

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí

Ing. JAN POKORNÝ

SVÁZÁNÍ FYZIOLOGICKÉHO MODELU S MODELEM
TEPELNÉHO KOMFORTU

COUPLING OF THE MODELS OF HUMAN PHYSIOLOGY AND
THERMAL COMFORT

Zkrácená verze Ph.D Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc.

Oponenti:

Datum obhajoby:

Klíčová slova:

Prostředí v kabinách automobilů, Tepelná zátěž kabiny, Tepelný komfort, Model tepelného komfortu, Model fyziologie člověka

Keywords:

Car cabin environment, Cabin heat load, Thermal comfort, Thermal comfort model, Human physiology model

Místo uložení práce:

Disertační práce je dostupná v tištěné podobě na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69.

© Ing. Jan Pokorný

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

1	ÚVOD.....	2
1.1	Vymezení cílů a limitů práce	3
1.2	Zvolený postup řešení	4
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	5
2.1	Vnitřní prostředí kabin automobilů.....	5
2.2	Tepelný komfort.....	5
3	MODEL TEPELNÉ ZÁTĚŽE KABINY AUTOMOBILU.....	7
3.1	Validace modelu – převzaté měření v klimatické komoře.....	9
3.2	Validace modelu – vlastní měření v reálném provozu.....	10
4	SVÁZANÝ MODEL TEPELNÉHO KOMFORTU.....	16
4.1	Svázání fyziologického modelu s modelem tepelného komfortu	16
4.2	Validace Svázaného modelu tepelného komfortu.....	18
5	ZÁVĚR.....	23
	Literatura	24
	Vlastní publikační činnost	26
	Životopis	27
	Abstrakt / Abstract.....	28

1 ÚVOD

V moderní době lidé tráví podstatnou část dne v uzavřených vnitřních prostorech ať už obytných, veřejných, pracovních či dopravních prostředků. V těchto prostorech je kladen požadavek na vhodné vnitřní prostředí, kterého se docílí se pomocí technických zařízení jako je větrání, topení, osvětlení atd. Ideální stav prostředí je takový, kdy člověk se cítí komfortně. Obecný pojem komfort člověka je stav mysli člověka, vyjadřující spokojenost s podmínkami okolního prostředí a tím, jak jej člověk vnímá svými smysly. Komfort lze rozdělit na celou řadu podskupin dle druhu vnímání a interakce člověka s okolním prostředím: ergonomie, estetika (design), čistota okolního vzduchu (prach, smog), elektromagnetické pole, intenzita osvětlení, akustika (hluk, vibrace), tepelný komfort (teplota okolních stěn a vzduchu, jeho relativní vlhkost a rychlost proudění). Tepelný komfort je kromě podmínek okolního prostředí podmíněn osobními faktory člověka, jako je oděv a vykonávaná činnost. Tepelný komfort je úzce spjat s fyziologickým stavem člověka (tělesná konstituce, aklimatizace apod.), ale také s jeho aktuálním psychickým stavem (únava, stres, radost, očekávání apod.).

V uzavřeném vnitřním prostředí s velkou koncentrací lidí na malém prostoru je pro tepelný komfort zásadní správná funkce systému větrání, který musí být schopen zajistit koncentraci škodlivin na bezpečné úrovni, a zároveň dodávat dostatek čerstvého vzduchu s patřičně upravenou teplotou a vlhkostí. Specifickým prostředím jsou kabiny dopravních prostředků (letadel, autobusů, automobilů apod.), které se vyznačují relativně malým objemem vzduchu na jednu osobu a uzavřeností prostoru neumožňující jeho okamžité opuštění během jízdy. V dopravních prostředcích člověk stráví odhadem přibližně jednu hodinu denně, a to zejména při dojíždění do zaměstnání. Pro řidiče z povolání se jedná o pracovní prostředí, ve kterém musí trávit značnou část dne, nehledě na okolní podmínky. Nevhodné mikroklima zvyšuje únavu a stres, čímž negativně ovlivňuje bezpečnost a produktivitu práce. V kabinách je obvyklá lokální distribuce přiváděného vzduchu výústkami a intenzivnější výměna vzduchu, tak aby cestující měli dostatečné množství čerstvého vzduchu.

Od výrobců automobilu se žádá, aby jejich vozy byly spolehlivé, bezpečné, ekonomické, ekologické a zároveň komfortní. Ve všech zmíněných oblastech probíhá v poslední době intenzivní výzkum a vývoj, který přináší pozitivní výsledky. Součástí kvalitního vozu jsou dnes systémy umožňující aktivní řízení vnitřního mikroklimatu, jejichž hlavním cílem je zajistit kvalitní a komfortní mikroklima po většinu doby jízdy. I když komfortní mikroklima není bezesporu hlavním kritériem při koupi nového vozu, jedná se o důležitý parametr, který zvláště při delším používání vozu člověk ocení. Zajištění vhodného mikroklimatu po celou dobu jízdy tedy patří mezi důležité úkoly pro vývojáře nových automobilů. Vhodné mikroklima souvisí s návrhem klimatizační jednotky, kdy inženýři mají za cíl najít optimum mezi dosaženým tepelným komfortem a potřebným výkonem klimatizační jednotky na úpravu přiváděného vzduchu. Poddimenzovaná klimatizační jednotka není schopna poskytnout tepelný komfort během různých provozních podmínek. Na druhou stranu, předimenzovaná klimatizační jednotka je schopna velice rychle vyhovět požadavkům člověka, ale za cenu zvýšení spotřeby pohonné energie (ať už fosilního paliva, či elektrické). V dnešní době designéři při vývoji nového typu automobilu či jeho komponent využívají mimo jiné virtuální inženýrský proces, který je schopen predikovat, jak by se automobil choval v daném prostředí, dříve než je chování možné otestovat na prototypu vozu.

Pro různé fáze vývoje je vhodné použít různé výpočetní metody. V počáteční fázi je hlavním kritériem rychlost návrhu a s postupující fází návrhu nabývá na důležitosti přesnost návrhu.

Tepelný komfort v kabinách automobilů je hlavním tématem této disertační práce. Součástí práce je Model tepelné zátěže kabiny automobilu, který je určený pro rychlý výpočet mikroklimatu v kabině automobilu. Hlavní část práce tvoří vývoj Svázaného modelu tepelného komfortu, který slouží k rychlému vyhodnocení nehomogenního prostředí z hlediska tepelné zátěže člověka a tepelného komfortu. Oba modely by měly sloužit jako podpůrné nástroje při prvotním návrhu nového vozu a jeho klimatizační jednotky.

1.1 Vymezení cílů a limitů práce

Obsahem disertační práce „Svázení fyziologického modelu s modelem tepelného komfortu” je vývoj modelu tepelného komfortu člověka a studium vlivu vnitřního prostředí kabiny automobilu na tepelný komfort. Hlavním cílem disertační práce je vytvořit a validovat dynamický model tepelného komfortu, který je vhodný pro simulaci nehomogenního prostředí v kabinách automobilů. Důležitou součástí vývoje modelu tepelného komfortu bylo zahrnutí vlivu fyziologie člověka. Na začátku řešení byly identifikovány nejdůležitější činitele ovlivňující tepelný komfort v kabině automobilu, které pak byly zahrnuty do rozhraní Svázaného modelu tepelného komfortu. Analýza parametrů ovlivňujících tepelný komfort uvnitř kabiny automobilu vedla k potřebě vytvořit model na výpočet tepelné zátěže kabiny.

K hlavnímu cíli vytvořit a validovat Svázaný model tepelného komfortu tedy během řešení disertační práce přibyl úkol vytvořit a validovat Model tepelné zátěže kabiny. Model byl od počátku koncipován jako pomocný rychlý nástroj na vyhodnocení tepelné zátěže kabiny ve skutečných provozních podmínkách, který by byl schopen vypočítat požadovaný výkon klimatizační jednotky pro zajištění vhodného mikroklimatu. Model na základě znalosti materiálů a geometrie vozu, počasí, jízdních dat, nastavení ventilace a množství lidí uvnitř poskytuje data sloužící k predikci mikroklimatu a tepelné zátěže kabiny.

Vymezení cílů práce

- Vytvoření Svázaného modelu tepelného komfortu vhodného pro kabiny automobilů.
- Vytvoření modelu pro predikci tepelné zátěže a mikroklimatu v kabině automobilu.
- Ověření funkčnosti Svázaného modelu tepelného komfortu a jeho vhodnosti pro vyhodnocování tepelného komfortu v kabinách automobilů.
- Ověření funkčnosti Modelu tepelné zátěže kabiny.

Vymezení limitů práce

- Práce si neklade za cíl vytvořit model zohledňující individuální parametry člověka.
- Práce nemá za cíl ověřit Svázaný model tepelného komfortu pomocí vlastních měření.
- Práce neřeší vlastní propojení Svázaného modelu tepelného komfortu s Modelem tepelné zátěže kabiny.
- Přenos tepla je řešen pomocí bilančních rovnic. V práci není řešen vícerozměrný přenos tepla a nejsou použity pokročilejší výpočtové metody, jako je např. CFD.

1.2 Zvolený postup řešení

1) Literární rešerše

- a) Studium dostupných literárních pramenů k získání informací a uspořádání poznatků o problematice vnitřního prostředí kabiny automobilů.
- b) Určení důležitých parametrů ovlivňujících tepelný komfort v kabině automobilu.
- c) Rešerše modelů a simulačních nástrojů určených pro vyhodnocování vnitřního prostředí kabin automobilů.
- d) Rešerše modelů tepelného komfortu, jejich vyhodnocení a posouzení jejich použitelnosti pro prostředí kabin automobilů.

2) Přípravné práce

- a) Volba modelovacího jazyka – na základě doporučení od průmyslového partnera byl zvolen přístup 0D modelování¹, pro který je vhodný jazyk Modelica.
- b) Volba vhodného vývojového prostředí – jako vhodné prostředí pro vývoj modelů v Modelice byla zvolena Dymola.

3) Vývoj modelů v jazyku Modelica

- a) Model tepelné zátěže kabiny automobilu.
- b) Fyziologický model člověka.
- c) Model tepelného komfortu.
- d) Svázání modelu fyziologie člověka s modelem tepelného komfortu.

4) Ověření funkčnosti modelů

- a) Porovnání predikce Modelu tepelné zátěže kabiny s převzatými výsledky měření v klimatické komoře.
- b) Porovnání predikce Modelu tepelné zátěže kabiny s vlastními naměřenými daty v reálných provozních podmínkách.
- c) Porovnání predikce fyziologické části Svázaného modelu s dostupnými daty v literatuře.
- d) Porovnání predikce kompletního Svázaného modelu tepelného komfortu s dostupnými daty v literatuře a také na dalších vlastních scénářích vytvořených v programu Theseus-FE.

5) Úpravy modelů

- a) Kalibrace Modelu tepelné zátěže kabiny automobilu a opětovné porovnání s ostatními výsledky, viz body 4a, 4b.
- b) Kalibrace Svázaného modelu tepelného komfortu a opětovné porovnání s ostatními výsledky, viz body 4c, 4d.

6) Vytvoření dokumentace

- a) Dokumentace k Svázanému modelu tepelného komfortu a modelu tepelné zátěže kabiny automobilu.
- b) Vymezení podmínek pro jejich správné použití.

¹ 0D modelování označuje bilanční přístup výpočtu ve výpočetních uzlech, kde jedinou uvažovanou dimenzí je čas. Nejedná se 1D přístup, neboť neprobíhá spojitý výpočet přenosu tepla ani podél jediné prostorové osy.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Vnitřní prostředí kabin automobilů

Problematickou návrhu vhodného vnitřního prostředí v kabinách automobilů se zabývalo několik výzkumných projektů, např. JTI (Bohm a kol., 2002) nebo Cool Car (Rugh a Farrington, 2008). Oba projekty prokázaly možnosti snížení tepelných zisků i ztrát kabiny (tím i energie nutné na klimatizování) pomocí nejrozličnějších technických opatření (např. automatická regulace klimatizační jednotky), konstrukčních úprav kabiny (např. návrh výustek – umístění, velikost a tvar) či využitím specifických materiálů (např. reflexivní laky či skla). Rozhodujícím faktorem ovlivňujícím mikroklima v kabině automobilu jsou parametry vzduchu přiváděného z klimatizační jednotky. Podstatné jsou teplota, vlhkost, směr a rychlost přiváděného vzduchu. Popis proudění uvnitř kabiny je zásadní pro vyhodnocení mikroklimatu a tepelného komfortu v kabině. Výpočet proudění pomocí CFD simulace se stává běžnou praxí, avšak CFD výpočty vyžadují mnoho času na přípravu 3D geometrie, sítě a vlastní simulaci. Pokud je rozhodujícím kritériem čas návrhu, je nutné zvolit méně přesné 0D či 1D modelování. (Arici a kol., 1999) vyvinuli designérský nástroj pro návrh klimatizační jednotky na základě výpočtu tepelné zátěže kabiny vozidla. (Konz, 2002) vyvinul dynamický model tepelné zátěže kabiny vozu pro studium různých strategií větrání. (Wagner, 2009) představil rychlou metodu na predikci tepelné zátěže a predikci teploty vzduchu uvnitř kabiny pomocí parametrického modelu kabiny. V automobilovém průmyslu se pro návrhy kabiny a jejího větrání používají komerční výpočetní programy, např. Theseus-FE či RadTherm

2.2 Tepelný komfort

Hlavní činitele, které ovlivňují tepelný komfort člověka ve vnitřním prostředí budov, jsou dle Fangerova rozděleny na činitele prostředí a činitele osobní. V prostředí kabin dopravních prostředků má nezanedbatelný vliv rovněž intenzita dopadajícího slunečního záření, kontakt člověka se sedadlem a doba, po kterou je člověk vystaven danému prostředí. V daném prostředí, pro danou intenzitu činnosti a tepelný odpor oděvu je tepelný komfort navíc ovlivněn doplňujícími činiteli souvisejícími s fyziologickými faktory (pohlaví, věk, tělesná konstituce, množství tuku, hmotnost, úroveň aklimatizace apod.), ale i psychologickými (únava, stres, očekávání apod.).

a) Činitelé prostředí

- | | | |
|-----------------------------|-----------|-------|
| • Teplota vzduchu | T_a | [°C] |
| • Střední radiační teplota | T_r | [°C] |
| • Relativní vlhkost vzduchu | φ | [%] |
| • Rychlost proudění vzduchu | v | [m/s] |

b) Činitelé osobní

- | | | | | |
|---|----------|---------------------------------------|----------|-------|
| • Tepelný odpor oděvu | R_{cl} | [m ² ·K·W ⁻¹], | I_{cl} | [clo] |
| • Metabolická produkce tepla (intenzita činnosti) | M | [W·m ⁻²], | M | [met] |

Z důvodů zjednodušení popisu prostředí z hlediska tepelné výměny byly zavedeny pomocné fyzikální veličiny, které zahrnují více vlivů prostředí dohromady, viz příručka ASHRAE (American Society of Heating, 2001). Mezi nejznámější patří: operativní teplota T_o , ekvivalentní teplota T_{eq} , efektivní teplota ET^* , standardní efektivní teplota SET^* a teplota

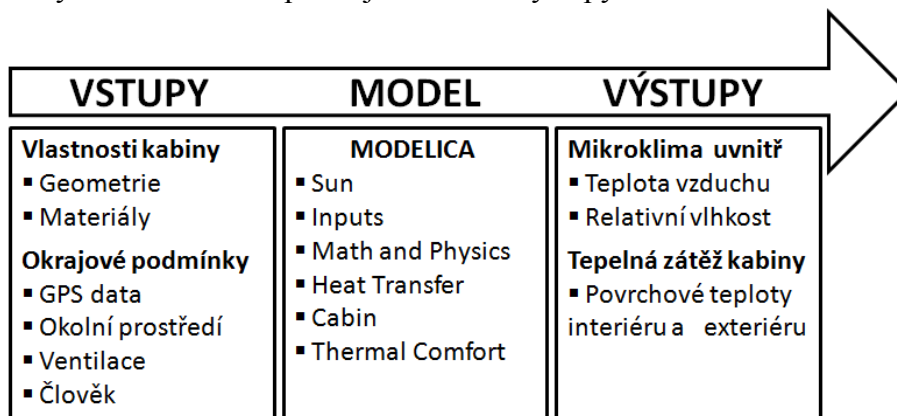
mokrého a kulového teploměru WBGT (Wet Bulb Globe Temperature). Na základě těchto veličin bývají stanoveny doporučené, případně zákonem povolené limity pro různá prostředí a různé činnosti. Tyto limity se mohou lišit dle legislativy jednotlivých zemí. V ČR se hodnocením kvality pracovního prostředí (zejména budov) zabývá nařízení vlády č. 68/2010 Sb., které obsahuje předepsané rozmezí veličin zvláště pro zimní a letní období (operativní teplota, relativní vlhkost, rychlost proudění apod.).

Pokročilejší způsoby modelování tepelného komfortu zahrnují model fyziologie člověka, jehož úlohou je predikovat tepelný stav člověka a jeho reakce na okolní prostředí. (Wissler, 1964) vytvořil jeden z prvních vícesegmentových modelů člověka, lidské tělo rozdělil na 15 segmentů. Na přelomu 60. a 70. let se výzkum v oblasti modelování fyziologie člověka začal zabývat tím, jak funguje nervový systém člověka a jeho termoregulace. (Stolwijk a Hardy, 1966) patřili mezi první autory, kteří se zabývali termoregulací člověka a na základě svých experimentů vytvořili 6 segmentový, 25 uzlový model člověka s termoregulací (Stolwijk a kol., 1971). Gagge zjednodušil Stolwijkův model na jednosegmentový s pouze dvěma výpočetními uzly (jádro a kůže) a využil ho pro predikci tepelné pohody pomocí indexů TSENS a DISC (Gagge a kol., 1986). Klíčovou otázkou pro uplatnění modelů v praxi je jejich validace, mezi nejlépe validované modely patří Fialův model (Fiala, 1998, Fiala a kol., 1999, Fiala a kol., 2001). (Kingma, 2011) navrhl rozšíření aktivního systému Fialova modelu o podrobný model šíření signálů z termoreceptorů a jejich vyhodnocení. V roce 2012 Fiala publikoval rozšíření Fialova modelu, tzv. UTCI-Fialův model (Fiala a kol., 2012), který byl oproti původnímu rozšíření o nastavení individualizované postavy a další vstupy modelu, jako je intenzita dýchání, stupeň aklimatizace apod. Výstupem modelu je tzv. UTCI (Universal Thermal Climate Index), který zahrnuje veškeré vlivy prostředí dohromady a je snahou, aby se stal standardním ukazatelem podobně jako efektivní teplota EF^* . Z tohoto důvodu vědecký tým vedený Psikutou provedl nezávislá validační měření (Psikuta a kol., 2012), která potvrdila platnost UTCI-Fialova modelu. Modely Stolwijkova typu mají oproti Fialově jednu výhodu, a to relativní jednoduchost matematického popisu. Ze Stolwijkova modelu vycházeli další autoři např. (Huizenga a kol., 2001), či (Tanabe a kol., 2002). Propojením Tanabeho fyziologického modelu a modelu komfortu dle Zhang se zabývala (Streblow, 2010), jejíž práce byla zaměřena na vyhodnocování tepelného komfortu na palubě letadel. Její práce se stala inspirací pro vývoj Svázaného modelu tepelného komfortu.

Problematikou tepelného komfortu a vlivu okolního prostředí na člověka se dlouhodobě zabýval Ole Fanger, který na začátku 70. let specifikoval základní a doplňující faktory ovlivňující tepelný komfort ve vnitřním prostředí budov. Výsledkem jeho práce jsou využity v normě ČSN EN ISO 7730 – Mírné tepelné prostředí – Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody. Jiný přístup zvolil (Gagge a kol., 1986), který využil svůj fyziologický model pro predikci střední teploty pokožky a míru pokrytí pokožky potem. Na základě predikce fyziologického modelu byl vypočten index tepelného pocitu TSENS a index tepelného diskomfortu DISC. Součástí Fialova modelu je index dynamického tepelného pocitu DTS (Fiala a kol., 2003), který je použitelný i pro časově proměnné podmínky. Index reprezentuje celkový tepelný pocit, který je závislý na střední teplotě pokožky, její časové změně a teplotě tělesného jádra. Mezi nejnovější modely tepelného komfortu patří model (Zhang, 2003) a jeho revidovaná verze (Zhang a kol., 2010a, Zhang a kol., 2010b, Zhang a kol., 2010c), který velice podrobně popisuje psychologické aspekty vnímání tepelného komfortu.

3 MODEL TEPELNÉ ZÁTĚŽE KABINY AUTOMOBILU

Predikce tepelné zátěže kabiny je důležitá pro návrh klimatizační jednotky a predikce vnitřního mikroklimatu pro vyjádření tepelného komfortu. Na obr. 3.1 je uvedeno schéma rozhraní modelu: nalevo jsou uvedeny hlavní vstupy modelu, uprostřed je seznam hlavních částí modelu kabiny v Modelice a napravo jsou hlavní výstupy modelu.



Obr. 3.1 – Ideové schéma struktury modelu tepelné zátěže kabiny a jeho rozhraní. Vlevo vstupy modelu, uprostřed jednotlivé části kódu (moduly) v Modelice, a napravo výstupy modelu.

Vstupy modelu:

- vlastnosti kabiny automobilu, specifické pro daný typ vozu – geometrie a materiály
- okrajové podmínky, charakterizující konkrétní jízdu a podmínky během ní – GPS data (rychlost, poloha a orientace vozu), okolní prostředí (teplota vzduchu, relativní vlhkost, intenzita slunečního záření), ventilace (množství přiváděného vzduchu, jeho teplota a relativní vlhkost), člověk (počet osob v kabině)

Výstupy modelu:

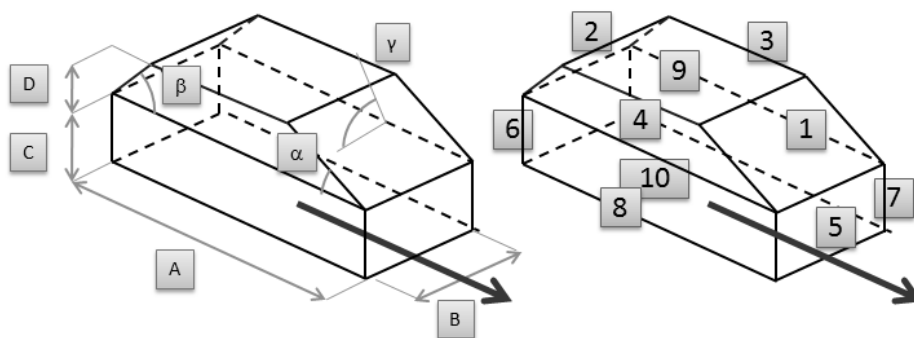
- predikce tepelné zátěže – povrchové teploty interiéru a exteriéru kabiny, tepelné toky vstupující do kabiny. Na základě predikce tepelné zátěže lze určit potřebné množství energie, které je potřeba dodat klimatizováním
- predikce mikroklimatu – teplota a relativní vlhkost vzduchu (pouze střední hodnota)
- odhad tepelného komfortu dle modelu PMV-PPD

Model byl implementován do jazyka Modelica v prostředí Dymola, viz kapitola 4. Pro řešení sestavených rovnic byl použit numerický řešič DASSL. Model tepelné zátěže kabiny je rozdělen do šesti hlavních modulů:

- **Cabin**, který pracuje s definicí geometrie a materiálů, tj. normály jednotlivých povrchů kabiny, jejich plocha, tloušťka a materiálové vlastnosti. Geometrie exteriéru je definovaná parametricky pomocí 4 rozměrů a 3 úhlů. Geometrie interiéru není uvažována explicitně, tj. nejsou definovány přesně orientace jednotlivých ploch jako u exteriéru. Parametrizace umožňuje výpočet přenosu tepla radiací mezi okolím a kabinou.
- **Sun**, který slouží k výpočtu polohy Slunce na obloze a k určení teoretických hodnot intenzity slunečního záření.
- **Inputs**, který obstarává načtení všech vstupních dat z .txt souborů, obsahuje okrajové podmínky (meteorologická data, ventilace, GPS data, počet osob), ale také definici geometrie a materiálů.

- **Math and Physics** je pomocná knihovna pro definici použitých matematických operací a fyzikálních empirických vztahů.
- **Heat Transfer** je stěžejní modul, který obsahuje všechny bilanční rovnice popisující přenos tepla v kabině automobilu. Modul je nadřazený všem ostatním a používá jejich data k výpočtu mikroklimatu a tepelné zátěže kabiny automobilu.
- **Thermal Comfort** je přídatný modul, který obsahuje výpočet tepelného komfortu dle modelu PMV-PPD. Hodnoty spočítané tímto modelem jsou pouze orientační, neboť tento model není vhodný pro aplikaci v kabině automobilu.

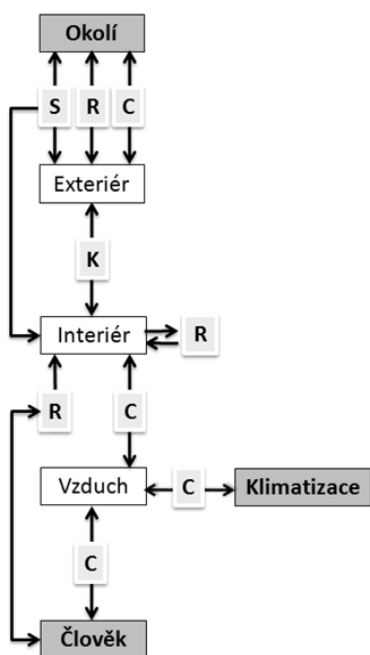
Model vznikl za účelem vytvoření rychlého výpočetního nástroje pro predikci tepelné zátěže kabiny a vnitřního prostředí během reálných provozních podmínek, byl zvolen 0D přístup modelování přenosu kombinovaný s parametrizovanou 3D geometrií. Model řeší tepelnou výměnu kabiny s vnějším okolím, prostup tepla a přestup tepla uvnitř kabiny pomocí bilančních rovnic tepelné rovnováhy. Pro řešení přenosu tepla radiací (jak krátkovlnnou, tak dlouhovlnnou) model využívá parametrizovanou 3D geometrii, která je definována pomocí délek a úhlů charakterizující exteriér kabiny, interiéru kabiny nebyl plně parametrizován. Díky 3D geometrii lze např. uvažovat vliv orientace vozu vůči slunci na tepelnou bilanci kabiny. Skutečná geometrie kabiny je zjednodušena pomocí parametrické geometrie viz obr. 3.2. Geometrie exteriéru kabiny je definována pomocí sedmi parametrů: α – sklon čelního skla, β – sklon zadního skla, γ – sklon bočního skla, A – délka, B – šířka, C – výška výplně dveří a D – výška prosklené části. Parametrizovaná geometrie umožňuje simulaci přenosu tepla radiací, rovněž je možné přibližně určit objem vzduchu v kabině a povrchy jednotlivých částí kabiny. Geometrie exteriéru kabiny je rozdělena do deseti částí: 1 – čelní sklo, 2 – zadní sklo, 3 – levé boční sklo, 4 – pravé boční sklo, 5 – přední přepážka, 6 – zadní dveře, 7 – levé boční dveře, 8 – pravé boční dveře, 9 – strop, 10 – podlaha (včetně předních sedadel).



Obr. 3.2 – Parametrický model geometrie kabiny automobilu: nalevo parametry definující rozměry kabiny, napravo jednotlivé povrchy kabiny.

Model kabiny se skládá ze soustavy bilančních rovnic popisující zákony zachování energie a hmoty a tepelné rovnováhy ve výpočetních uzlech. V modelu se vyskytují tři typy uzlů: Exteriér, Interiér a tzv. Air zone neboli zóna s konstantním objemem vzduchu, které jsou propojeny s okrajovými podmínkami. V modelu jsou tři typy okrajových podmínek: Okolní prostředí, Klimatizace a ventilace a Člověk. Přenos tepla je tedy řešen zvláště pro vnější a vnitřní povrchy. Exteriér se skládá z deseti individuálních povrchů a každému z nich přísluší rovněž povrch interiéru. Uvnitř kabiny je uvažován pouze jeden objem vzduchu, v kterém je uvažováno dokonalé mísení vzduchu popsané zákonem zachování hmoty. Dohromady tedy

model čítá 22 bilančních rovnic: Tepelná rovnováha 10x Exteriér, 10x Interiér a 1x Air zone + 1x zákon zachování hmoty.



Obr. 3.3 – Schéma přenosu tepla v kabině automobilu.

R – radiace, S – sluneční záření, C – konvekce, K – vedení

Model uvažuje přenos tepla konvekcí a vedením jako jednorozměrný s akumulací tepla uvnitř výpočetních uzlů interiéru, exteriéru a objemu vzduchu. Ale pro výpočet radiace (tj. dopadající slunečního záření a tepelné záření povrchů) model využívá 3D parametrizované geometrie a tím zohledňuje vliv vzájemné polohy povrchů vozu vůči slunci a vůči sobě.

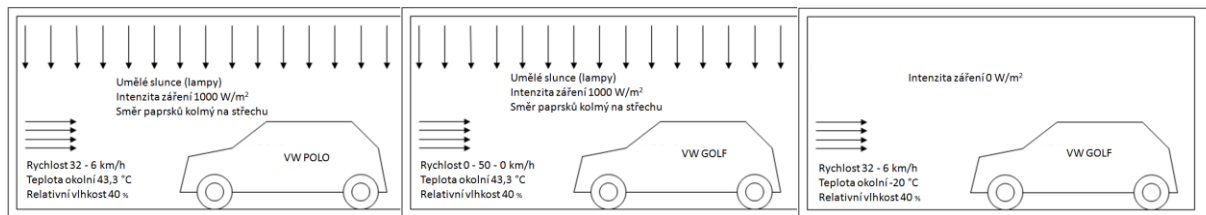
Relativní vlhkost vzduchu v kabině je určena z rovnice mísení přívodního vzduchu se vzduchem v kabině, vycházející ze zákona zachování energie (v tomto případě zachování entalpie vzduchu). Výsledkem modelu je tedy predikce mikroklimatu v kabině, tj. teploty a relativní vlhkosti vzduchu, dále pak povrchové teploty jednotlivých částí exteriéru a interiéru a jednotlivé tepelné toky mezi výpočetními uzly, a tím i celkovou tepelnou zátěž kabiny. Na základě znalosti oděvu lze pak odhadnout i tepelný pocit dle modelu PMV-PPD.

Model byl validován na základě převzatých měření v klimatické komoře a vlastních měření ve skutečném provozu. Měření v klimatické komoře poskytla spolupracující firma, pro vlastní měření ve skutečném provozu byl použit vůz Škoda Felicia Combi.

3.1 Validace modelu – převzaté měření v klimatické komoře

V klimatické komoře byly měřeny scénáře vytápění a chlazení kabiny automobilu v extrémních klimatických podmínkách. Na obr. 3.4 jsou stručně specifikovány všechny důležité okrajové podmínky, které byly v klimatické komoře během jednotlivých experimentů. Jednalo se o dva scénáře chlazení rozehřáté kabiny VW Polo a VW Golf v extrémně horkém prostředí o teplotě 43,3 °C. Klimatická komora byla navíc na stropě vybavena umělým sluncem, které během těchto dvou experimentů zahřívalo kabinu vozu zářením o intenzitě 1000 W/m². Třetí scénář byl určený na testování vytápění vozu VW Golf

v extrémně chladném prostředí o teplotě $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Porovnání výsledků je uvedeno v plné verzi disertační práce.



Obr. 3.4 – Přehled scénářů naměřených v klimatické komoře: (zleva) chlazení kabiny VW Polo, chlazení kabiny VW Golf a vytápění kabiny VW Golf

3.2 Validace modelu – vlastní měření v reálném provozu

Předešlé výsledky měření byly převzaty v rámci společné spolupráce s hospodářským partnerem. Během tvorby simulací a analýzy jejich výsledků se ukázalo, že poskytnutá data nebyla plně dostačující pro kalibraci Modelu tepelné zátěže kabiny. Hlavním nedostatkem se ukázala neznalost povrchových teplot kabiny. Navíc pro lepší pochopení dějů, které se odehrávají v kabině automobilu při různých provozních podmínkách, je vhodné použít naměřená data ze skutečného provozu.

Z těchto důvodů byl vytvořen návrh vlastního měření pro získání okrajových podmínek a dat pro kalibraci a validaci modelu v reálných provozních podmínkách. Pro měření byl využit osobní vůz Škoda Felicia Combi tmavě modré barvy, na němž byla nainstalována měřicí technika. Pomocí ní byly zaznamenávány okrajové podmínky – poloha vozu (GPS data pro určení orientace vozu, rychlost vozu, nadmořská výška), teplota venkovního vzduchu a parametry vzduchu přiváděného do kabiny. Pro validační účely byly sledovány a měřeny vybrané parametry vnitřního prostředí kabiny automobilu, např. teplota a relativní vlhkost vzduchu v kabině, střední radiační teplota a některé povrchové teploty.

Byla provedena sada vlastních měření pro různé provozní podmínky tak, aby pokryla většinu typických provozních situací: parkování a jízdu během letního, podzimního a zimního období. Jízdní okruh zahrnoval městský provoz, jízdu mimo město a jízdu po dálnici. Celkem byly naměřeny čtyři scénáře parkování během letního období (v práci jsou prezentovány pouze dva) a tři jízdní scénáře během podzimu a zimy². Letní scénáře byly provedeny ve dnech 12–16. 9. 2011 na parkovišti v areálu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Typický parkovací scénář trval zhruba 24 hodin s jednohodinovou přestávkou na uložení dat a kontrolu nastavení měřicí techniky. Podzimní a zimní jízdní testy byly provedeny v okolí Brna, na cestě z Brna do Vyškova a zpět ve dnech 13. a 20. 10. 2011 a 26. 1. 2012. Jízdy trvaly v průměru dvě hodiny okolo poledne zhruba od 11:00 do 13:00. Vlastní sestavení měřicí techniky měl na starosti Ing. Fišer, PhD a pod jeho vedením byla provedena všechna měření v kabině vozu Škody Felicia.

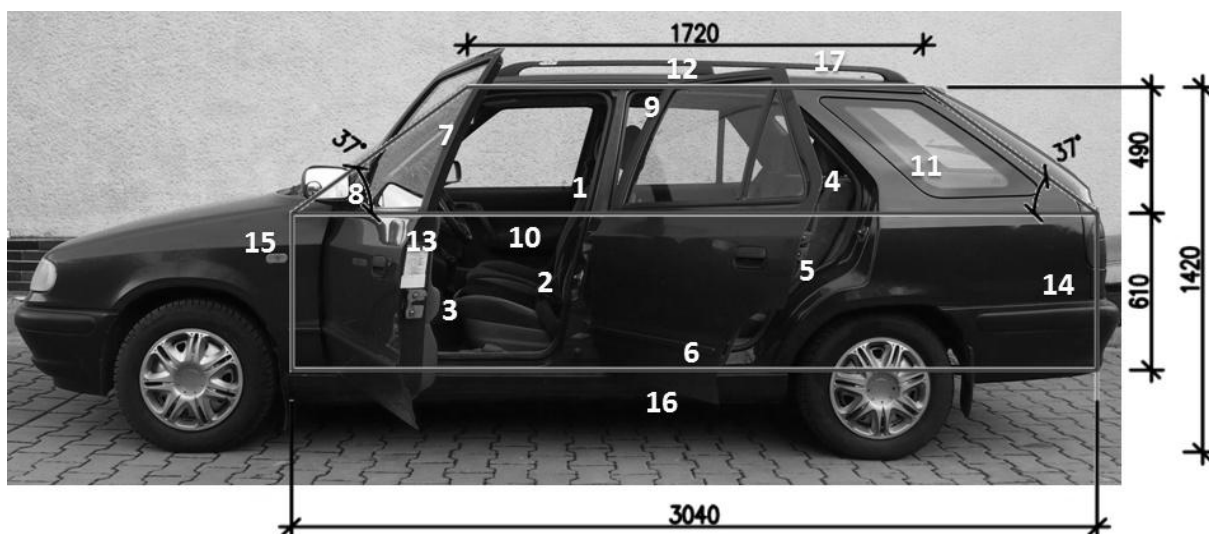
Popis měření

Jako testovací vůz byla zvolena Škoda Felicia Combi s tmavě modrým lakem, která je znázorněna na obr. 3.5 společně s charakteristickými rozměry. Základní parametry geometrie (úhly a rozměry) kabiny byly definovány na základě měření následovně: sklon čelního skla

² V těchto tezích jsou uvedeny pouze tři scénáře: parkování 12. 9. 2011, jízdy 13. 10. 2011 a 26. 1. 2012

$\alpha = 37^\circ$, sklon zadního skla $\beta = 37^\circ$, sklon bočních skel $\gamma = 66^\circ$, délka kabiny $A = 3,04$ m, šířka kabiny $B = 1,46$ m, výška dveří $C = 0,61$ m, výška oken $D = 0,49$ m.

Čelní a zadní sklo bylo předpokládáno 100% prosklené a poměr prosklení bočních skel byl uvažován 65 % (tj. 35 % plochy oken tvoří sloupky dveří). Kromě parametrů geometrie exteriéru byly uvažovány i některé rozměry interiéru: délka kufru 0,675 m, délka sedací plochy 0,4 m, výška zadní sedací plochy 0,32 m, tloušťka sedadel 0,16 m, délka palubní desky 0,415 a její výška 0,365 m. Na základě těchto parametrů byly definovány veškeré uvažované plochy kabiny a také objem vzduchu v kabině. Pro neobsazenou kabinu vozu Škoda Felicia Combi je objem vzduchu v kabině přibližně $V_A = 2,63 \text{ m}^3$, neboť objem parametrizované geometrie je $3,84 \text{ m}^3$ a objem vybavení interiéru (palubní deska, přední a zadní sedadlo) a kufru je $1,21 \text{ m}^3$.



Obr. 3.5 – Testovací vůz Škoda Felicia s parametrizovanou geometrií (červená) a charakteristickými rozměry kabiny (černé kóty-hodnoty v mm). Bílá čísla 1-17 znázorňují umístění měřicích sond, jejich popis je v tab. 6.4.

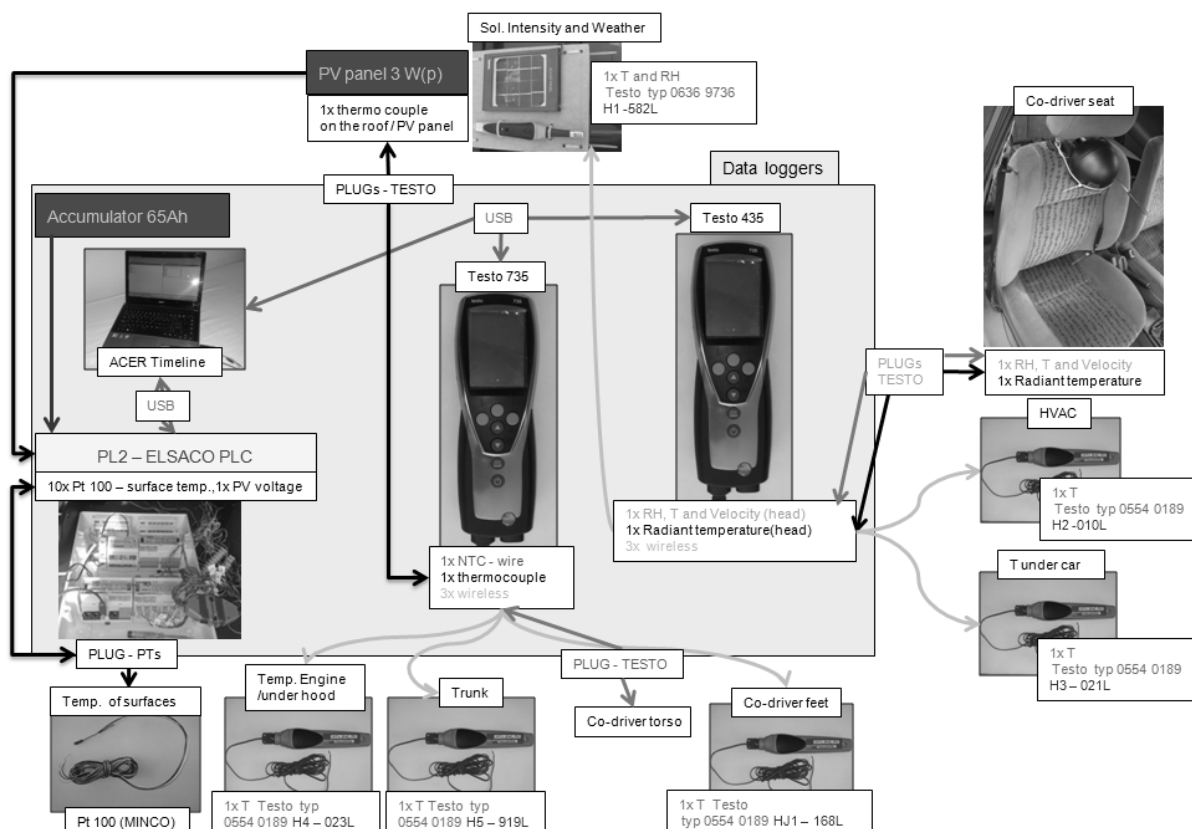
Tab. 3.1 – Umístění měřicích sond a měřené veličiny: C – Testo s kombinovanými sondami, G – kulový teploměr, P – odporový teploměr PT100, T – termočlánek, V – fotovoltaiický (PV) panel. Pro měření rychlosti auta, azimutu a polohy byl navíc využit GPS modul.

	Sedadlo spolujezdce			Sedadlo vlevo vzadu			Povrchy exteriéru a interiéru						Okrajové podmínky				
	Hlava	Trup	Nohy	Hlava	Trup	Nohy	Čelní sklo	Palubní deska	Střeška	Pravé dveře	Pravé sklo	Střeška ext.	Vyústky	V kufru	Pod kapotou	Podvozek	Střešní panel
Měřené veličiny	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Teplota vzduchu	C	C	T	P	P	P	-	-	-	-	-	-	T	T	T	T	C
Povrchová teplota	-	P	-	-	-	-	P	P	P	P	P	T	-	-	-	-	T
Rychlost vzduchu	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C	-	-	-	-
Relativní vlhkost	C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	C
Teplota kulového teploměru	G	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Intenzita slunečního záření	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	V

Dále jsou na obr. 3.5 znázorněny a očíslovány (bíle) umístění použitých měřicích sond a v tab. 3.1 jsou uvedeny typy těchto sond společně s popisy měřených veličin. Tabulka obsahuje dva typy dat: validační data body 1-12 a okrajové podmínky body 13-17. Jelikož model kabiny uvažuje v současné podobě pouze jeden objem vzduchu, byla pro účely

porovnání výsledků vypočtena střední hodnota teploty vzduchu v kabině. Ta byla vypočtena jako aritmetický průměr šesti naměřených teplot vzduchu na místě spolujezdce (body 1-3) a na místě vlevo vzadu (body 4-6).

Pro měření byla použita následující měřicí technika: datové ústředny Elsaco - PLC, Testo 435 a Testo 735, notebook Acer, fotovoltaický panel, kulový teploměr, sada termočlánku a odporových teploměrů, GPS modul, bezdrátové rukojeti a kombinované sondy od firmy Testo (jedno-, dvoj- a trojkombinované) a akumulátor. Propojení měřících senzorů s datovými jednotkami Testo, Elsaco-PLC a notebookem Acer je uvedeno v následujícím schématu, viz obr. 3.6.



Obr. 3.6 Schéma zapojení měřící techniky

Poloha vozu a jeho rychlost byla zaznamenávána mobilním telefonem Nokia 6220 s vestavěným GPS modulem pomocí programu Nokia Sporttracker. GPS modul poskytoval informace o aktuální poloze automobilu a jeho rychlosti každých 0,25 s. K měření intenzity globální slunečního záření na vodorovnou plochu sloužil kalibrovaný Fotovoltaický (PV) panel umístěný na střeše (viz bod 17 na obr. 3.6). PV panel byl kalibrován na základě změřeného výkonu a znalosti typické intenzity slunečního záření pro bezoblačnou oblohu v daném období pro Brno dle (Cihelka, 1994). Pro kalibraci bylo vybráno měření ze dne 14. 9., poněvadž v ten den byla po celý den jasná obloha. Protože účinnost fotovoltaického jevu je závislá na teplotě, byla během kalibrace sledována také povrchová teplota PV panelu pomocí termočlánku.

Ostatní teploty byly měřeny buď kombinovanými sondami, termočlánky či odporovými teploměry PT-100. Pouze pro měření střední radiační teploty byl použit kulový teploměr, který se ovšem vyznačoval velkou setrvačností měření. Reakční doba kulového teploměru na

změnu okolních podmínek byla velmi pomalá (až půl hodiny). Kombinované sondy kromě teploty vzduchu měřily i jeho relativní vlhkost a rychlost proudění vzduchu.

Všechny odporové teploměry PT-100 a PV panel byly napojeny na jednotku Elsaco-PLC pomocí drátků. Elsaco-PLC poskytovala data každých 5 s a jejich aktuální hodnoty bylo možné během měření sledovat on-line na Notebook Acer, pomocí řídicího software FRED.

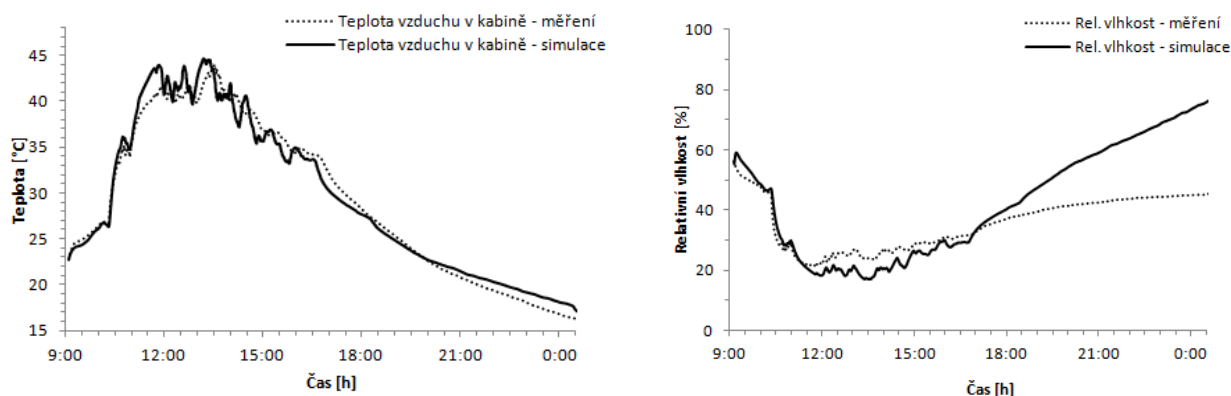
Termočlánky a kombinované sondy byly propojeny s datovými jednotkami Testo 435 a 735, které zaznamenávaly měřená data každých 6 s. V případě termočlánků byly využity pro méně dostupná místa (kufr, prostor motoru a na střeše) tzv. bezdrátové rukojeti.

Po skončení bylo potřeba vyhodnotit a zpracovat data v Excelu tak, aby je bylo možno zadat do Modelu tepelné zátěže kabiny. Naměřená sada dat byla filtrována a časově synchronizována s periodou 30 s a převedena do souboru ve formátu .csv odděleného středníky. Poté byla data konkrétního scénáře uložena do vstupního souboru TimeTable.txt, který slouží jako rozhraní modelu pro načtení okrajových podmínek.

Porovnání výsledků měření a simulace

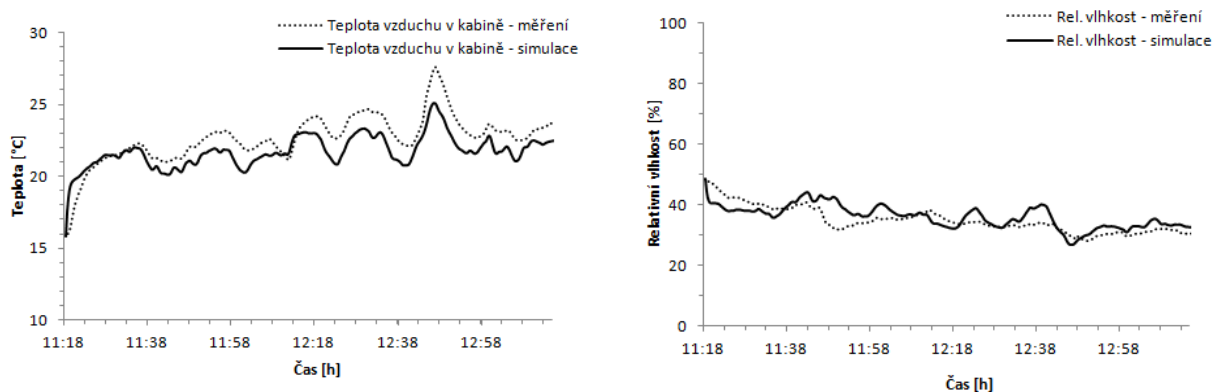
Vlastní měření provedená ve skutečném venkovním prostředí jsou dvojího druhu: parkování a jízda. Měření na zaparkovaném automobilu mělo význam zejména pro kalibraci modelu, neboť do modelu vstupuje menší množství parametrů a bylo možné snáze identifikovat případné nedostatky modelu. Při dlouhodobém stání (parkování) mezi nejdůležitější okrajové podmínky patří intenzita slunečního záření a teplota okolního prostředí a vzduchu. Při skutečné jízdě se přidávají další důležité okrajové podmínky: ventilace – teplota a množství přiváděného vzduchu, rychlost vozu a aktuální azimut jízdy. Jedná se tedy o podstatné navýšení vstupních hodnot, a tím i složitosti modelu.

Na obr. 3.7 je uvedeno porovnání výsledků modelu a měření parkování dne 12. 9., kdy bylo slunné letní počasí se slabým vánkem a téměř jasnou oblohou (20% pokrytí oblohy mraky). Maximální hodnota intenzity slunečního záření dosahovala 650 W/m^2 při jasné obloze a teplota okolního vzduchu se pohybovala od 16°C (ráno) do 25°C (odpoledne). Auto bylo stíněno okolními budovami ráno do 10:00 a odpoledne od 16:00. Střední teplota vzduchu v kabině byla určena jako aritmetický průměr šesti teplot na místě spolujezdce a zadním sedadle v oblasti hlavy, trupu a nohou, viz body 1 až 6 na obr. 3.5. Predikce teploty vzduchu v kabině je velice dobrá a rozdíl mezi predikcí a měřením je povětšinou do 2°C . Pouze v době kolem poledne jsou rozdíly o něco větší, neboť ve chvíli, kdy intenzita slunečního záření je maximální, je patrná vyšší citlivost modelu na změnu intenzity slunečního záření (kabina se dle modelu o něco rychleji ohřívá a chladí než ve skutečnosti). Naopak v nočních hodinách vychází predikce o něco menší, a to kvůli předpokladu, že střední radiační teplota okolí se rovná teplotě okolního vzduchu. Na stejném obrázku vpravo je porovnání relativní vlhkosti. Relativní vlhkost v kabině klesá během dne až k 20-30 %, jak dle modelu, tak i skutečnosti. Ale během noci měřená relativní vlhkost v kabině stoupá pouze k 40 %, a to navzdory skutečnosti, že relativní vlhkost okolního prostředí stoupá během noci až k 80 % (přes den byla relativní vlhkost venkovního vzduchu 40 %). To znamená, že v kabině musí docházet k poněkud jinému procesu, pravděpodobně kondenzaci a následnému odvedení vlhkosti. V modelu není tento proces brán v úvahu, a tudíž relativní vlhkost v kabině dle modelu narůstá během noci také k 80 %, což je v důsledku značného poklesu teploty vzduchu v kabině až na teplotu okolního vzduchu.



Obr. 3.7 – Porovnání výsledků měření a simulace střední teploty vzduchu a relativní vlhkosti v kabině – scénář 12. 9. 2011

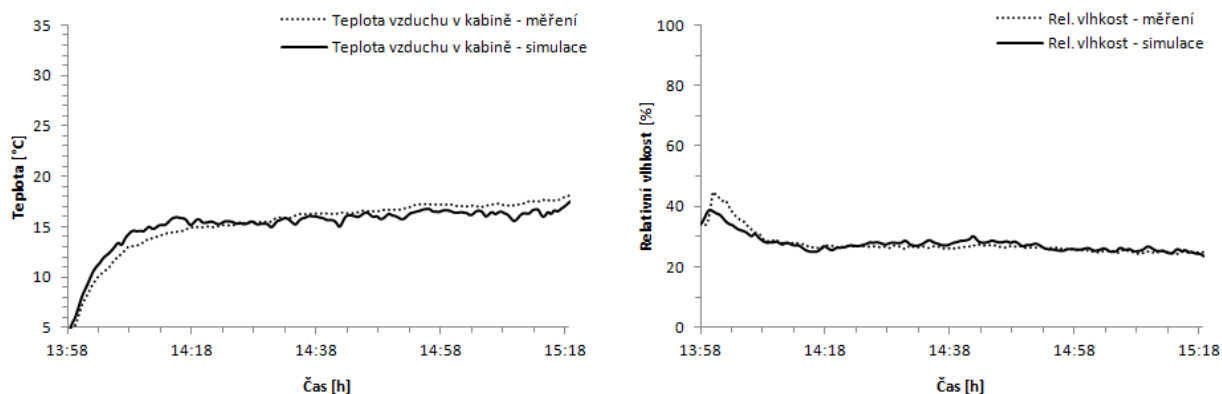
Na obr. 3.8 je uvedeno porovnání výsledků modelu a měření jízdy dne 13.10, kdy bylo počasí bez srážek a obloha téměř úplně zatažená (90% pokrytí oblohy). Pouze na pár okamžiků se mraky rozestoupily a vysvitlo Slunce, viz „peaky” 500 W/m^2 . Teplota okolního vzduchu, která se pohybovala mezi 11 až $16,5^\circ\text{C}$. Po celou dobu jízdy byla spuštěna ventilace a otáčky ventilátoru byly nastaveny na 2/4 stupeň, což odpovídalo 20-30 l/s přiváděného vzduchu. Kromě ventilace bylo spuštěné i vytápění na 1/4 stupeň, takže do kabiny vstupoval ohřátý teplý vzduch o teplotě 24 až 31°C . Vliv intenzity slunečního záření na teplotu vzduchu uvnitř kabiny je oproti parkování méně podstatný, ale není zanedbatelný. Pokud auto na chvíli zpomalilo, např. na křižovatce, a zrovna vysvitlo Slunce, teplota v kabině rychle stoupala, viz teplota vzduchu v čase 12:38 na obr. 3.8 vlevo. Predikce teploty se liší v průměru o $1,5^\circ\text{C}$, v čase 12:48 je predikce dokonce až o $2,5^\circ\text{C}$ nižší. Naopak relativní vlhkost vychází velice dobře.



Obr. 3.8 – Porovnání výsledků měření a simulace střední teploty vzduchu a relativní vlhkosti v kabině – scénář 13.10.2011

Na obr. 3.9 je uvedeno porovnání výsledků modelu a měření jízdy dne 26.1, kdy bylo chladno a obloha byla úplně zatažená (100% pokrytí oblohy), ale bez srážek. Intenzita slunečního záření měla pouze difúzní charakter a její průměrná hodnota byla 48 W/m^2 . Venkovní teplota vzduchu byla po celou dobu okolo bodu mrazu a její průměrná hodnota byla $0,5^\circ\text{C}$. Relativní vlhkost okolního vzduchu se pohybovala okolo 57 %. Průměrná rychlost během testovací jízdy byla 54,6 km/h a maximální 86,8 km/h. V autě byly dvě osoby, ventilace a vytápění byly nastaveny na 2/4 stupeň po celou dobu jízdy. Průměrné množství přiváděného vzduchu bylo 27 l/s a po 10 minutách se jeho teplota ustálila zhruba na 36°C . Rychlost vzduchu v oblasti výústek lehce kolísala v závislosti na rychlosti jízdy okolo

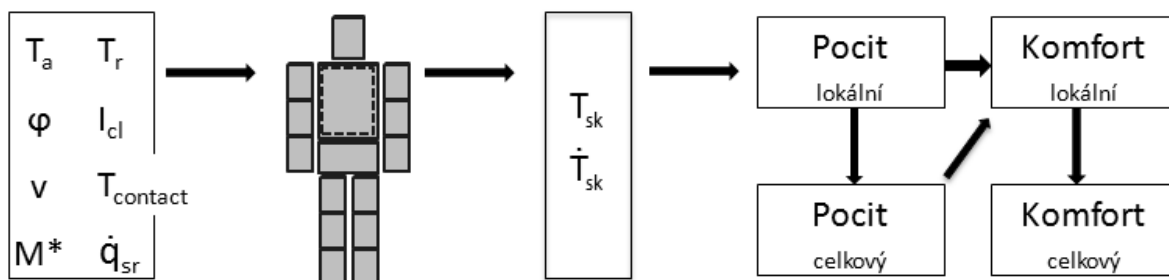
hodnoty 3,3 m/s, avšak dále od vyústek byla její hodnota podstatně nižší, např. v oblasti hlavy spolujezdce dosahovala v průměru 0,13 m/s. Z porovnání výsledků vyplývá, že predikce střední teploty vzduchu a jeho relativní vlhkosti je velice dobrá. Během zimního měření byly nejchladnějšími vnitřními povrchy skla, neboť mají nízký tepelný odpor. Podobně jako povrchové teploty vnějších povrchů jsou nejvíce ovlivněny teplotou okolního vzduchu a rychlostí vozu. Např. teplota vnějšku střechy po započetí jízdy a 30 minutách klesla z počátečních 7 °C na teplotu okolního vzduchu 1 °C.



Obr. 3.9 – Porovnání výsledků měření a simulace střední teploty vzduchu a relativní vlhkosti v kabině – scénář 26.1.2012

4 SVÁZANÝ MODEL TEPELNÉHO KOMFORTU

Svázaný model propojuje modifikovaný Tanabeho fyziologický model s modelem tepelného komfortu dle Zhang. Výběr modelů vzešel z vypracované rešerše. Vstupem do Svázaného modelu komfortu jsou hlavní činitele ovlivňující tepelný komfort ve vnitřním prostředí: teplota vzduchu T_a , střední radiační teplota T_r , relativní vlhkost ϕ , rychlost proudění vzduchu v , tepelný odpor oděvu I_{cl} – tyto veličiny jsou definovány pro jednotlivé segmenty zvlášť). Celková metabolická produkce tepla M odvíjející se od fyzické náročnosti činnosti je zadána jako jedna hodnota. V případě prostředí kabin automobilů je důležité uvažovat také intenzitu slunečního záření dopadajícího na povrch člověka $\dot{q}_{sr}$ a také případný kontakt člověka s okolním povrchem (např. sedadla). V případě kontaktu částí těla (např. oblasti pánve a zad) s okolním povrchem je rozhodující teplota tohoto povrchu $T_{contact}$.



Obr. 4.1 – Schéma propojení Tanabeho a Zhang modelu. Nalevo vstupy do fyziologického modelu, uprostřed veličiny vstupující do modelu tepelného komfortu (* označuje globální parametry, které jsou definovány pro člověka jako celek, nikoliv pro jednotlivé části lidského těla).

Na obr. 4.1 je znázorněno schéma propojení modifikovaného Tanabeho modelu s modelem dle Zhang. Nalevo jsou zobrazeny vstupní parametry do fyziologického modelu, který vyhodnocuje časový průběh teplot jednotlivých vrstev tkání, zejména teploty pokožky ale i vnitřní teploty. Teploty pokožky³ rozhodujícím způsobem vytvářejí tepelný pocit a komfort člověka. Dle modelu Zhang vyvolávají teploty pokožky nejprve lokální tepelné pocity, které pak lidská mysl sjednotí do celkového tepelného pocitu. Spokojenost s tepelným pocitem vytváří tepelný komfort, ten je opět nejdříve vyhodnocen lokálně a následně sjednocen do celkového tepelného komfortu. Při výpočtu lokálního komfortu se bere mimo jiné v potaz vliv celkového tepelného pocitu (viz šipka zespoda nahoru). Tím je do modelu zahrnuta skutečnost, kdy člověk vnímá určitý celkový tepelný pocit (např. chladný) a je mu příjemné, že na jedné z částí těla vnímá naprosto opačný tepelný pocit (např. má teplé nohy). Tedy člověku může být celkově zima či teplo, ale přesto může pociťovat na některých částech svého těla lokální komfort.

4.1 Svázání fyziologického modelu s modelem tepelného komfortu

Tanabeho model byl přejat s veškerými fyziologickými daty pasivního systému i s kompletním aktivním systémem. Ovšem z provedené rešerše vyplynuly některé nedostatky Tanabeho modelu. Tanabeho předpoklad konstantní teploty krve značně ovlivňuje teplotu končetin a rovněž konstantní součinitele přestupu zkresluje výsledky tepelné výměny

³ Na obr. 4.1 lze vidět, že modely jsou propojeny pouze přes povrchové teploty, což je změna oproti modelu Zhang. Zdůvodnění změny je uvedeno v podkapitole 4.1.

mezi povrchem člověka a okolím, zejména ve velmi chladných či teplých prostředích. Proto byly oproti původnímu Tanabeho modelu provedeny následující změny:

- Původně konstantní lokální součinitele přestupu tepla radiací a konvekcí byly nahrazeny empirickými vztahy převzatými z (Nilsson, 2004) a (de Dear a kol., 1996), které jsou validovány zejména pro mírné klima.
- Detailnější popis krevního oběhu. Je uvažována protiproudá tepelná výměna mezi žilami a tepnami, která je převzata z Fialova modelu (Fiala a kol., 1999).
- Jednotlivé segmenty jsou propojeny systémem tepen a žil. Pro každý segment je uvažována vlastní tepenná a žilní teplota namísto předpokladu jedné teploty krve pro celé lidské tělo.
- Přenos tepla vedením s kontaktními plochami.
- Přenos tepla krátkovlnnou radiací (slunečním zářením).

Fyziologický model vychází z Tanabeho modelu, který byl modifikován a implementován společně s modelem dle Zhang do jazyka Modelica. Propojením modifikovaného Tanabeho modelu s modelem dle Zhang vznikl Svázaný model tepelného komfortu, viz obr. 4.1. Svázání modelů si však vyžádalo jedno drobné zjednodušení, neboť v průběhu řešení bylo zjištěno, že fyziologická část modelu založená na Tanabeho modelu neposkytuje dostatečně přesnou teplotu jádra v chladných prostředích, čímž by byla zanesena do modelu tepelného komfortu zásadní chyba. (Zhang, 2003) ve svých měřeních pozorovala, že při ochlazování některých částí lidského těla (hrud', záda, pánev a tvář) dochází k dočasnému nárůstu vnitřní teploty. Tuto skutečnost fyziologický model nebyl schopen postihnout a navíc se ukázalo, že teplota jádra je příliš ovlivněna okolním chladným prostředím. Z tohoto důvodu byla ze Svázaného modelu tepelného komfortu vypuštěna závislost lokálního tepelného pocitu na změně vnitřní teploty. Při propojování modelů byly učiněny následující předpoklady:

- Modely jsou propojeny pouze prostřednictvím lokálních teplot pokožky a jejich časových derivací (nikoliv pomocí teploty jádra a jeho derivace, jak je uvedeno v modelu dle Zhang).
- Jelikož Tanabeho model se skládá z 16 segmentů a model Zhang vyhodnocuje tepelný komfort pro 19 částí lidského těla, bylo nutné nějak sjednotit předávané hodnoty teplot. Oblasti zátylku/temene hlavy, tváře, úst a krku v modelu Zhang nejsou rozlišovány u fyziologického Tanabeho modelu. Proto těmto částem byla přiřazena stejná povrchová teplota hlavy a jejího jádra, které jsou predikovány modifikovaným Tanabeho fyziologickým modelem.
- Střední teplota pokožky modifikovaného Tanabeho modelu byla spočtena jako vážený průměr teplot pokožky jednotlivých segmentů, kde váhou jsou jednotlivé plochy segmentů. Zhang svůj model odvodila pro střední teplotu pokožky určenou sedmibodovou metodou podle DuBoise. Obě tyto metody jsou považovány za ekvivalentní.
- Střední a lokální teploty pokožky v neutrálním stavu reprezentující hranici mezi vnímáním chladu a tepla byly převzaty z Tanabeho modelu a nahradily tak hraniční teploty v modelu Zhang. Důvodem bylo sjednocení neutrálního stavu modelu, neboť

model dle Zhang má hraniční hodnoty o něco vyšší, což by vedlo v neutrálním stavu k vnímání chladu.

- Tanabeho model je zadán v hodinách, oproti modelu Zhang, který pracuje se sekundami, tj. při propojování modelů byly přepočteny časové derivace teplot.

Svázání fyziologického modelu a modelu tepelného komfortu umožňuje na základě znalostí podmínek okolního prostředí, oblečení a vykonávané činnosti člověka predikovat tepelný pocit a komfort.

4.2 Validace Svázaného modelu tepelného komfortu

Svázaný model byl otestován pro studené, chladné, neutrální, teplé a horké prostředí v rozmezí teplot od 5 °C do 48 °C, pro klidně sedícího člověka (0,8 met), stojícího člověka i pro náročnější lidské činnosti až do hodnoty 9 met. Model byl testován jak pro konstantní podmínky prostředí, tak i proměnlivé a také pro různé druhy oděvu (bez oděvu 0 clo, různé varianty letního oděvu 0,6 clo). Většina experimentů byla vybrána z validačního manuálu Fialova modelu od firmy (P+Z, 2011), které obsahují mimo jiné výsledky validace Fialova modelu pocházející z disertační práce (Fiala, 1998). Jelikož Fialův model patří mezi nejuznávanější modely fyziologie a tepelného komfortu člověka, byla predikce Svázaného modelu srovnána nejen s experimentálními daty, ale právě také s predikcí původního Fialova modelu. Vzhledem ke složitosti problematiky lidské fyziologie a psychiky lze očekávat, že experimentální data, predikce Fialova a Svázaného modelu se mohou v některých případech lišit. A to kvůli různé konstituci lidského těla, počtu segmentů, popisu termoregulace, jinému principu vyhodnocování tepelného pocitu apod. Výsledná střední teplota pokožky je počítána jak u Fialova, tak i Tanabeho modelu jako vážený průměr povrchových teplot jednotlivých segmentů, kde váhový koeficient je plocha jednotlivých segmentů. Celkový tepelný pocit je ve Svázaném modelu vypočítán dle modelu Zhang, oproti Fialovu indexu DTS. Modely mají odlišné stupnice tepelných pocitů: Fiala používal standardní 7 bodovou stupnici ASHRAE, kdežto Zhang používá tzv. rozšířenou 9 bodovou stupnici. Ovšem obě stupnice mají společné hodnoty a lze je tedy porovnávat přímo bez dalších přepočtů.

V první části jsou uvedeny scénáře zaměřené jak na výsledný tepelný stav člověka,

- Neutrální prostředí ($T_a = T_r = 30\text{ °C}$) – bez oděvu (ustálený tepelný stav)⁴
- Neutrální prostředí ($T_a = T_r = 25,5\text{ °C}$) – letní oděv (tepelný stav po 2,5 h)
- Různá prostředí – téměř bez oděvu (tepelný stav po 1 h)
- Různá prostředí – letní oděv (tepelný stav po 3 h)

tak na časový průběh tepelného stavu člověka v daném prostředí:

- Studené prostředí ($T_a = T_r = 5\text{ °C}$) – Young
- Studené prostředí ($T_a = T_r = 5\text{ °C}$) – Raven
- Chladné prostředí ($T_a = T_r = 10\text{ °C}$)
- Chladné prostředí ($T_a = T_r = 13\text{ °C}$)
- Chladné prostředí ($T_a = T_r = 15\text{ °C}$)

Ve druhé části jsou uvedeny scénáře reprezentující změnu prostředí, tj. změnu teploty vzduchu T_a a střední radiační teploty okolí T_r ,

- Neutrální a chladné prostředí ($T_a = T_r = 28-18-28\text{ °C}$) + vyhodnocení tep. komfortu

⁴ Výsledky scénářů, které jsou šedě zvýrazněny, nejsou uvedeny v této tezi, a pouze v úplné disertační práci.

- Neutrální a horké prostředí ($T_a = T_r = 28-48-28\text{ °C}$) + vyhodnocení tep. komfortu
- Neutrální a mírně teplé prostředí ($T_a = T_r = 28-33-28\text{ °C}$)
- Chladné a horké prostředí ($T_a = T_r = 18-42-18\text{ °C}$)
- Horké a chladné prostředí ($T_a = T_r = 43-17-43\text{ °C}$)

a scénáře reprezentující změnu intenzity vykonávané činnosti.

- Různé hodnoty metabolismu ($\text{met} = 1-9-1$)
- Různé hodnoty metabolismu ($\text{met} = 1-3-1-5-1-8-1$)

Ve třetí části je uvedeno porovnání simulace Svázaného modelu a Fialova modelu implementovaného v programu Theseus-FE. Jedná se o scénáře nehomogenního prostředí způsobeného různou intenzitou slunečního záření na jednotlivé části povrchu člověka, jež je způsobena vzájemnou polohou Slunce vůči kabině automobilu:

- Směr paprsků skrz čelní sklo – elevace 25°
- Směr paprsků skrz čelní sklo – elevace 50°
- Směr paprsků skrz boční sklo – elevace 50°

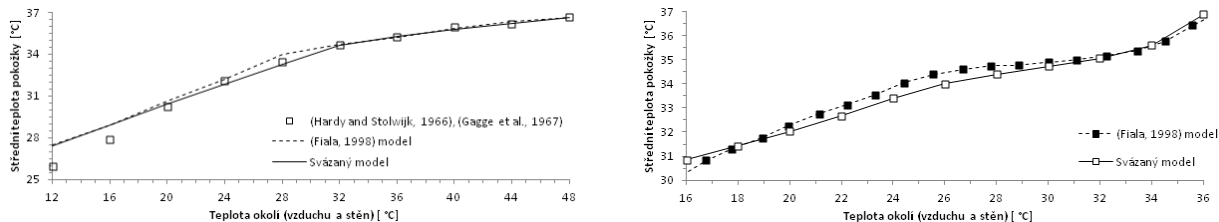
Tepelný stav člověka v různých prostředích

Tab. 4.1 – Porovnání charakteristických veličin v neutrálním prostředí ($T_a = T_r = 25,5\text{ °C}$) – letní oděv

Část těla	(Olesen a Fanger, 1973) experiment	(Fiala, 1998) model	(P+Z, 2011b) THESEUS-FE	Svázaný model
Střední teplota pokožky	$33,5 \pm 0,5$	33,76	33,91	33,65
Rektální teplota	$36,9 \pm 0,3$	36,98	36,65	36,87
Čelo (hlava)	$34,2 \pm 1,0$	34,65	34,74	33,96
Krk (zadní část)	$34,7 \pm 0,8$	34,09	34,01	–
Hrud'	$34,4 \pm 0,6$	34,39	34,58	34,77
Záda	$34,5 \pm 0,9$	34,36	34,50	34,37
Pánev (a část břicha)	$34,9 \pm 1,0$	34,36	34,28	35,04
Paže	$33,5 \pm 0,9$	33,25	33,19	34,05
Předloktí	$32,7 \pm 0,8$	33,25	33,19	33,37
Ruka (hřbet)	$33,5 \pm 1,0$	33,63	33,81	32,57
Levé stehno	$32,9 \pm 0,9$	33,63	33,81	33,71
Levá holen'	$32,2 \pm 1,0$	33,69	33,56	32,92
Nárt	$32,2 \pm 2,0$	31,57	31,63	29,58

(Olesen a Fanger, 1973) provedli experiment sledující tepelný stav člověka v neutrálním prostředí po dobu 2,5 hodin. Během experimentu byla stálá okolní teplota $25,5\text{ °C}$, relativní vlhkost 40 %, testované osoby byly oblečeny do letního oděvu o celkovém tepelném odporu 0,6 clo. Oděv se skládal z bavlněné košile, spodního prádla, vlněných ponožek a džínů. Hodnoty lokálních tepelných odporů letního oděvu $I_{cl}(i)$ v clo byly následující: hlava $I_{cl}^{(1)} = 0$; hrud' a záda $I_{cl}^{(2-3)} = 0,57$; pánev $I_{cl}^{(4)} = 1,37$; paže a předloktí $I_{cl}^{(5-8)} = 0,57$; ruce $I_{cl}^{(9-10)} = 0$; stehna a lýtka $I_{cl}^{(11-14)} = 0,6$; chodidla $I_{cl}^{(15-16)} = 0,686$. Celkový tepelný odpor oděvu byl spočten jako vážený průměr lokálních tepelných odporů přes plochu jednotlivých částí těla (dle Tanabeho segmentů). V tab. 4.1 je uvedeno porovnání predikce jednotlivých teplot pokožky a vnitřní teploty s experimentálními daty a modelem dle Fialy. U experimentálních dat lze vidět, že největší nejistota měření je u nártu a naopak nejmenší odchylka je u vnitřních teplot. Predikce teplot Svázaným modelem nespadá do intervalu tolerance naměřených hodnot pro nárt a ruku, teplota předloktí se nachází na okraji tolerance. Pro všechny ostatní části (zejména centrální) predikce modelu dobře odpovídá naměřeným hodnotám.

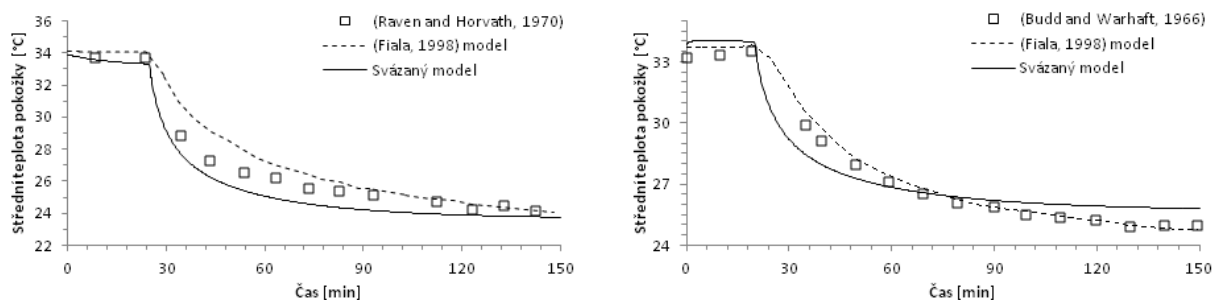
Na obr 4.2 jsou uvedeny výsledky dvou scénářů tepelné zátěže v různých prostředích po 1 h (oděv 0,1 clo), respektive po 3 h (oděv 0,6 clo). V obou případech byla aktivita 1 met a relativní vlhkost 30 %, respektive 85 %. Z výsledků lze vidět, že si modely celkem odpovídají, pouze se liší v blízkosti neutrálního stavu v okolí teploty 28 °C (na obr. vlevo), respektive 25,5 °C (vpravo).



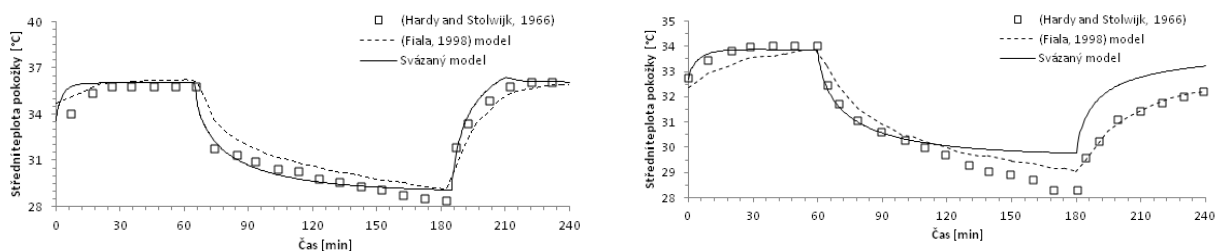
Obr. 4.2 – Porovnání střední teploty pokožky pro různá prostředí po 1 h (oděv 0,1 clo) a po 3 h (oděv 0,6 clo)

Vývoj tepelného stavu člověka v daném prostředí

Na obr 4.3 jsou uvedeny výsledky dvou scénářů velmi chladného prostředí (oděv 0,1 clo, aktivita 0,8 met). Lze vidět, že Svazaný model relativně dobře zachycuje dynamickou fázi ochlazování a výsledná střední teplota pokožky je v průběhu ochlazování maximálně o 1 °C nižší oproti výsledkům experimentu a o 2 °C oproti predikci Fialova modelu. Po 2,5 hodinové zátěži se experiment, Fialův model a Svazaný model shodují na teplotě 24 °C a vzájemné odchylky jsou minimální. Po přechodu člověka do chladného prostředí predikce celkového tepelného pocitu vychází $S_o = -3,93$ a celkového tepelného komfortu $C_o = -4$. V obou případech vychází vnitřní teplota (rektální) o 1 až 2 °C nižší, než je experiment. Z toho vyplývá, že Svazaný model není schopen správně predikovat vnitřní teplotu člověka ani její časovou změnu v chladném prostředí, neboť je příliš ovlivněna okolní teplotou. Toto zjištění koresponduje se závěry uvedenými ve studii (Psikuta a kol., 2012), v které byly testovány různé modely fyziologie člověka včetně Tanabeho modelu.



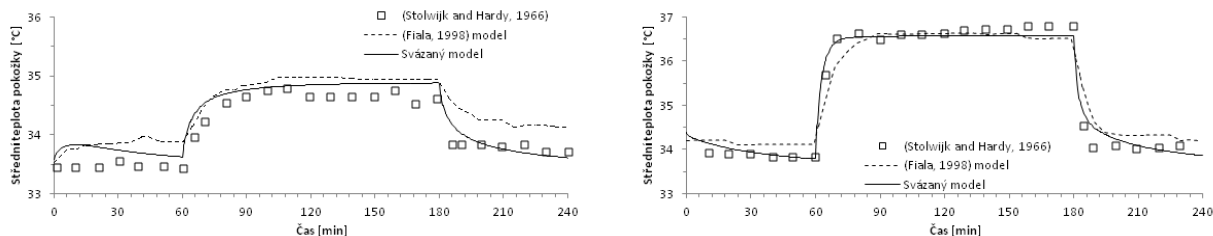
Obr. 4.3 – Střední teplota pokožky ($T_a = T_r = 5\text{ °C}$) a chladné prostředí ($T_a = T_r = 10\text{ °C}$)



Obr. 4.4 – Střední teplota pokožky ($T_a = T_r = 43\text{-}17\text{-}43\text{ °C}$) a ($T_a = T_r = 28\text{-}18\text{-}28\text{ °C}$)

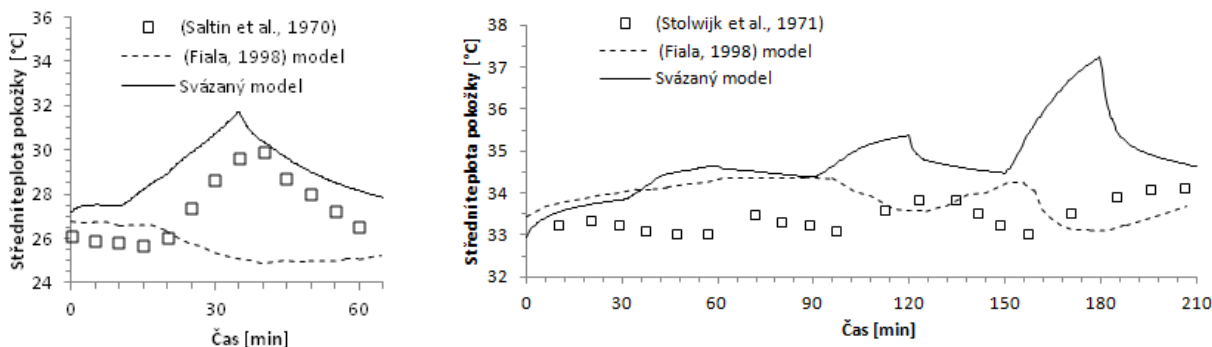
Na obr 4.4 jsou uvedeny výsledky dvou scénářů reprezentující přechod člověka (oděv 0,1 clo, aktivita 1 met) do mírně chladného prostředí (17 °C), respektive horkého prostředí

(18 °C). Na obr 4.5 jsou uvedeny výsledky dvou scénářů reprezentující přechod člověka (oděv 0,1 clo, aktivita 1 met) do mírně teplého (33 °C), respektive horkého prostředí (48 °C). Ve většině případů predikovaná teplota pokožky Svázaným modelem odpovídá experimentálním datům i Fialovu modelu. Jen na obr 4.4 vlevo model nadhodnocuje střední teplotu pokožky o 1 °C oproti Fialovu modelu a až o 1,6 °C oproti měření.



Obr. 4.5 – Střední teplota pokožky ($T_a = T_r = 28-33-28$ °C) a ($T_a = T_r = 28-48-28$ °C)

Na obr 4.6 jsou uvedeny dva scénáře se změnami vykonávané činnosti 1-9-1 met, respektive 1-3-1-5-1-8-1 met. Rozdíl mezi scénáři je také v okolní teplotě (10 °C, na obr. 4.6 vlevo), respektive (30 °C, na obr. 4.6 vpravo). Při vysoké intenzitě vykonávané činnosti v horkém prostředí lze vidět, jak model velmi nadhodnocuje teplotu pokožky. Jednou z hlavních příčin je vykonávaný pohyb lidského těla při dané činnosti, který má bezpochyby vliv na tepelnou výměnu konvekcí, a není v modelu uvažován.



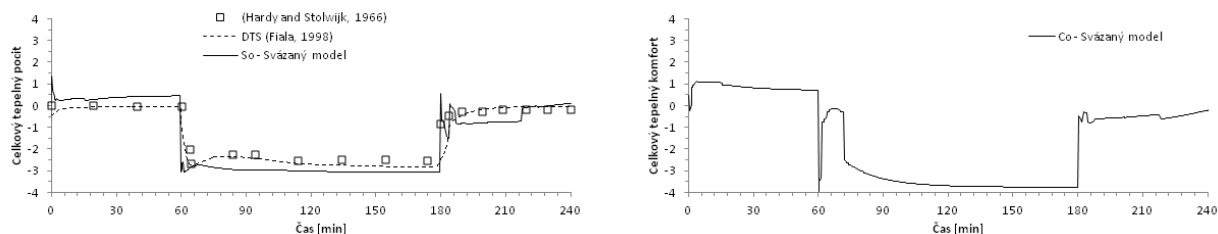
Obr. 4.6 – Střední teplota pokožky pro různé hodnoty metabolismu ($met = 1-9-1$) a ($met = 1-3-1-5-1-8-1$)

Tepelný pocit a komfort

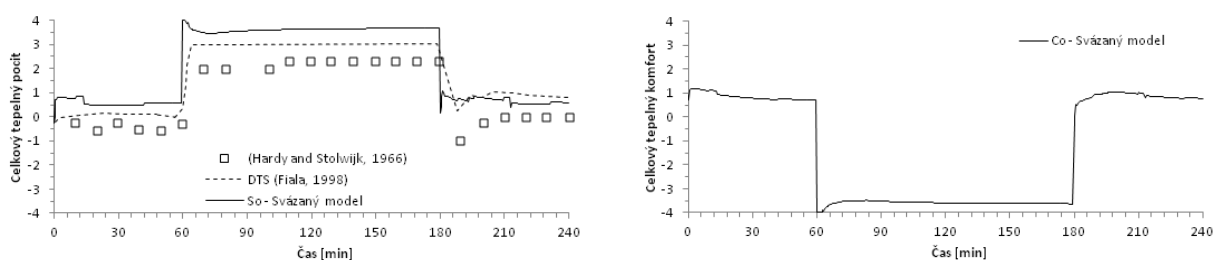
Na obr 4.7 je uvedena predikce celkového tepelného pocitu a komfortu pro scénář z obr. 4.4 vpravo ($T_a = T_r = 28-18-28$ °C). Na obr 4.8 je uvedena predikce celkového tepelného pocitu a komfortu pro scénář z obr. 4.5 vpravo ($T_a = T_r = 28-48-28$ °C).

Výsledky celkového tepelného pocitu v chladném prostředí velice dobře odpovídají Fialovu indexu DTS i experimentu, ovšem na první pohled se liší v horkém prostředí. Svázaný model predikuje vyšší hodnotu než Fialův model i než výsledek experimentu. V čase $t = 180$ min je $S_o = 3,3$, index DTS = 3 a výsledek experimentu 2,3. Výsledky z experimentu jsou pro horké prostředí podezřele nízké, neboť 48 °C je skutečně extrémní teplota. Fialův index DTS je definován pouze na 7 bodové stupnici, tudíž výsledek 3 je možným maximem. Celkový tepelný pocit u modelu Zhang nenabývá maximální hodnoty +4, neboť díky pocení poklesla teplota pokožky některých částí a tím i tepelný pocit. Tento pokles teploty probíhá za velmi nepohodlných podmínek, kdy pokrytí pokožky celého člověka potem dosahuje hodnot $w = 0,77$ a pro hrud', záda a pánev $w^{(2,3,4)} = 1$. Hodnota 1 znamená, že pot z člověka stéká, aniž by se stačil odpařit. Celkový tepelný komfort je uveden na obrázcích vpravo již bez dalšího

srovnání. Lze vidět, že i v takto horkém prostředí nevychází absolutně roven -4, což je dáno podstatou modelu Zhang, v kterém není v současné podobě zahrnut vliv pocení na tepelný komfort. Z tohoto důvodu je ve Svázaném modelu věnována pozornost veličině w , která vyjadřuje míru zpocení člověka, za ještě komfortní hodnoty lze považovat dle (Gagge, 1969) hodnoty $w < 0,3$.



Obr. 4.7 – Celkový tepelný pocit a celkový tepelný komfort ($T_a = T_r = 28-18-28\text{ }^{\circ}\text{C}$)



Obr. 4.8 – Celkový tepelný pocit a celkový tepelný komfort ($T_a = T_r = 28-48-28\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Nehomogenní prostředí kabiny automobilu

Kromě dat z literatury byl model validován pomocí simulací provedených v programu Theseus-FE, jehož součástí je Fialův model. Jednalo se o tepelnou zátěž v kabině automobilu po dobu 1 h se slunečními paprsky prostupujícími skrz čelní sklo pod elevačním úhlem 25° , intenzita slunečního záření na plochu kolmou ke slunečním paprskům po průchodu sklem byla uvažována 300 W/m^2 . Další okrajové podmínky byly: teplota vzduchu a stěn $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, rychlost proudění vzduchu $0,15\text{ m/s}$, relativní vlhkost 40% , aktivita $1,2\text{ met}$, letní oděv $0,6$ a teplota kontaktní plochy sedadla $36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na obr. 4.9 jsou uvedeny výsledky lokálních teplot pokožky (vlevo) a lokálních tepelných pocitů (vpravo). Lze vidět, že predikce Fialova a Svázaného modelu se dobře shoduje v případě teplot pokožky, ale méně už v případě tepelných pocitů.



Obr. 4.9 – (A) Elevační úhel 25° – směr parsků skrz čelní sklo Lokální teplota pokožky a lokální tepelný pocit. Označení jednotlivých částí dle Tanabeho je následující: 1 – hlava, 2 – hrud', 3 – záda, 4,5 – L.a P. paže, 6,7 – L.a P. předloktí, 8,9 – L.a P. ruka, 10,11 – L.a P. stehno, 12,13 L.a 14,15 P. lýtko, 15,16 L.a P. chodidlo.

5 ZÁVĚR

Cílem disertační práce bylo svázání fyziologického modelu člověka s modelem tepelného komfortu. Hlavním požadavkem na vyvíjený model byla jeho aplikovatelnost pro vnitřní prostředí kabin automobilů, které je specifické svojí nehomogenitou a dynamickými změnami okolních podmínek. Analýza parametrů ovlivňujících tepelný komfort uvnitř kabiny automobilu vedla k potřebě vytvořit validovaný model na výpočet tepelné zátěže kabiny. Výsledky práce lze shrnout do následujících závěrů.

1) Byl vytvořen a validován Model tepelné zátěže kabiny

- Predikce tepelné zátěže kabiny, teploty a relativní vlhkosti uvnitř vozu byly relativně přesné, i přes uvažování jednoduché parametrizace geometrie exteriéru kabiny.
- Vzhledem k absenci podrobnější parametrizace geometrie interiéru vozu jsou povrchové teploty interiéru predikovány s vyšší nepřesností.
- Využití zjednodušeného modelu konvekce je dalším důvodem méně přesné predikce povrchových teplot.
- Model tepelné zátěže byl testován pro teploty okolí od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $43\text{ }^{\circ}\text{C}$, intenzity slunečního záření do 1000 W/m^2 , rychlosti jízdy do 110 km/h , množství přiváděného vzduchu do $0,15\text{ kg/s}$, teplota přiváděného vzduchu od $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Model tepelné zátěže je možné použít v celém rozsahu testovaných podmínek.

2) Byl vytvořen a validován Svázaný model tepelného komfortu

- Model umožňuje predikovat tepelný komfort v nehomogenních prostředích včetně jeho dynamického chování s některými omezeními.
- Svázaný model tepelného komfortu byl testován pro rozmezí teplot okolního prostředí od $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $48\text{ }^{\circ}\text{C}$, intenzity vykonávané činnosti od $0,8$ do 9 met, celkového tepelného odporu oděvu od 0 do 1 clo a také pro tepelnou zátěž od slunečního záření.
- Svázaný model tepelného komfortu není možné použít v celém rozsahu testovaných podmínek. Hlavním omezením modelu oproti testovaným hodnotám je intenzita vykonávané činnosti, jejíž maximální doporučená hodnota je pouze $1,2$ met. Toto omezení vyplývá zejména ze skutečnosti, že model dle Zhang je navržen pouze do aktivity $1,2$ met. Model je tedy určen pro vyhodnocování tepelného komfortu během lehké aktivity vsedě, což odpovídá běžné činnosti vykonávané v prostředí kabin dopravních prostředků.
- Validací bylo prokázáno, že pro intenzivní fyzické činnosti (8 met a více) v neutrálním prostředí je predikce teploty pokožky nepřesná, a proto nelze ani samostatně, pro dané podmínky použít fyziologickou část Svázaného modelu.
- Predikce vnitřní tělesné teploty v chladném prostředí neodpovídá skutečnosti, proto je ve Svázaném modelu zanedbán vliv vnitřní teploty jádra na tepelný komfort.
- Model dle Zhang nezohledňuje vliv vnímání komfortu spojeného s mírou pocení. Z tohoto důvodu je ve Svázaném modelu tepelného komfortu sledována míra pokrytí pokožky potem, a pokud přesáhne hodnotu $0,3$ na nějaké z částí lidského těla, nelze již mluvit o tepelném komfortu.

Literatura

- [1] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (2001) *ASHRAE Handbook Fundamentals*. Atlanta, USA.
- [2] ARICI, O., YANG, S., HUANG D., OKER, E. (1999) Computer Model for Automobile Climate Control System Simulation and Application. *Int.J. Applied Thermodynamics*, Vol. 2, (No. 2), 59-68.
- [3] BUDD, G. M. a WARHAFT, N. (1966) Body temperature, shivering, blood pressure and heart rate during a standard cold stress in Australia and Antarctica. *Journal of Physiology-London*, 186 (1), 216-232.
- [4] CIHELKA, J. (1994) *Solární tepelná technika*. Praha: T. Malina.
- [5] ČSN ISO 7730. (1997) Mírné tepelné prostředí – Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody., Český normalizační institut.
- [6] ČSN ISO 14505. (2007) Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného komfortu ve vozidlech., Český normalizační institut.
- [7] FANGER, P. O. (1970) *Thermal comfort : analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- [8] FIALA, D. (1998) Dynamic simulation of human heat transfer and thermal comfort. Ph.D. Thesis, *Institute of Energy and Sustainable Development*. Leicester, De Montfort University.
- [9] FIALA, D., a kol. (2012) UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *Int J Biometeorol*, 56 (3), 429-441.
- [10] FIALA, D., a kol. (1999) A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *Journal of Applied Physiology*, 87 (5), 1957-1972.
- [11] FIALA, D., a kol. (2001) Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology*, 45 (3), 143-159.
- [12] FIALA, D., a kol. (2003) First principles modeling of thermal sensation responses in steady state and transient conditions. *ASHRAE Transaction*, 109, 179-186.
- [13] GAGGE, A., a kol. (1986) A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment. *ASHRAE Transactions*, 92 (2), 709-731.
- [14] HARDY, J. D. a DUBOIS, E. F. (1938) The Technique of Measuring Radiation and Convection. *Journal of Nutrition*, (15), 461-475.
- [15] HARDY, J. D. a STOLWIJK, J. A. (1966) Partitional calorimetric studies of man during exposures to thermal transients. *Journal of Applied Physiology*, 21 (6), 1799-1806.
- [16] HUIZENGA, C., a kol. (2001) A model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments. *Building and Environment*, 36 (6), 691-699.

- [17] KONZ, M. (2002) A Generic Simulation of Energy Consumption of Automobile Air Conditioning Systems.) *Faculty of Engineering, the Built Environment and Information Technology*. Port Elizabeth, Nelson Mandela Metropolitan University.
- [18] NILSSON, H. O. (2004) Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models. Ph.D. Thesis, University of Gävle.
- [19] OLESEN, B. W. a FANGER, P. (1973) The skin temperature distribution for resting man in comfort. *Arch. Sc. Physiol*, (27), A385-A393.
- [20] P+Z (2011b) Theseus-FE. Validations Version 4.0. Munich.
- [21] PSIKUTA, A., a kol. (2012) Validation of the Fiala multi-node thermophysiological model for UTCI application. *International Journal of Biometeorology*, 56 (3), 443-460.
- [22] RAVEN, P. R. a HORVATH, S. M. (1970) Variability of physiological parameters of unacclimatized males during a two—hour cold stress of 5°C. *International Journal of Biometeorology*, 14 (3), 309-320.
- [23] SALTIN, B., a kol. (1970) Body temperatures and sweating during thermal transients caused by exercise. *Journal of Applied Physiology*, 28 (3), 318-327.
- [24] STOLWIJK, J. A. a HARDY, J. D. (1966) Partitional calorimetric studies of responses of man to thermal transients. *Journal of Applied Physiology*, 21 (3), 967-977.
- [25] STOLWIJK, J. A. J., a kol. (1971) *A mathematical model of physiological temperature regulation in man*. National Aeronautics and Space Administration.
- [26] STREBLOW, R. (2010) Thermal Sensation and Comfort Model for Inhomogeneous Indoor Environments. Ph.D. Thesis, *Fakultät für Maschinenwesen*. Technischen Hochschule Aachen.
- [27] TANABE, S.-I., a kol. (2002) Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings*, 34 (6), 637-646.
- [28] WAGNER, S. (2009) Idealierte energetisch-analytische Abbildungsmethode der Temperaturschichtung bei der passiven Aufheizung in der Fahrzeugkabine. *PKW-Klimatisierung VI, Haus der Technik Fachbuch* 107, 94-110, Essen.
- [29] ZHANG, H. (2003) Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments. Ph.D. Thesis, *Center for the Built Environment*. Berkeley, University of California.
- [30] ZHANG, H., a kol. (2010a) Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts. *Building and Environment*, 45 (2), 389-398.
- [31] ZHANG, H., a kol. (2010b) Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort. *Building and Environment*, 45 (2), 399-410.
- [32] ZHANG, H., a kol. (2010c) Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts. *Building and Environment*, 45 (2), 380-388.

Vlastní publikační činnost

Článek v recenzovaném časopise:

- [I] POKORNÝ, J., FIŠER, J., JÍCHA, M. (2011) Calibration of the Heat Balance Model for Prediction of Car Climate. In *Experimental Fluid Mechanics 2011, Conference Proceedings* Volume 2. Liberec, Technical University of Liberec. 928-931. ISBN 978-80-7372-784-0.
- [II] FIŠER, J., POKORNÝ, J., JÍCHA, M. (2011) 1D Software Tools for Simulations of Indoor Cabin Environment. *Transaction of the VŠB-Technical university of Ostrava, Mechanical series*. 2010(3). 61-67. ISSN 1210-0471

Příspěvky na konferenci (článek ve sborníku):

- [III] POKORNÝ, J., FIŠER, J. (2009) Používané modely lidského tepelného komfortu. *Strojárstvo/Strojírenství*. (mimořádné), 209-210. ISSN 1335-2938.
- [IV] POKORNÝ, J., FIŠER, J., JÍCHA, M. (2010) Predikce tepelné pohody v nehomogenních prostředích pomocí vícesegmentových modelů. In: *XXIX. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky*, 231 - 234. ISBN 978-80-248-2244-0.
- [V] POKORNÝ, J., FIŠER, J., JÍCHA, M. (2010) Prediction of Thermal Comfort in Non-homogenous Environment by Means of Multi-segmented Models. In: *8th International Meeting for Manikins and Modeling (8I3M)*, Victoria, Canada 2010.
- [VI] POKORNÝ, J., FIŠER, J., JÍCHA, M. (2010) Predikce tepelné pohody dle Zhang s využitím Tanabeho modelu fyziologie člověka. In: *Simulace budov a techniky prostředí. Sborník 6.konference IBPSA-CZ*. Praha, ČVUT, 193-197. ISBN 978-80-254-8661-0.
- [VII] LÍZAL, F., JEDELSKÝ, J., POKORNÝ, J., JÍCHA, M., ŠTĚTINA, J. (2009) Study of Air Flow in Simplified Transparent Airway Model. *Strojárstvo/Strojírenství*. (mimořádné). 159-160. ISSN 1335-2938.
- [VIII] FIŠER, J., POKORNÝ, J., JÍCHA, M. (2010) Prediction of Car Cabin Environment by Means of 1D and 3D Cabin Model. In: *Experimental Fluid Mechanics 2010 - Conference Proceedings*. Liberec, Technical University of Liberec. 145-150. ISBN 978-80-7372-670-6.

Příspěvky na konferenci (abstrakt a poster):

- [IX] POKORNÝ, J., FIŠER, J., JÍCHA, M. (2011) Multi-segment model for prediction of human physiology responses and thermal comfort in non-homogenous environments In: *Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Ergonomics (XIV ICEE)*, Book of abstracts 106-106. Nafplio, Greece.
- [X] FIŠER, J., POKORNÝ, J., FORMAN, M., JÍCHA, M. (2011) Investigation of thermal comfort in aircraft cabin by means of Comfort zones model. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Ergonomics (XIV ICEE)*, Nafplio, Greece.
- [XI] JEDELSKÝ, J., POKORNÝ, J., FIŠER, J., VACH, T., LÍZAL, F., JÍCHA, M. (2010) Coanda Effect - Influence of Inlet Shape and Geometry. In: *International conference Experimental Fluid Mechanics 2010 Conference Proceedings*. Volume 1. Liberec, Technical University of Liberec. 1 - 1. ISBN 978-80-7372-670-6.

Životopis

OSOBNÍ ÚDAJE:

Jméno příjmení: Ing. Jan Pokorný
Adresa: Za Plovárnou 2878/2, 671 81 Znojmo
Telefon: 774 033 074
E-mail: kancelář: ypokor25@stud.fme.vutbr.cz
soukromý: pokorny.j@centrum.cz

Datum narození: 2. 11. 1983
Rodinný stav: ženatý
Národnost: česká

VZDĚLÁNÍ:

2003 Maturita na Gymnázium Dr. Karla Polesného Znojmo
2008 Ing., VUT Brno, FSI. Obor: Matematické inženýrství a
Laurea in Ingegneria Matematica, Università degli Studi
dell'Aquila, Facoltà di Ingegneria.

PRAXE:

2008 – dosud student doktorského programu na Odboru termomechaniky a
techniky prostředí, Energetický ústav, FSI VUT v Brně
2011 – dosud: Ph.D. student, NETME centre - nové technologie pro
strojírenství. Divize energetiky, procesů a ekologie (PPE

JAZYKOVÉ ZNALOSTI:

Anglický jazyk: slovem i písmem středně pokročilý (B2)
Německý jazyk: slovem začátečník (A2), písmem mírně pokročilý (B1)
Italský jazyk: slovem začátečník (A1), písmem začátečník (A1)

DALŠÍ ZKUŠENOSTI A DOVEDNOSTI:

Řidičský průkaz: skupina B
Práce na PC: MS Office, Auto CAD 2010, 3ds Max 2010, STAR-CCM+,
Theseus-FE, Dymola/Modelica, Matlab
Základní znalost programovacích jazyků C#, Delphi

Abstrakt / Abstract

Abstrakt

Disertační práce se zabývá vnitřním prostředím a tepelným komfortem v kabinách automobilů. V Dymole/Modelice byl vytvořen Model tepelné zátěže kabiny pro studium vlivů různých parametrů okolního prostředí na mikroklima uvnitř kabiny. Model byl validován na základě osmi experimentů v klimatické komoře i ve skutečných provozních podmínkách. Hlavním cílem práce bylo vytvořit model pro predikci tepelného komfortu v nehomogenním prostředí, který je použitelný i pro prostředí kabin automobilů. V Dymole/Modelice byl vytvořen Svázaný model tepelného komfortu, který umožňuje vyhodnotit celkový tepelný komfort na základě lokálních parametrů okolního prostředí a osobních faktorů člověka. Model byl validován na 16 různých scénářích převzatých z literatury. Navíc za pomoci programu Theseus-FE byly vytvořeny tři modelové případy reprezentující asymetrickou zátěž od slunečního záření v kabině automobilu. Predikce Svázaného modelu byla porovnána s Fialovým modelem a s výsledky experimentů. Svázaný model predikoval střední teplotu pokožky dostatečně přesně pro klidné aktivity v neutrálním a teplém prostředí. V chladném prostředí byly odchylky střední teploty pokožky od měření větší a predikovaná vnitřní teplota příliš závislá na teplotě okolí. Pro vyšší intenzity vykonávané činnosti byla predikovaná střední teplota pokožky příliš vysoká.

Abstract

The thesis deals with car cabin environment and thermal comfort inside. A car cabin heat load model was developed in Dymola/Modelica to investigate influence of ambient environmental parameters. The model was validated on the data set of eight test cases measured in a climatic chamber and in a real traffic. The main objective of the thesis was to develop a human thermal comfort model suitable for non-homogenous environments and for a car cabin environment especially. The Coupled model of human physiology and thermal comfort was developed in Dymola/Modelica. The model allows predicting an overall human thermal comfort from local boundary conditions representing ambient and personal factors. The model was validated by 16 test cases taken from experiments in literature. Moreover three test cases were created in Theseus-FE to consider an asymmetrical heat load from Sun rays inside a car cabin. Prediction of the Coupled model was compared with Fiala model and experimental data. The Coupled model predicted mean skin temperature for moderate activities in neutral and warm environment well. In cold environment a predicted core temperature was very affected by ambient temperature and during high activity exercises, the predicted mean skin temperature was too high.