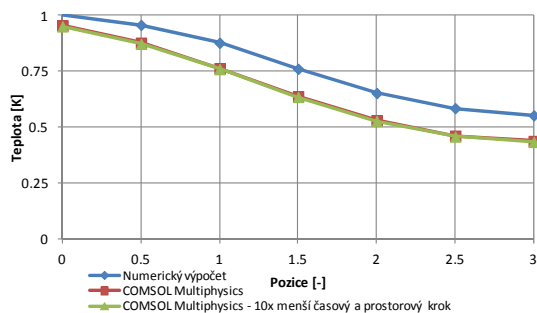
a)



b)



c)



d)

Obr. 17.5: Porovnání hodnot numerického řešení rovnice vedení tepla v časových krocích
a) 0,25 s, b) 0,5 s, c) 0,75 s a d) 1 s

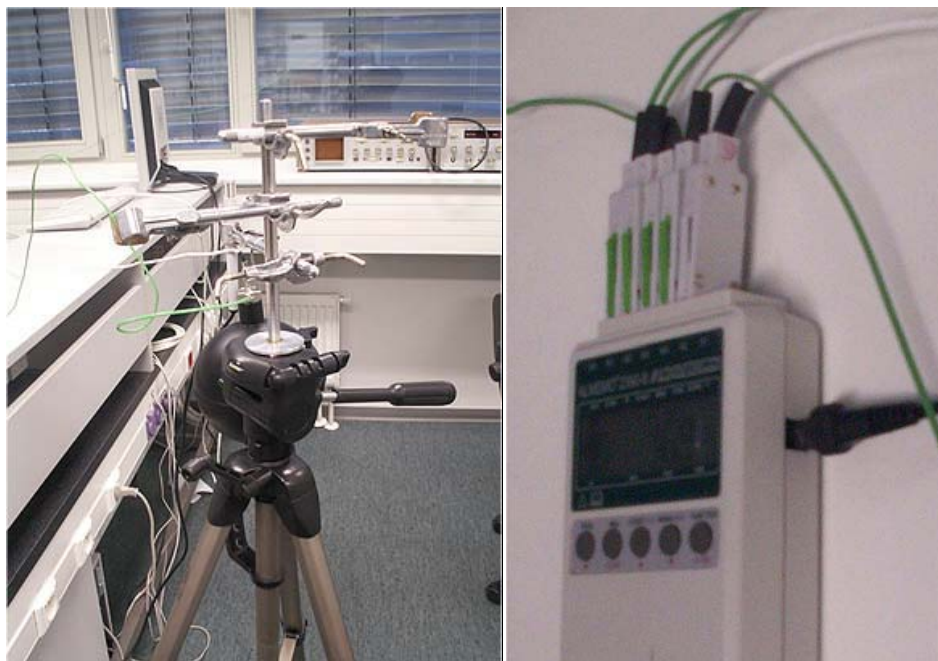
Příloha E: Obrázky laboratoře a měřící aparatury

Experimenty související s řešením disertační práce byly prováděny v měřicí laboratoři Ústavu automatizace a řídicí techniky v místnosti 54/307. Tato laboratorní místnost byla vybudována během předchozích let a slouží jak k výuce, tak pokusům souvisejících s úpravou vzduchu.

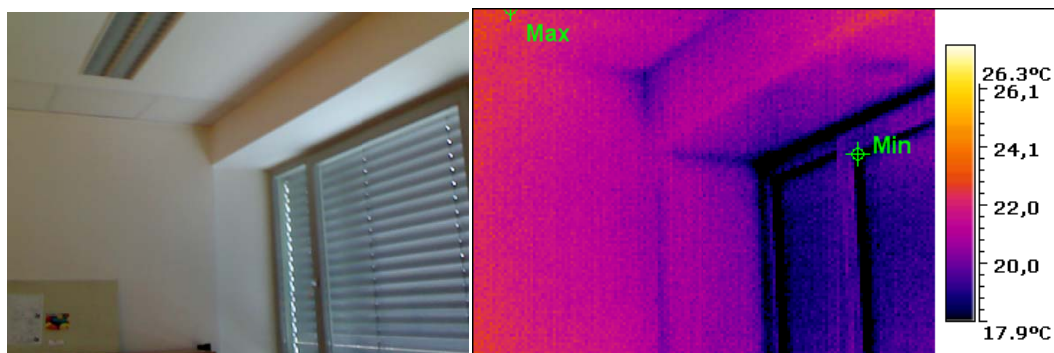
Obrázek 17.6 ukazuje panoramatický pohled na laboratoř a na obrázku 17.7 je zobrazeno měřící místo a zařízení pro zaznamenávání měřených hodnot. Obrázky 17.8-17.10 porovnání fotografie vybraných povrchů s jejich termosnímky.



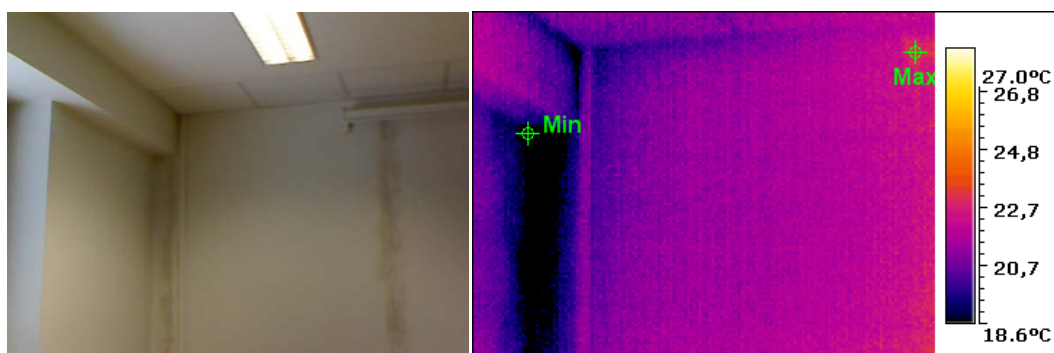
Obr. 17.6: Celkový pohled na laboratoř



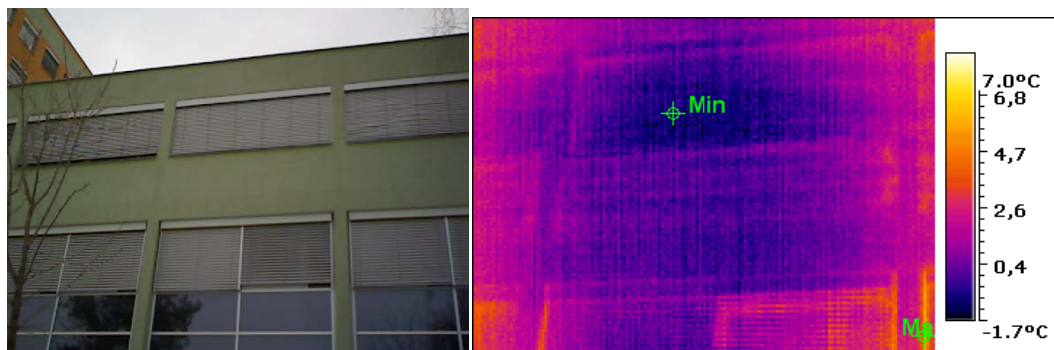
Obr. 17.7: Měřící místo a stanice Almemo 2390-8



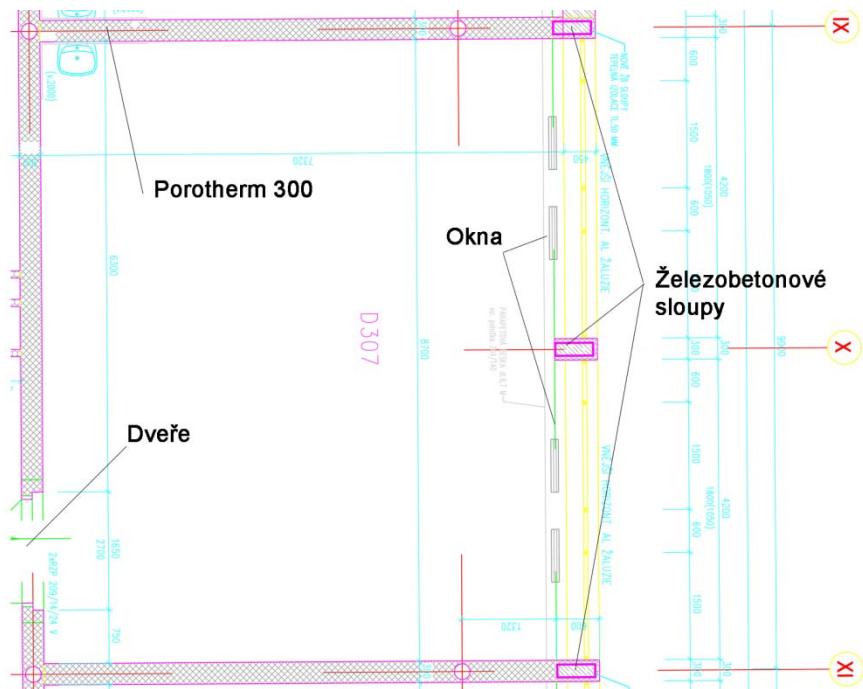
Obr. 17.8: Srovnání fotky a termosnímku přilehlé učebny 54/306



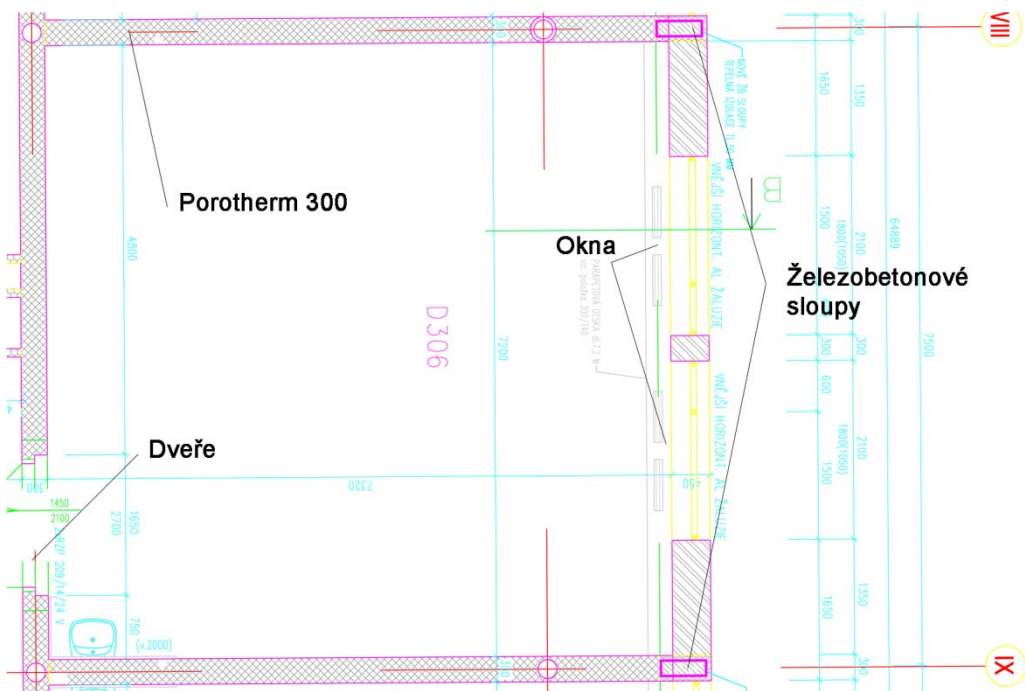
Obr. 17.9: Srovnání fotky a termosnímku přilehlé učebny 54/308



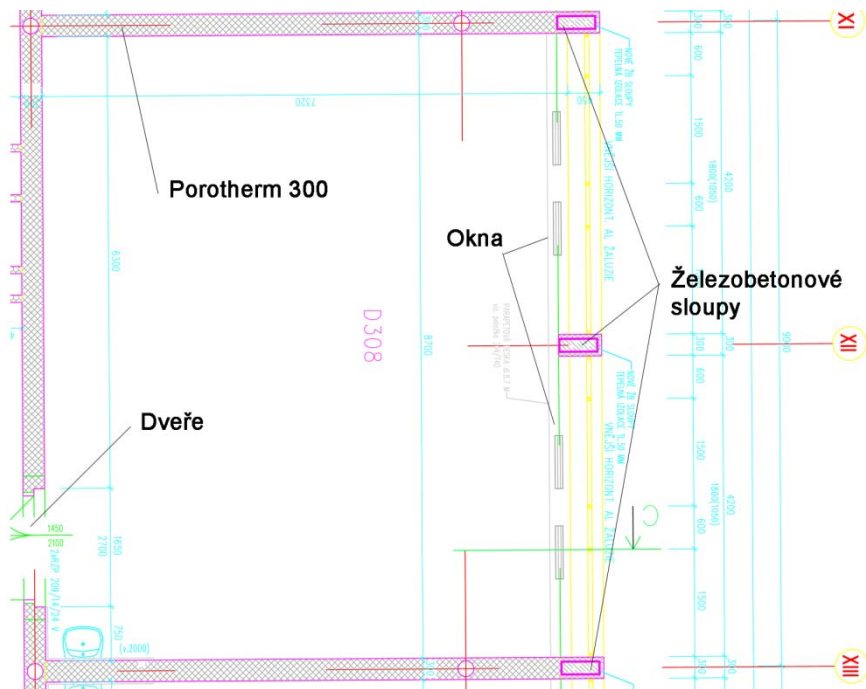
Obr. 17.10: Srovnání fotky a termosnímku vnější stěny laboratoře



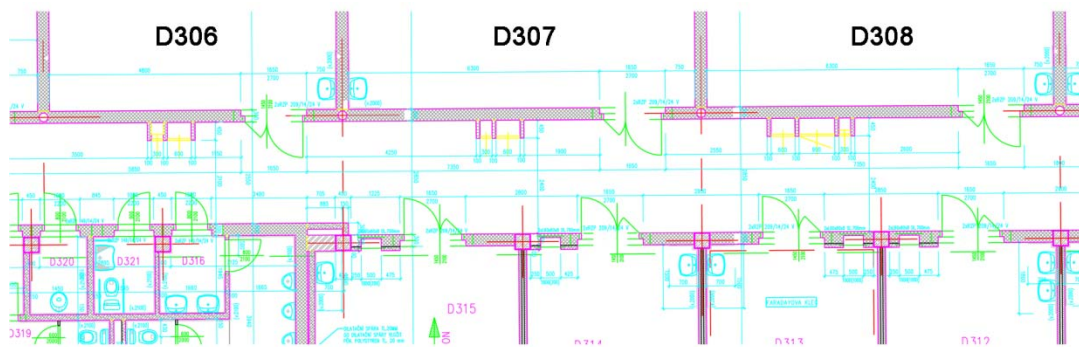
Obr. 17.12: Schéma laboratoře



Obr. 17.13: Schéma učebny 54/306



Obr. 17.14: Schéma kancelářské místnosti 54/308



Obr. 17.15: Schéma chodby

Příloha G: Vybrané hodnoty měřených parametrů při prvním experimentu

Tab. 17.9: Vybrané hodnoty parametrů ilustrující průběh parametrů vnitřního prostředí laboratorní místnosti při prvním experimentu

Datum	Čas	Teplota								
		$\theta_1^{1)}$	$\theta_2^{2)}$	$\theta_3^{3)}$	$\theta_4^{4)}$	$\theta_5^{4)}$	Podlahy	54/308 ⁵⁾	54/306 ⁶⁾	Chodby ⁷⁾
		[°C]								
5.2.2010	16:00	19,4	17,9	19,8	19,4	19,5	19,1	19,4	19,4	19,8
5.2.2010	21:00	17,7	16,0	19,6	17,7	17,6	18,4	18,9	18,5	18,0
6.2.2010	7:00	17,2	15,6	19,7	17,1	17,0	17,4	18,4	17,8	17,3
6.2.2010	12:00	17,2	15,8	19,9	17,1	17,0	17,2	18,3	17,6	17,1
6.2.2010	17:00	17,1	15,9	19,8	17,1	17,0	18,2	18,3	17,7	17,1
6.2.2010	22:00	16,6	14,9	19,6	16,5	16,3	16,8	17,9	17,3	16,4
7.2.2010	7:00	16,0	14,3	19,3	15,9	15,9	16,1	17,4	16,4	16,1
7.2.2010	12:00	16,0	14,5	19,3	16,0	15,8	15,9	17,2	16,3	15,8
7.2.2010	17:00	16,0	14,6	19,3	16,0	15,8	15,6	17,2	16,3	15,9
7.2.2010	22:00	15,7	14,0	19,2	15,6	15,4	15,8	16,9	16,1	15,8
8.2.2010	7:00	15,1	13,3	19,5	15,0	14,8	14,9	16,3	15,4	15,1
8.2.2010	12:00	15,2	13,9	21,8	15,1	15,0	14,7	16,1	15,2	15,1
8.2.2010	17:00	15,0	13,5	20,1	15,0	14,9	14,9	16,4	15,5	15,2
8.2.2010	22:00	14,9	13,2	19,6	14,8	14,7	14,8	16,3	15,2	15,1
9.2.2010	7:00	14,6	12,8	19,5	14,4	14,4	14,3	16,3	15,1	14,7
9.2.2010	12:00	14,8	13,3	21,8	14,6	14,6	14,2	16,0	14,8	14,7

Datum	Čas	Teplota								
		$\theta_1^{1)}$	$\theta_2^{2)}$	$\theta_3^{3)}$	$\theta_4^{4)}$	$\theta_5^{4)}$	Podlahy	54/308 ⁵⁾	54/306 ⁶⁾	Chodby ⁷⁾
		[°C]								
9.2.2010	17:00	14,7	13,2	21,2	14,7	14,6	14,2	15,9	14,9	14,7
9.2.2010	22:00	14,6	12,8	20,6	14,5	14,4	14,3	16,1	14,9	14,8
10.2.2010	7:00	14,8	13,0	20,7	14,7	14,4	14,3	15,8	15,1	14,7
10.2.2010	12:00	14,6	13,1	21,1	14,6	14,5	14,2	15,8	14,9	14,6
10.2.2010	17:00	14,9	13,3	21,6	14,8	14,7	14,6	15,8	15,1	14,8
10.2.2010	22:00	22,9	19,5	20,5	21,7	21,2	17,0	19,8	20,1	19,9
11.2.2010	7:00	25,0	21,9	20,7	24,2	23,6	20,1	23,1	23,5	23,2
11.2.2010	12:00	26,3	23,0	21,6	25,3	24,8	21,3	24,1	24,5	24,3
11.2.2010	17:00	27,1	23,9	22,4	26,3	25,7	22,3	25,2	25,6	25,2
11.2.2010	22:00	27,9	24,5	21,7	27,2	26,4	23,2	26,1	26,6	26,2
12.2.2010	7:00	29,1	25,8	21,7	28,2	27,6	24,7	27,6	28,2	27,9
12.2.2010	12:00	29,8	26,0	22,6	28,6	28,3	25,1	27,8	28,5	28,2
12.2.2010	17:00	30,0	26,4	22,3	29,0	28,6	25,8	28,4	29,1	28,8
12.2.2010	22:00	22,9	20,5	22,0	22,8	22,7	23,7	25,4	25,0	24,7
13.2.2010	7:00	20,8	18,7	21,8	20,7	20,5	21,2	22,7	22,1	21,6
13.2.2010	12:00	20,2	18,4	21,8	20,2	20,0	20,5	21,7	21,2	20,9
13.2.2010	17:00	19,9	18,3	21,5	19,8	19,9	20,4	21,9	21,0	20,9
13.2.2010	22:00	19,3	17,4	21,1	19,1	19,0	19,4	20,8	20,1	20,0
14.2.2010	7:00	18,0	16,4	20,7	17,8	17,9	18,3	19,7	18,9	18,9

		<i>Teplota</i>								
<i>Datum</i>	<i>Čas</i>	$\theta_1^{1)}$	$\theta_2^{2)}$	$\theta_3^{3)}$	$\theta_4^{4)}$	$\theta_5^{5)}$	<i>Podlahy</i>	<i>54/308⁵⁾</i>	<i>54/306⁶⁾</i>	<i>Chodby⁷⁾</i>
		<i>[°C]</i>								
14.2.2010	12:00	18,0	16,6	20,7	17,8	17,9	17,9	19,6	18,9	18,7
14.2.2010	17:00	17,8	16,3	20,7	17,5	17,6	17,6	19,3	18,4	18,3
14.2.2010	22:00	17,4	16,0	20,4	17,2	17,3	17,3	18,8	18,1	17,8
15.2.2010	7:00	16,9	15,4	20,6	16,7	16,7	17,0	18,7	17,7	17,6

1) Hodnoty teploty měřené na souřadnicích (od rohu místnosti tvořeného vnější stěnou, stěnou sousedící s místností 54/308 a podlahou) – 8,28 x 5,67 x 0,84 m

2) Hodnoty teploty měřené na souřadnicích (od rohu místnosti tvořeného vnější stěnou, stěnou sousedící s místností 54/308 a podlahou) – 4,40 x 0,40 x 2,7 m

3) Hodnoty teploty měřené na souřadnicích (od rohu místnosti tvořeného vnější stěnou, stěnou sousedící s místností 54/308 a podlahou) – 0,87 x 2,15 x 0,88 m

4) Hodnoty teploty měřené na souřadnicích (od rohu místnosti tvořeného vnější stěnou, stěnou sousedící s místností 54/308 a podlahou) – 6,47 x 1,48 x 1,30 m

5) Teplota povrchu stěny sousedící s místností 54/308

6) Teplota povrchu stěny sousedící s místností 54/306

7) Teplota povrchu stěny sousedící s chodbou

Tab. 17.10: Vybrané hodnoty parametrů ilustrující průběh parametrů vnitřního prostředí okolních místností při prvním experimentu

Datum	Čas	Výkon přímotopů		Teplota						
		$Q_1^{1)}$	$Q_2^{2)}$	54/306		54/308		54/207		Chodba
				Stěna	Vzduch	Stěna	Vzduch	Stěna	Vzduch	
		[W]		[°C]						
5.2.2010	16:00	0	0	20,0	20,0	20,2	20,5	23,2	22,8	19,2
5.2.2010	21:00	0	0	19,9	20,1	20,3	20,7	21,3	20,8	20,3
6.2.2010	7:00	0	0	20,2	20,2	19,9	20,1	21,3	19,9	20,0
6.2.2010	12:00	0	0	20,4	20,5	20,4	21,0	21,5	20,3	20,9
6.2.2010	17:00	0	0	20,2	19,8	20,3	21,0	21,6	20,3	20,8
6.2.2010	22:00	0	0	19,8	19,3	20,1	21,1	21,0	20,5	20,8
7.2.2010	7:00	0	0	19,6	18,8	19,5	19,8	20,6	20,6	18,7
7.2.2010	12:00	0	0	19,6	19,5	19,8	20,4	20,4	20,2	20,2
7.2.2010	17:00	0	0	19,6	19,5	19,9	20,6	20,7	20,6	20,5
7.2.2010	22:00	0	0	19,4	19,1	19,5	20,2	20,3	19,8	20,1
8.2.2010	7:00	0	0	19,8	19,8	19,8	20,6	20,3	19,9	20,6
8.2.2010	12:00	0	0	22,3	21,2	20,6	22,2	22,7	22,1	22,0
8.2.2010	17:00	0	0	20,7	19,8	21,4	23,3	22,2	20,6	22,9
8.2.2010	22:00	0	0	20,1	19,7	20,9	22,0	21,5	20,6	21,7
9.2.2010	7:00	0	0	19,9	19,3	20,3	21,3	20,7	19,9	21,0
9.2.2010	12:00	0	0	22,5	21,6	21,3	22,8	22,8	22,0	22,1
9.2.2010	17:00	0	0	22,2	20,9	21,6	22,5	22,6	21,6	21,7
9.2.2010	22:00	0	0	21,3	20,0	21,0	22,2	21,1	20,8	21,0

Datum	Čas	Výkon přímotopů		Teplota						
		$\dot{Q}_1^{1)}$	$\dot{Q}_2^{2)}$	54/306		54/308		54/207		Chodba
				Stěna	Vzduch	Stěna	Vzduch	Stěna	Vzduch	
		[W]		[°C]						
10.2.2010	7:00	0	0	21,6	20,1	20,1	21,0	21,6	20,7	20,8
10.2.2010	12:00	0	0	20,6	22,3	21,9	20,8	22,5	21,7	21,4
10.2.2010	17:00	2801	1952	22,4	20,9	21,4	22,6	22,1	20,6	21,1
10.2.2010	22:00	2800	1965	21,0	21,2	21,4	22,2	21,0	21,5	21,2
11.2.2010	7:00	2712	1888	21,0	21,4	20,8	21,4	20,7	21,3	20,6
11.2.2010	12:00	2677	1872	22,1	22,3	21,8	22,5	21,0	22,1	21,4
11.2.2010	17:00	2764	1914	22,7	22,8	22,9	23,7	20,7	22,1	21,4
11.2.2010	22:00	2800	1957	22,1	22,4	22,6	22,6	20,4	21,6	21,5
12.2.2010	7:00	2718	1890	22,1	22,4	22,3	21,9	20,7	21,7	20,8
12.2.2010	12:00	2770	1912	23,0	22,6	23,5	23,7	21,2	21,9	21,8
12.2.2010	17:00	2793	1865	22,4	22,3	24,2	24,1	21,2	22,0	21,6
12.2.2010	22:00	0	0	22,5	21,9	23,6	22,7	21,2	21,5	21,5
13.2.2010	7:00	0	0	22,2	21,5	23,0	21,5	21,5	21,1	21,1
13.2.2010	12:00	0	0	22,1	21,5	23,5	22,0	21,6	21,7	21,3
13.2.2010	17:00	0	0	22,1	21,3	22,8	22,4	21,8	21,3	20,8
13.2.2010	22:00	0	0	21,5	21,1	22,7	22,5	21,4	21,1	21,6
14.2.2010	7:00	0	0	21,0	20,4	21,7	21,7	21,1	20,7	20,8
14.2.2010	12:00	0	0	21,2	20,5	21,5	21,7	21,3	20,8	20,7
14.2.2010	17:00	0	0	20,9	20,6	21,8	21,9	21,2	20,9	21,0
14.2.2010	22:00	0	0	20,6	20,3	21,6	21,9	20,8	20,7	21,0

Datum	Čas	Výkon přímotopů		Teplota						
		$\dot{Q}_1^{1)}$	$\dot{Q}_2^{2)}$	54/306		54/308		54/207		Chodba
				Stěna	Vzduch	Stěna	Vzduch	Stěna	Vzduch	
		[W]		[°C]						
15.2.2010	7:00	0	0	20,8	21,1	21,4	21,8	20,7	20,9	20,8

1) Výkon přímotopu umístěného u stěny sousedící s místností 54/308

2) Výkon přímotopu umístěného u stěny sousedící s místností 54/306

Příloha H: Vybrané hodnoty měřených parametrů při druhém experimentu

Tab. 17.11: Vybrané hodnoty parametrů ilustrující průběh parametrů vnitřního prostředí laboratorní místnosti při druhém experimentu

Datum	Čas	Výkon přímotopů		Teplota				
		$\dot{Q}_1^{1)}$	$\dot{Q}_2^{2)}$	$\theta_1^{3)}$	$\theta_2^{4)}$	$\theta_3^{5)}$	$\theta_4^{6)}$	$\theta_5^{6)}$
		[W]		[°C]				
23.12.2010	15:24	0	0	15,1	12,9	18,6	18,6	18,86
23.12.2010	19:34	0	0	11,2	11,6	18,0	18,0	18,23
23.12.2010	23:44	0	0	10,5	10,7	17,8	17,8	18,03
24.12.2010	3:54	0	0	9,9	10,8	17,7	17,7	17,88
24.12.2010	8:04	0	0	10,6	10,6	17,7	17,6	17,80
24.12.2010	12:14	0	0	11,4	11,1	17,6	17,6	17,75
24.12.2010	16:24	0	0	9,8	9,7	17,5	17,4	17,62
24.12.2010	20:34	0	0	9,1	8,6	17,5	17,4	17,58
25.12.2010	0:44	0	0	5,0	3,6	17,2	17,2	17,35
25.12.2010	4:54	0	0	3,3	2,3	17,1	17,0	17,19
25.12.2010	9:04	0	0	2,2	1,7	16,8	16,7	16,89
25.12.2010	13:14	0	0	1,5	0,8	16,7	16,6	16,78
25.12.2010	17:24	0	0	0,8	0,5	16,3	16,3	16,46
25.12.2010	21:34	0	0	-0,4	-0,7	16,2	16,2	16,38
26.12.2010	1:44	0	0	-2,4	-3,0	16,1	16,1	16,20
26.12.2010	5:54	0	0	-3,5	-3,9	15,9	15,9	16,20
26.12.2010	10:04	0	0	-3,8	-4,4	15,8	15,7	16,20

Datum	Čas	Výkon přímotopů		Teplota				
		$\dot{Q}_1^{1)}$	$\dot{Q}_2^{2)}$	$\theta_1^{3)}$	$\theta_2^{4)}$	$\theta_3^{5)}$	$\theta_4^{6)}$	$\theta_5^{6)}$
		[W]		[°C]				
26.12.2010	14:14	0	0	-3,6	-4,3	15,7	15,6	16,20
26.12.2010	18:24	0	0	-6,1	-6,5	15,4	15,3	16,10
26.12.2010	22:34	0	0	-7,0	-7,7	15,1	15,1	16,10
27.12.2010	2:44	0	0	-6,9	-6,9	14,9	14,9	16,10
27.12.2010	6:54	0	0	-7,3	-6,8	14,6	14,6	16,00
27.12.2010	11:04	0	0	-4,8	-4,6	14,6	14,5	16,00
27.12.2010	15:14	0	0	-3,9	-4,4	14,4	14,3	15,90
27.12.2010	19:24	0	0	-4,3	-4,1	14,3	14,3	15,90
27.12.2010	23:34	0	0	-4,8	-4,9	14,1	14,2	15,80
28.12.2010	3:44	0	0	-6,1	-6,4	13,9	13,9	15,80
28.12.2010	7:54	0	0	-4,1	-4,2	13,8	13,8	15,70
28.12.2010	12:04	0	0	-1,6	-1,6	13,9	13,9	15,70
28.12.2010	16:14	2797	1020	-2,9	-3,3	17,7	18,1	15,62
28.12.2010	20:24	2797	1020	-4,1	-4,1	20,1	20,4	18,10
29.12.2010	0:34	2797	1020	-4,9	-4,8	21,4	21,7	19,18
29.12.2010	4:44	2797	1020	-8,4	-9,4	22,5	22,0	19,89
29.12.2010	8:54	2797	1020	-9,1	-10,0	22,1	22,1	19,97
29.12.2010	13:04	507	15	-3,9	-4,5	22,1	22,0	19,89
29.12.2010	17:14	507	15	-5,6	-6,3	22,8	23,1	20,85
29.12.2010	21:24	507	15	-5,9	-6,0	23,6	23,8	21,52

Datum	Čas	Výkon přímotopů		Teplota				
		$\dot{Q}_1^{1)}$	$\dot{Q}_2^{2)}$	$\theta_1^{3)}$	$\theta_2^{4)}$	$\theta_3^{5)}$	$\theta_4^{6)}$	$\theta_5^{6)}$
		[W]		[°C]				
30.12.2010	1:34	507	15	-6,0	-6,9	24,3	24,4	22,00
30.12.2010	5:44	507	15	-6,4	-6,8	24,4	24,9	22,37
30.12.2010	9:54	507	15	-5,7	-6,4	24,6	25,0	22,68
30.12.2010	14:04	2818	891	-2,0	-4,5	25,2	25,5	23,12
30.12.2010	18:14	2818	891	-8,6	-10,6	25,6	25,8	23,37
30.12.2010	22:24	2818	891	-11,8	-12,4	25,5	25,6	23,43
31.12.2010	2:34	2818	891	-10,3	-10,7	25,8	26,0	23,66
31.12.2010	6:44	2818	891	-8,9	-9,3	25,7	26,2	23,88
31.12.2010	10:54	3	0	-5,7	-5,7	21,9	21,8	21,74
31.12.2010	15:04	3	0	-4,5	-4,5	20,3	20,3	20,35
31.12.2010	19:14	3	0	-4,3	-5,2	19,4	19,4	19,50
31.12.2010	23:24	3	0	-3,4	-3,5	18,8	18,8	18,89
1.1.2011	3:34	3	0	-2,6	-2,4	18,4	18,3	18,40
1.1.2011	7:44	3	0	-1,3	-1,2	18,0	18,0	18,06
1.1.2011	11:54	3	0	0,5	-0,1	17,8	17,8	17,81
1.1.2011	16:04	3	0	0,3	0,1	17,5	17,5	17,60
1.1.2011	20:14	2797	0	0,7	0,8	21,4	21,7	19,94
2.1.2011	0:24	2797	0	0,2	0,2	22,3	22,6	20,80
2.1.2011	4:34	2797	0	0,1	0,1	22,8	23,2	21,37
2.1.2011	8:44	2797	0	0,4	0,5	23,1	23,5	21,72

Datum	Čas	Výkon přímotopů		Teplota				
		$\dot{Q}_1^{1)}$	$\dot{Q}_2^{2)}$	$\theta_1^{3)}$	$\theta_2^{4)}$	$\theta_3^{5)}$	$\theta_4^{6)}$	$\theta_5^{6)}$
		[W]		[°C]				
2.1.2011	12:54	2797	0	5,4	3,6	23,6	24,0	22,17
2.1.2011	17:04	2797	0	1,5	1,1	23,9	24,2	22,42
2.1.2011	21:14	2797	0	0,2	0,2	24,1	24,4	22,65
3.1.2011	1:24	2797	0	-0,5	-0,6	24,3	24,5	22,81
3.1.2011	5:34	2797	0	-1,7	-2,5	24,2	24,5	22,92
3.1.2011	9:44	2797	0	1,1	0,6	22,5	22,4	22,24
3.1.2011	13:54	0	0	10,9	5,4	20,4	20,3	20,46
3.1.2011	18:04	0	0	0,9	-0,1	19,4	19,4	19,51
3.1.2011	22:14	0	0	-1,4	-2,3	19,0	18,9	19,00
4.1.2011	2:24	0	0	-2,9	-3,6	18,3	18,2	18,38
4.1.2011	6:34	0	0	-4,5	-5,0	17,8	17,8	17,90
4.1.2011	23:14	0	0	-2,3	-2,2	17,5	17,4	17,57
5.1.2011	3:24	0	0	9,0	1,7	17,5	17,4	17,55
5.1.2011	7:34	2801	1907	-3,3	-5,0	23,1	23,2	20,07
5.1.2011	11:44	2801	1907	-2,6	-2,4	25,0	25,3	22,27
5.1.2011	15:54	2801	1907	-2,7	-3,3	26,6	26,7	23,35
5.1.2011	20:04	2801	1907	-3,4	-4,2	26,9	27,1	24,13
6.1.2011	0:14	2722	1888	-1,5	-2,1	27,8	27,6	24,80
6.1.2011	4:24	2722	608	-2,8	-4,8	28,4	28,3	25,27
6.1.2011	8:34	2722	608	-3,5	-3,9	29,5	29,5	26,42

Datum	Čas	Výkon přímotopů		Teplota				
		$\dot{Q}_1^{1)}$	$\dot{Q}_2^{2)}$	$\theta_1^{3)}$	$\theta_2^{4)}$	$\theta_3^{5)}$	$\theta_4^{6)}$	$\theta_5^{6)}$
		[W]		[°C]				
6.1.2011	12:44	2722	608	-3,1	-3,7	30,3	30,4	27,21
6.1.2011	16:54	2722	608	-3,3	-4,1	31,1	30,7	27,74
6.1.2011	21:04	2722	608	-2,7	-2,2	25,9	25,7	25,50
7.1.2011	1:14	2722	608	8,9	6,9	24,7	24,6	24,31
7.1.2011	5:24	2722	608	2,6	2,3	23,7	23,7	23,34
7.1.2011	9:34	2722	608	2,6	2,8	23,3	23,3	22,83
7.1.2011	13:44	2722	608	2,7	2,6	22,1	22,0	22,03
7.1.2011	17:54	2722	608	2,4	2,7	21,1	21,0	21,14
7.1.2011	22:04	2722	608	4,3	4,8	20,8	20,6	20,69
8.1.2011	2:14	0	0	16,2	12,6	20,7	20,6	20,57
8.1.2011	6:24	0	0	5,2	3,6	20,1	20,0	20,03
4.1.2011	23:14	0	0	4,5	4,4	20,0	19,8	19,86
5.1.2011	3:24	0	0	4,8	4,5	19,8	19,6	19,61
5.1.2011	7:34	0	0	4,8	4,5	19,6	19,4	19,37
5.1.2011	11:44	0	0	5,8	6,1	19,3	19,1	19,20
5.1.2011	15:54	0	0	5,6	4,6	19,2	19,0	19,04
5.1.2011	20:04	2842	1908	5,0	5,1	25,9	25,5	22,59
6.1.2011	0:14	2842	1908	4,6	4,4	27,8	27,4	24,54
6.1.2011	4:24	2842	1908	3,7	3,6	29,3	28,6	25,69
6.1.2011	8:34	2842	1908	1,2	0,8	29,7	29,1	26,41

Datum	Čas	Výkon přímotopů		Teplota				
		$\dot{Q}_1^{1)}$	$\dot{Q}_2^{2)}$	$\theta_1^{3)}$	$\theta_2^{4)}$	$\theta_3^{5)}$	$\theta_4^{6)}$	$\theta_5^{6)}$
		[W]		[°C]				
6.1.2011	12:44	2842	1908	7,1	7,7	30,9	30,2	27,29
6.1.2011	16:54	2842	1908	9,1	8,0	31,8	31,1	28,26
8.1.2011	10:34	2842	1908	4,3	3,5	32,0	31,5	28,58
8.1.2011	14:44	2842	1908	4,4	4,1	32,3	31,9	29,00
8.1.2011	18:54	2842	1908	4,8	4,5	32,7	32,2	29,36
8.1.2011	23:04	2782	1852	4,7	4,5	32,7	32,2	29,58
9.1.2011	3:14	2782	1852	5,4	5,0	32,9	32,5	29,85
9.1.2011	7:24	0	0	5,3	5,2	28,0	28,0	28,06
9.1.2011	11:34	0	0	4,7	3,6	25,5	25,3	25,40
9.1.2011	15:44	0	0	4,1	3,9	24,2	24,0	24,14
9.1.2011	19:54	0	0	4,0	3,7	23,3	23,1	23,21
10.1.2011	0:04	0	0	15,1	12,9	18,6	18,6	18,86
10.1.2011	4:14	0	0	11,2	11,6	18,0	18,0	18,23
10.1.2011	8:24	0	0	10,5	10,7	17,8	17,8	18,03
10.1.2011	12:34	0	0	9,9	10,8	17,7	17,7	17,88
10.1.2011	16:44	0	0	10,6	10,6	17,7	17,6	17,80
10.1.2011	20:54	0	0	11,4	11,1	17,6	17,6	17,75
11.1.2011	1:04	0	0	9,8	9,7	17,5	17,4	17,62
11.1.2011	5:14	0	0	9,1	8,6	17,5	17,4	17,58

1) Výkon přímotopu umístěného u stěny sousedící s místností 54/308

2) Výkon přímotopu umístěného u stěny sousedící s místností 54/306

3) Hodnoty teploty měřené na souřadnicích (od rohu místnosti tvořeného vnější stěnou, stěnou sousedící s místností 54/308 a podlahou) – 8,43 x 0,17 x 1,23 m

4) Hodnoty teploty měřené na souřadnicích (od rohu místnosti tvořeného vnější stěnou, stěnou sousedící s místností 54/308 a podlahou) – 4,40 x 0,40 x 2,7 m

5) Hodnoty teploty měřené na souřadnicích (od rohu místnosti tvořeného vnější stěnou, stěnou sousedící s místností 54/308 a podlahou) – 8,28 x 5,67 x 0,84 m

6) Hodnoty teploty měřené na souřadnicích (od rohu místnosti tvořeného vnější stěnou, stěnou sousedící s místností 54/308 a podlahou) – 6,47 x 1,48 x 1,30 m