



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**MODELY PRO PREDIKCI TEPELNÉHO POCITU A
TEPELNÉHO KOMFORTU ČLOVĚKA**

MODELS FOR PREDICTING THE THERMAL SENSATION AND THERMAL COMFORT OF
A PERSON

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Nahácky

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Barbora Kopečková

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Marek Nahácky**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Barbora Kopečková**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Modely pro predikci tepelného pocitu a tepelného komfortu člověka

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tepelná pohoda je velice důležitým aspektem života člověka, zvláště v dnešní době, kdy člověk tráví většinu času v uzavřených prostorech. Modely tepelného stavu člověka jsou schopny predikovat lidské vnímání okolního prostředí a posoudit stav daných vnitřních podmínek. Tyto modely se však liší v mnoha aspektech, různém počtu vstupních a výstupních podmínek, rozsahem podmínek, pro které může být daný model použit, či rozdílným rozsahem hodnotících škál. Daná práce by měla obsahovat přehled a porovnání jednotlivých typů vybraných modelů.

Cíle bakalářské práce:

Vypracování rešerše s ohledem na:

1. Základní definování pojmů tepelný pocit a tepelný komfort a primárních faktorů, které je ovlivňují.
2. Zmapování vývoje modelů pro predikci tepelného pocitu a tepelného komfortu.
3. Zmapování podmínek použitelnosti, vstupních a výstupních podmínek jednotlivých modelů.

Seznam doporučené literatury:

HAVENITH, G. a D. FIALA. Thermal Indices and Thermophysiological Modeling for Heat Stress. Comprehensive Physiology. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2016, 255-302. DOI: 10.1002/cphy.c140051. ISBN 9780470650714. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/cphy.c140051>

KOELBLEN, B., A. PSIKUTA, A. BOGDAN, S. ANNAHEIM a R. M. ROSSI. Thermal sensation models: a systematic comparison. Indoor Air. 2017, 27(3), 680-689. DOI: 10.1111/ina.12329. ISSN 09056947. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1111/ina.12329>

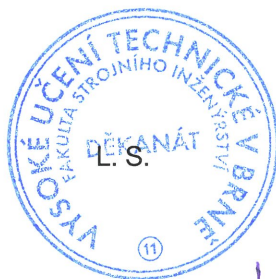
KATIĆ, K., R. LI a W. ZEILER. Thermophysiological models and their applications: A review. Building and Environment. 2016, 106, 286-300. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.06.031. ISSN 03601323.

Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132316302384>

2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals. SI Edition. Atlanta: ASHRAE, 2001. ISBN 18-834-1388-5.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 23. 10. 2017



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalárska práca je zameraná na zmapovanie doterajšieho vývoja termofyziologických modelov na predikciu tepelného pocitu a tepelného komfortu človeka v termálnom prostredí. Modely sa líšia v širokom spektre podmienok ich použitia. Prvá časť práce sa venuje zadefinovaniu pojmom tepelný pocit a tepelný komfort. Druhá časť práce slúži na hlbšie rozobratie jednotlivých vybraných termofyziologických modelov. Na konci práce bola vytvorená súhrnná tabuľka pre porovnanie vstupov a výstupov týchto modelov na predikciu.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Tepelný pocit, tepelný komfort, tepelné modely, predikcia tepelného stavu

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on mapping of the current development of thermophysiological models for prediction of human thermal sensation and thermal comfort in thermal environment. These models vary in broad spectrum of conditions of their use. The first part is dedicated to definition of terms thermal sensation and thermal comfort. The second part focuses on comparison and more precise description of chosen thermophysiological models. At the end it was made a summarizing table of inputs and outputs of these models for prediction.

KEYWORDS

Thermal sensation, thermal comfort, thermal models, prediction of thermal state

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

NAHÁCKY, M. *Modely pro predikci tepelného pocitu a tepelného komfortu člověka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Barbora Kopečková.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Barbory Kopečkovéj a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa 25. Mája 2018.

.....

Marek Nahácky

POĎAKOVANIE

Chcel by som poďakovať Ing. Barbore Kopečkovéj, vedúcej mojej bakalárskej práce, za vecné pripomienky, trpezlivosť a čas, ktorý mi venovala. Ďalej by som chcel poďakovať mojej rodine a blízkym za pomoc a podporu behom štúdia.

OBSAH

Úvod	8
1 FYZIOLÓGIA ĽUDSKÉHO TELA	9
1.1 PASÍVNY SYSTÉM	9
1.1.1 METABOLIZMUS	9
1.1.2 KONVENCIA	10
1.1.3 KONDUKCIA	10
1.1.4 RADIÁCIA	10
1.1.5 ODPAROVANIE.....	11
1.1.6 DÝCHANIE	11
1.2 AKTÍVNY SYSTÉM	11
2 TEPELNÝ POCIT A TEPELNÝ KOMFORT	11
2.1 TEPELNÝ POCIT	11
2.2 KOMFORT KOMFORT	12
2.2.1 PRIMÁRNE FAKTORY	12
2.2.2 SEKUNDÁRNE FAKTORY	13
3 MODELY PRE PREDIKCIU	14
3.1 TERMOFYZIOLOGICKÉ MODELY	14
3.1.1 GAGGOV 2 UZLOVÝ MODEL.....	141
3.1.2 FIALOV MODEL DYNAMICKÉHO TEPELNÉHO KOMFORTU.....	17
3.1.3 TANABEHO DYNAMICKÝ MODEL	18
3.1.4 MODEL PODĽA KOHRI	19
3.1.5 UTCI.....	21
3.2 TEPELNÉ MODELY	23
3.2.1 ČSN ISO 7730-MODEL PMV-PPD	23
3.2.2 MODEL KOMFORTNÝCH ZÓN	26
3.2.3 MODEL PODĽA ZHANG	29
3.3 SÚHRN	34
Záver.....	35
Použité informačné zdroje	36

ÚVOD

V poslednej dobe, si môžeme všimnúť, že ľudia trávia väčšinu svojho času v uzavretých priestoroch svojich domov, bytov, kancelárií či dopravných prostriedkov a preto sa začala dostávať do popredia otázka správnych tepelných podmienok prostredia, ktoré budú vyhovovať človeku tak, aby dosiahol stav komfortu.

Telo človeka je v nepretržitom kolobehu výmeny tepla s okolím. Vďaka biochemickým procesom ako metabolizmus je teplo vytvárané vnútri tela a prijímané alebo odovzdávané konvenciou, kondukciou či radiáciou od okolitých zdrojov tepla v blízkosti človeka. V poslednom storočí bolo vytvorených množstvo modelov, indexov a iných nástrojov na hodnotenie tepelného stavu človeka vystavenému rôznym podmienkam prostredia, ktorých úlohou bolo napodobňovať správanie ľudského tela a tým predpovedať spokojnosť človeka s okolitými podmienkami prostredia. Tieto modely sa líšia v rôznych aspektoch, napr.: zložitosť rovníc, ale najmä typom a množstvom vstupných a výstupných parametrov a rozsah podmienok ich použitia. V súčasnosti existujú komplexné modely, ktoré sú schopné predpovedať tepelný pocit a tepelný komfort v širokom spektre environmentálnych podmienok a pracujúci s rozdielnymi stupnicami hodnotení pocitu a komfortu. Keďže každý model pracuje s inými parametrami a bol vyvinutý v rôznom prostredí, neexistuje zatiaľ žiadny, ktorý by dokázal zahrnúť všetky typy prostredí, aktivít a odevov, ktoré majú priamy dopad na tepelnú pohodu.

Cieľom tejto práce je vytvorenie rešerše, ktorá bude zameraná na modely zaoberajúce sa predikciou tepelného stavu človeka a to najmä tepelného pocitu a komfortu. Bližšie si rozoberieme fungovanie tepelného systému človeka a zameriame na osem predikčných modelov a indexov, ktoré majú rôzne obmedzenie použiteľnosti pre rôzne vstupné parametre.

1 FYZIOLOGIA LUDSKÉHO TELA

Organizmy, sú schopné regulovať ich vnútornú teplotu tak, že zostáva konštantná v pomerne širokom rozsahu environmentálnych podmienok.

Homoiothermia je definovaná ako spôsob termoregulácie teploty, pri ktorom je teplota jadra udržiavaná v rozmedzí $\pm 2K$ napriek oveľa väčším zmenám teploty okolia [1]. Nedostatočné tepelné straty vedú k prehriatiu (hypertermia), nadmerné straty vedú k podchladeniu tela (hypotermia).

Vnútorná teplota tela je konštantne udržiavaná proti tepelným stratám vnútro-telovou produkciou tepla [2] a prostredníctvom vhodných protiopatrení prijatých termoregulačným systémom [3]. Ľudské telo funguje na báze pasívneho a aktívneho systému.

1.1 PASÍVNY SYSTÉM

Pasívny systém je model fyzického tela pod fyzikálnymi zákonmi na prenos tepla v ľudskom tele a medzi ním a životným prostredím [4].

Matematické modelovanie ľudského tepelného systému sa pokúša vypočítať vlastnosti tepelnej výmeny medzi človekom a prostredím na základe všeobecnej tepelnej rovnováhy. Tepelná rovnováha ľudskej termoregulácie je prezentovaná rovnicou tepelnej bilancie (1.1) [4].

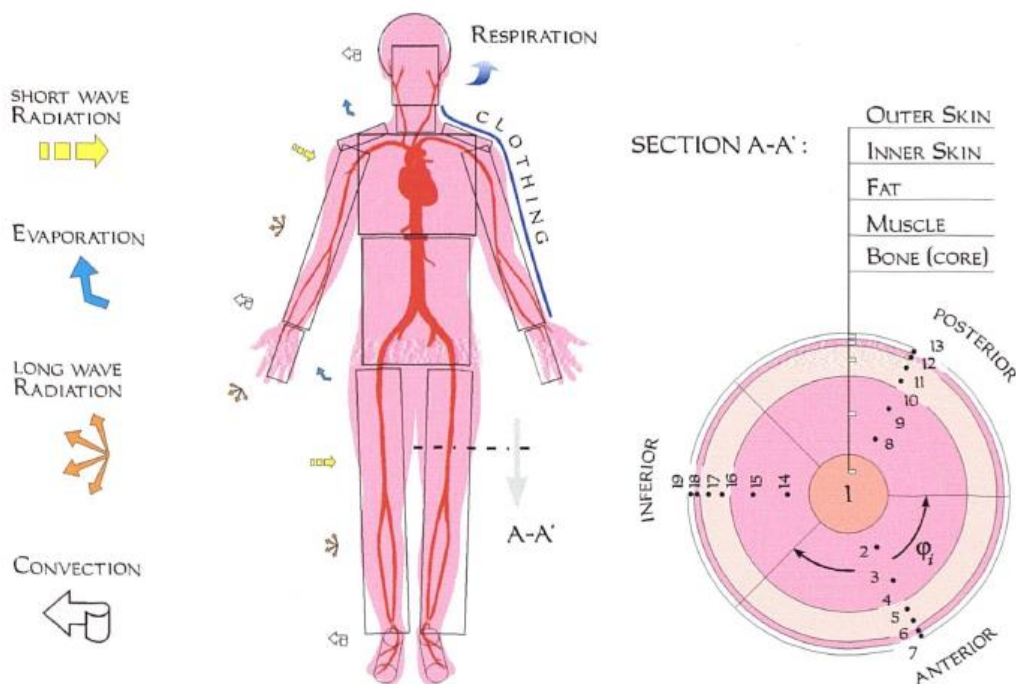
Skladovanie tepla v tele = výroba tepla – tepelné straty [5].

$$S = M - (W + C + R + K + E + Resp) \quad (1.1)$$

Produkcia tepla (rýchlosť metabolizmu „M“), definovaná pracovnou rýchlosťou („W“) a typom práce, sa uvoľňuje ako teplo v tele. Strata tepla je definovaná zložkami výmeny tepla a prostredníctvom tepelného toku a to: vedenie (K), konvencia (C), odparovanie (E), dýchanie (Resp) a žiarenie (R). Pasívny systém je riadený aktívnym systémom ľudského tela a jeho cieľom je regulovať teplotu tela v meniacom sa prostredí [6]. Na Obr. 1.1 je schematický diagram fungovania pasívneho systému.

1.1.1 METABOLIZMUS

Produkcia metabolického tepla sa považuje za súčet základnej hodnoty a dodatočnej tepelnej produkcie z lokálnej autonómnej termoregulácie, triašky a cvičenia. Extra produkcia tepla zo zmien v základnom metabolizme je rozdiel medzi aktuálnou rýchlosťou a základnou rýchlosťou zodpovedajúcej za neutralizáciu tepelných podmienok. Zdroj triašky je súčasťou termoregulačnej odozvy kontrolovanej aktívnym systémom. Produkcia dodatočného tepla z cvičenia predstavuje časť z celkovej dodatočnej energie [4].



Obr. 1.1- Schematický diagram pasívneho systému. Prevzaté od Fialu [7] .

1.1.2 KONVENCIA (PRENOS)

Konvencia sa zvyčajne vyskytuje, keď povrch kože prenáša teplo do okolitého vzduchu. Existujú dva mechanizmy pre pohyb vzduchu v blízkosti povrchu tela: prirodzená konvencia (vyvolaná rozdielom hustoty a tepelným gradientom) a nútená konvencia (vyvolaná vonkajšími silami spôsobenými vetrom z prostredia). Teoretická analýza sa uskutočňuje na vyčíslenie zmiešanej prirodzenej a nútenej konvencie:

$$Nu^n = (aRe^{0,5})^n + (bGr^{0,25})^n \quad (2.2)$$

Kde Nu je Nusseltovo číslo, Re je Reynoldsovo číslo (nútená konvencia) a Gr je Grashofove číslo (prirodzená konvencia). N (je rovné = 3, 3.5 či 4) sa stanovuje z pokusných dát. a a b sú konštanty určené geometrickými charakteristikami segmentov [4].

1.1.3 KONDUKCIA (VEDENIE)

Kondukcia je vedenie tepla kmitaním mikroskopických častíc a pohybom elektrónov v tele. Týmito kmitajúcimi časticami prenášajú kinetickú a potenciálnu energiu. Vedenie prebieha vo všetkých skupenstvách. Rýchlosť, ktorou je energia vedená, je funkciou teplotného gradientu medzi dvoma telesami a vlastnosťami vodivého média, cez ktoré je teplo prenášané. Kondukcia je to v podstate prenos tepla priamym kontaktom.

1.1.4 RADIÁCIA (ŽIARENIE)

Radiácia je strata tepla vo forme infračervených vln, krátkodobým (slnečným) žiarením a dlhodobým (zemským) žiarením. Solárne žiarenie je prijaté vo forme viditeľného svetla

a slnečného infračerveného žiarenia. Zemské žiarenie je vyžarované ako funkcia teploty a emisivity. Energická rovnováha človeka je ovplyvnená absorbovanou radiačnou energiou a žiarením, ktoré vyžaruje alebo odráža ľudské telo [4].

1.1.5 ODPAROVANIE

Odparovanie vody nastáva, keď nie sú tepelné straty spôsobené konvenciou a radiáciou schopné udržiavať tepelnú rovnováhu v horúcom prostredí počas namáhavých fyzických aktivít. Odparovacie tepelné straty sa objavujú cez viacero mechanizmov: difúziou vody cez kožu, sekréciou potu a odparovaním vody. Strata potu je ovplyvnená fyzickými a fyziologickými podmienkami v blízkosti alebo na povrchu kože, ako napríklad podmienkami prostredia, schopnosťami odevu, produkciou metabolického tepla a stavom hydratácie [4].

1.1.5 DÝCHANIE

Dýchanie je jeden z dôležitých spôsobov výmeny tepla so životným prostredím, distribuovaných cez časti tela dýchacím traktom rozdeleným na pľúca, tvár a krk.

1.2 AKTÍVNY SYSTÉM

Aktívny systém simuluje odozvy ľudského termoregulačného systému. Tento kontrolný systém ľudskej termoregulácie je zvyčajne rozdelený na tri časti: mechanizmus porovnávania snímania, mechanizmus sumarizácia a chybového signálu a regulačný mechanizmus. Efektívnymi mechanizmami sú potenie, vazodilatácia, vazokonstrikcia a triaška. Kožné snímače produkujú pozitívne alebo negatívne príslušné signály a prenášajú ich na tepelné integrátory [4]. Priemerná teplota kože, teplota jadra a miera zmeny teploty kože sú hlavné signály pre aktívny systém. Zmena teploty mozgu nad prahovú hodnotu (ďalej set-point) vedie k vazodilatácii. Ak nie je dostatočná na strácanie tepla z tela, je aktivované potenie pre proces straty tepla. Vazokonstrikcia je výsledkom zníženia teploty kože. Avšak, ak je telo vystavené chladnému prostrediu a vazokonstrikcia nestačí na udržanie tepla v tele, telo sa začne triasť aby udržalo teplo [6].

Hypotalamus (časť mozgu) kontroluje rôzne fyziologické procesy aby reguloval telesnú teplotu. Jeho kontrolné správanie je v prvom rade proporcionálne na odchýlky od požadovaných hodnôt teploty s aspektmi odpovedajúcim určitým integrálom a deriváciám. Najdôležitejším a často používaným fyziologickým procesom je regulovanie krvného toku na povrch kože: ak vnútorná teplota vystúpi nad set-point hodnotu, tak do kože smeruje viac krvi.

Termoregulačná odozva je určená spätnou väzbou z termoreceptorov. Kontrolný systém odráža procesy nervového systému, riadené teplotnými signálmi a vyjadrením termoregulácie v rôznych segmentoch. Chybové signály, v porovnaní s aktuálnym tepelným stavom a zodpovedajúcim setpoint-om, sa používajú na meranie tepelného napätia v tele. Chybové signály z teploty kože a jadra sú signálmi pre rovnice regulácie ľudskej teploty. [4]

2 TEPELNÝ POCIT A TEPELNÝ KOMFORT

2.1 TEPELNÝ POCIT

Vplyv tepelného prostredia na človeka je označovaný termínom tepelný pocit, ktorý je definovaný ako „bežný vedomý pocit“ [8]. Je to subjektívna veličina, teda každý človek vníma dané tepelné prostredie inak. Existuje veľa stupníc merania tepelného pocitu. Jednou z nich je stupnica ASHRAE, ktorá sa rozdeľuje do kategórii: horúce, teplé, mierne teplé, neutrálne, mierne chladné, chladné a studené.

2.2 TEPELNÝ KOMFORT

Základnou veličinou pre popis vnímania okolitého tepelného prostredia je tepelný komfort. „Tepelný komfort je stavom mysle, ktorý vyjadruje spokojnosť s tepelným prostredím“ [8]. Tepelný komfort súvisí s tepelným stavom človeka, ktorý je výsledkom tepelnej záťaže. Na vnímanie tepelného komfortu má najvýznamnejší vplyv šesť primárnych faktorov [8].

2.2.1 PRIMÁRNE FAKTORY

Medzi primárne faktory patrí rýchlosť metabolickej produkcie, tepelný odpor odevu, rýchlosť prúdenia vzduchu, relatívna vlhkosť vzduchu v miestnosti, teplota vzduchu a stredná radiačná teplota.

Aktivita príslušnej osoby, ktorá je bežne označovaná ako metabolická produkcia tepla, je ovplyvňovaná pohlavím, vekom, mierou stresu, stravovacími návykmi, zdravotným stavom, dedičnými predpokladmi, no zo všetkého najviac na intenzitou vykonanej činnosti. Na popis tejto intenzity sa používa jednotka met. 1 met sa rovná činnosti osoby, ktorá sedí v pokoji a produkuje tepelný tok $58,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Ďalším z hlavných faktorov ovplyvňujúcich odvod tepla z ľudského tela do okolia je odev a spolu s metabolickou produkciou tepla patria medzi osobné faktory, ostatné štyri sú faktory ovplyvnené prostredím. Jeho najdôležitejším parametrom je takzvaný tepelný odpor odevu a jednotka ktorá ho definuje je clo. 1 clo sa odpovedá odevu s tepelným odporom $0,155 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$. Najpresnejšie spôsoby merania tepelného odporu odevu sú tepelné figuríny alebo vyhrievané dosky. Tepelné figuríny môžu vďaka zohľadňovaniu vplyvu geometrie ľudského tela na tepelné straty merať citlivé tepelné straty z kože v danom prostredí [8].

Rýchlosť prúdenia vzduchu spolu s intenzitou turbulencie ovplyvňuje prenos tepla prúdením a odparovaním vlhkosti z pokožky a môže spôsobiť pocit prievanu. Jednotkou je m/s. Relatívna vlhkosť vzduchu udáva mieru nasýtenia suchého vzduchu vodnou parou. Udáva sa v percentách. Pokiaľ je $\varphi = 1$, znamená to, že vodná para už nie je schopná poňať viac vlhkosti a dochádza tak ku kondenzácii vlhkosti na okolité povrchy. Parciálny tlak sýtej pary vo vzduchu je závislý na teplote vzduchu.

Teplota vzduchu je teplota vzduchu v interiéri bez vplyvu radiácie z okolitých povrchov. Stredná radiačná teplota je kľúčovou premennou v tepelných výpočtoch pre ľudské telo. Ide o premennú teplotu imaginárneho priestoru, pri ktorom sa radiačný prenos tepla z ľudského tela rovná radiačnému prenosu tepla v aktuálnom nerovnomernom priestore. Možno ju získať kombinovaním meraní teploty Zeme, teploty vzduchu a rýchlosti prúdenia vzduchu. Presnosť takto určenej strednej radiačnej teploty sa značne líši v závislosti od typu prostredia a presnosti jednotlivých meraní [8].

2.2.2 SEKUNDÁRNE FAKTORY

Teplota, rýchlosť vzduchu, vlhkosť, ich zmeny a osobné parametre metabolizmu a izolácie odevu sú primárnymi faktormi, ktoré priamo ovplyvňujú tok energie a tepelný komfort. Avšak existuje veľa sekundárnych faktorov, ktoré môžu mať miernejší vplyv na komfort [8]. Všeobecným problémom s predikciou ľudskej tepelnej reakcie bola veľká interindividuálna variabilita v odpovedi na napätie pod rovnakou záťažou. Dôvody zahŕňajú napríklad rozdiely vo fyzickej kondícii, stave adaptácie, hypertenzie, veku, etnického pôvodu, pohlavia atď [5].

Medzi sekundárne faktory patrí napríklad zmena dní. Fanger [9] určil preferovanú teplotu okolia pre každú zo skupín ľudí za rovnakých podmienok za štyroch rôznych dní. Pretože štandardná odchýlka bol iba 0.6 K, Fanger dospel k záveru že podmienky komfortu pre jednotlivca môžu byť reprodukované a budú sa líšiť len mierne zo dňa na deň [8]. Ďalším je vek, s ktorého rastom klesá úroveň fyzickej aktivity [6].

Ďalším sekundárnym faktorom je pohlavie. Muži a ženy preferujú takmer rovnaké tepelné prostredie. Teplota kože u žien a straty z odparovania sú mierne nižšie ako u mužov, čo je spôsobené o niečo pomalším metabolizmom u žien [8].

Posledným spomenutým faktorom sú sezónne zmeny. Ľudia sa nemôžu prispôbiť uprednostňovaniu teplejšieho alebo studenšieho prostredia, z čoho vyplýva, že nie sú rozdiely medzi podmienkami komfortu v zime a v lete. Na druhej strane je odôvodnené očakávať, že sa podmienky komfortu menia počas dňa, pretože vnútorná teplota tela je nastavená na denný rytmus s maximom neskoro večer a minimom skoro ráno [8].

3 MODELÝ PRE PREDIKCIU

3.1 TERMOFYZIOLOGICKÉ MODELÝ

Termofyziologické modely sú matematické popisy fyziologických reakcií a komplexného prenosu tepla ľudského tela za rôznych environmentálnych podmienok. Sú súčasťou predikčnej metódy na hodnotenie tepelného komfortu a pocitu. Vypočítaný výkon termofyziologického modelu (teplota jadra a kože) sa používajú ako vstup pre tepelné modely, ktoré predpovedajú tepelný komfort a pocit. Vývoj pokročilých termoregulačných modelov sa začal v rámci Národnej leteckej a vesmírnej správy Spojených štátov (NASA) a armády Spojených štátov len na účel posúdenia vplyvu extrémnych environmentálnych podmienok na ľudské telo. V posledných rokoch boli vyvinuté rôzne termofyziologické modely na zlepšenie predpovede tepelných reakcií obyvateľov budov [6]. V práci som vybral modely, ktoré majú presah do problematiky predikcie tepelného pocitu a komfortu človeka, vďaka vyvinutým indexom a pod.

Tab 1.1 je do roku 2012 vypracovaná Pokorným v jeho dizertačnej práci [10], ktorú som rozšíril o dva modely, ktoré boli vyvinuté v posledných rokoch. Pre hlbšiu analýzu som si vybral tieto modely:

- Wisslerov dynamický model
- Stolwijkov model
- Gaggeov 2 uzlový model
- Fialov model
- Tanabeho dynamický model
- Kohri a Mochidov model
- Fialov Individualizovaný UTCI-Fialov model

Nakoľko Stolwijkov model je obsiahnutý v modely od Gagge-a a Tanabeho, a Fialov model je rozšírením Wisslerovho, preto tieto modely nebudú hlbšie rozoberané.

3.1.1 GAGGOV 2 UZLOVÝ MODEL

Ide o model fyziológie človeka, ktorý vychádza zo Stolwijkovho 25 uzlového modelu [11], ale na rozdiel od neho, Gagge uvažuje ľudské telo ako celok rozdelený do dvoch oddielov. 2 uzlový model fyziológie človeka a tepelného diskomfortu [12] sa stal v roku 1986 súčasťou normy ASHRAE [8] (American Society of Heating). Nasledujúce informácie sú čerpané práve z tejto normy.

2 uzlový model môže byť požívaný k predpovedaniu fyziologických reakcií alebo odoziev na prechodné situácie, prinajmenšom pre nízke a mierne úrovne aktivity v chladnom, až veľmi horúcom prostredí. Tento jednoduchý model považuje človeka za dva sústredné tepelné oddiely, ktoré predstavujú pokožku a jadro tela. Pokožka sa skladá z dermy a epidermy a má hrúbku približne 1.6 mm. Jej hmotnosť, ktorá tvorí 10% celkovej hmotnosti človeka, závisí od množstva krvi, ktorá cez ňu preteká na termoreguláciu. Predpokladá sa, že teplota v priestore je rovnomerná, takže jediné teplotné gradienty sú medzi oddielmi. V chladnom prostredí môže byť prietok krvi do končatín znížený, aby sa zachovalo teplo životne dôležitých orgánov, čo malo za následok axiálne teplotné gradienty v ramenách, nohách, rukách a chodidlách. Náročné cvičenie s určitými svalovými skupinami alebo asymetrické podmienky prostredia môžu tiež spôsobiť nerovnomerné teploty priestoru a tým obmedziť

presnosť modelu. Predpokladá sa že všetko teplo sa vytvorí v priestore jadra. V chlade môže triaška a svalové napätie vytvárať ďalšie metabolické teplo. Toto zvýšenie súvisí s poklesom teploty pokožky (t_{sk}) a jadra (t_{cr}) z ich prahových hodnôt, ako vo vzťahu (3.1).

Tab 3.1 Historický vývoj fyziologických modelov. Prevzaté od Pokorný [10].

Autor	Popis
Pennes, 1948	1 segmentový stacionárny analytický model predlaktia
Wyndham a Atkins, 1960	1 segmentový dynamický model človeka
Crosbie a kol., 1960	1 segmentový stacionárny termoregulačný model človeka
Wissler, 1964	15 segmentový dynamický model človeka
Stolwijk a kol., 1971	25 uzlový dynamický termoregulačný model človeka
Gagge a kol., 1971	2 uzlový dynamický model človeka
Hsu, 1977	Kansas State University (KSU) model človeka
Werner a kol., 1989	3D dynamický model človeka, 400000 uzlov
de Dear a Ring, 1990	40 vrstvý model, riešený metódou konečných diferencií
Smith, 1991	3D dynamický model človeka
Jones a Ogawa, 1992	KSU model s odevom
Matsunaga a kol., 1993	3 segmentový model (pre Isuzu Motors)
Werner a Webb, 1993	6 segmentový stacionárny model
Lotens, 1993	Modifikovaný Gaggov model (CCX, odev)
Fu, 1995	3D dynamický model človeka v odev
Takemori a kol., 1996	3D dynamický model človeka riešený met. kon. Prvkov
Pinić a kol., 1997	Dynamický model človeka MATHER
Shoji a kol., 1997	3D dynamický model človeka riešený met. kon. prvkov
Murakami a kol., 1997, Murakami a kol., 1998	Gaggov model, využitie CFD
Huizenga a kol., 2001	Fyziologická časť Berkeley modelu
Havenith, 2001	Gaggov model, využitie CFD
Fiala, 1998, Fiala a kol., 1999, Fiala a kol., 2001, Fiala a kol.,	10 segmentový dynamický model
Tenabe a kol., 2002	16 segmentový dynamický model, využitie CFD
Kohri a Mochida, 2002a, Kohri a Mochida, 2002b	Viacsegmentový Gaggov model
Salloum a kol., 2007	15 segmentový Wisslerov model
Lichtenbelt a kol., 2007	Individualizovaný Fialov model
Wan a Fan, 2008	Tanabeho model s detailným popisom vrstiev oblečenia
Murakami a kol., 2007	17 segmentový upravený Tanabeho model
Takada a kol., 2009	Individualizovaný Gaggov model
Ferreira a Yanagihara, 2009	Kombinácia modelu od Wisslera a Takemoriho
Kingma, 2011	Prepracovaný aktívny systém Fialovho modelu
Fiala a kol., 2012	Individualizovaný UTCI-Fialov model
Schellen a kol. 2013 [28]	ThermoSEM model v kombinácii s Berkeley
Chen, 2018 [29]	mPet model

$$M_{shiv} = 19,4(34 - t_{sk})(37 - t_{cr}) \quad (3.1)$$

kde sú teplotné podmienky nastavené na nulu, ak sú negatívne. Teplo sa stratí z jadra prostredníctvom dýchania. Rýchlosť úbytku tepla z dýchania je spôsobená citlivými a latentnými zmenami dýchaného vzduchu a rýchlosťou vetrania [8].

Okrem toho sa teplo vedie pasívne z jadra do pokožky. Toto je modelované ako nehmotný tepelný vodič. Regulovateľná dráha tepelných strát z jadra pozostáva z čerpania variabilného množstva teplej krvi, ktorá sa dostáva do pokožky na chladenie. Tento periférny prietok krvi q_{bl} [$l/(h \cdot m^2)$] závisí od odchýlok teplôt pokožky a jadra a ich príslušných prahových hodnôt:

$$\dot{q}_{bl} = \frac{BFN + c_{dil}(t_{cr} - 37)}{1 + S_{tr}(34 - t_{sk})} \quad (3.2)$$

teplotné podmienky môžu byť len > 0 . Ak je odchýlka negatívna, podmienka je nastavená na nulu. Pre priemerné osoby sa koeficienty BFN , c_{dil} a S_{tr} rovnajú 6,3; 50 a 0.5. Ďalej prietok krvi \dot{q}_{bl} v koži je maximálne 90 l/(h.m²). U veľmi zdatných a dobre tréovaných atlétov možno očakávať $c_{dil} = 175$ [8].

Suché tepelné straty q_{dry} z pokožky pretekajú cez oblečenie vedením a potom paralelnými cestami do vzduchu a okolia. Odparované teplo má podobnú cestu, tečúcu cez oblečenie a skrz vzdušnú okrajovú vrstvu. Maximálne vyparovanie E_{max} sa vyskytuje, ak je pokožka úplne pokrytá potom. Skutočná rýchlosť odparovania E_{sw} závisí od miery pokožky pokrytej potom w :

$$E_{sw} = wE_{max} \quad (3.3)$$

kde w je E_{rsw}/E_{max} .

Rýchlosť regulačného potenia E_{rsw} [W/m²] (rýchlosť, ktorou je voda dostávaná na povrch pokožky), môže byť predpovedaná odchýlkami medzi teplotami pokožky a jadra od ich prahových hodnôt :

$$E_{rsw} = c_{sw}(t_b - t_{bset})exp[-(t_{sk} - 34)/10,7] \quad (3.4)$$

kde $t_b = (1 - \alpha_{sk})t_{cr} + \alpha_{sk}t_{sk}$ je priemerná telesná teplota a $c_{sw} = 170$ W/(m².K). Teplotná odchýlka je nastavená na nulu ak je záporná. Podiel z celkovej telesnej hmotnosti považovanej za tepelnú v každom priestore je α_{sk} :

$$\alpha_{sk} = 0,0418 + \frac{0,745}{Q_{bl} - 0,585} \quad (3.5)$$

Regulačné potenie E_{rsw} v modely je limitované na 1 l/(h.m²) alebo 670 W/m². E_{rsw} sa vyparuje z kože, ale ak je E_{rsw} väčší ako E_{max} , prebytok odkvapká z kože [8].

Vyrovnáva sa energetická rovnováha jadra:

$$M + M_{shiv} = W + q_{res} + (K + SkBFc_{p,bl})(t_{cr} - t_{sk}) + m_{cr}c_{cr}\frac{dt_{cr}}{d\theta} \quad (3.6)$$

a pre pokožku,

$$(K + SkBFc_{p,bl})(t_{cr} - t_{sk}) = q_{dry} + q_{evap} + m_{sk}c_{sk}\frac{dt_{sk}}{d\theta} \quad (3.7)$$

Kde c_{cr} , c_{sk} a $c_{p,bl}$ sú špecifické tepelné kapacity jadra, pokožky a krvi [$c_{cr} = c_{sk} = 3500$ a $c_{p,bl} = 4190$ J/(kg.K)], a $SkBF$ je $\rho_{bl} \cdot Q_{bl}$ kde ρ_{bl} je hustota krvi (12,9 kg/l).

Tieto rovnice môžu byť preskupené z hľadiska $\frac{dt_{cr}}{d\theta}$ a $\frac{dt_{sk}}{d\theta}$, a numericky integrované s malými časovými krokmi od pôvodných podmienok alebo predchádzajúcich hodnôt na nájdenie t_{cr} a t_{sk} v rôznom čase.

Po výpočte hodnôt t_{cr} , t_{sk} a w , model používa empirické výrazy na predpovedanie tepelného pocitu (TSENS) a tepelného diskomfortu (DISC). Tieto indexy sú založené na 11- bodových

číselných stupniciach, kde kladné hodnoty predstavujú teplú stránku neutrálneho pocitu alebo komfortu a záporné hodnoty predstavujú chladnú stranu. TSENS je založený na rovnakej škále ako PMV index, vysvetlený v kapitole o PMV-PPD, s dodatočnými podmienkami pre ± 4 (veľmi teplo/chladno) a ± 5 (neúnosne teplo/chladno). Pri rozoznaní rovnakej pozitívnej/negatívnej konvencie pre teplé/ studené nepohodlie je DISC definovaný ako:

- 5 neúnosné
- 4 obmedzená tolerancia
- 3 veľmi nepohodlné
- 2 nepríjemné
- 1 mierne nepríjemné ale prijateľne
- 0 pohodlné

TSENS je definovaný ako odchýlka od priemernej telesnej teploty t_b od chladných a teplých set-pointov reprezentujúcich hornú a dolnú hodnotu pre zónu regulácie odparovania: $t_{b,c}$ a $t_{b,h}$. Hodnoty týchto prahových hodnôt závisia od objemu vnútornej výroby tepla a sú vypočítané podľa rovníc (3.9) a (3.10).

$$t_{b,c} = \frac{0,194}{58,15} (M - W) + 36,301 \quad (3.8)$$

$$t_{b,h} = \frac{0,347}{58,15} (M - W) + 36,669 \quad (3.9)$$

Hodnota TSENS sa potom určí pomocou

$$\text{TSENS} \begin{cases} 0,4685(t_b - t_{b,c}); & t_b < t_{b,c} \\ 4,7\eta_{ev}(t_b - t_{b,c})/(t_{b,h} - t_{b,c}); & (t_{b,c} \leq t_b \leq t_{b,h}) \\ 4,7\eta_{ev} + 0,4685(t_b - t_{b,h}); & t_{b,h} < t_b \end{cases} \quad (3.10)$$

kde η_{ev} účinnosť odparovania (predpokladá sa, že je 0,85).

DISC je numericky zhodný s TSENS, ak je t_b nižšia ako jeho chladová prahová hodnota $t_{b,c}$ a súvisí so zvlhčením pokožky, keď je teplota regulovaná potením:

$$\text{DISC} \begin{cases} 0,4685(t_b - t_{b,c}) & t_b < t_{b,c} \\ \frac{4,7(E_{rsw} - E_{rsw,req})}{E_{max} - E_{rsw,req} - E_{dif}} & t_{b,c} \leq t_b \end{cases} \quad (3.11)$$

$E_{rsw,req}$ sa vypočíta ako vo Fangerovom modeli [13], ktorý je spomenutý v kapitole o PMV-PPD modeli.

3.1.2 FIALOV MODEL DYNAMICKÉHO TEPELNÉHO POCITU

Vo Fialovej štúdií z roku 2003 [14] bol vytvorený model tepelného komfortu na predikciu dynamického tepelného pocitu (DTS) z viacuzlového, dynamického modelu ľudskej termoregulácie, ktorému sa venoval v predchádzajúcich štúdiách [15], [16], v ktorých popísal vývoj aktívneho a pasívneho prenosu tepla. Regresnou analýzou zo 7000 meraní približne

2000 subjektov vystavených 220 rôznym teplotám v rozmedzí od $13^{\circ}\text{C} \leq t_a \leq 48^{\circ}\text{C}$ a úrovni aktivity medzi 1 a 10 met.

Kompletný model pre predikciu dynamického tepelného pocitu DTS, definovaný podľa 7-stupňovej stupnice tepelného pocitu ASHRAE má formu :

$$\text{DTS} = 3 \times \tanh h \quad (3.12)$$

$$\left[a \cdot \Delta t_{sk,m} + F_2 + \left(0,11 \frac{dt_{sk,m}^{(-)}}{dt} + 1,91 e^{-0,681t} \cdot \frac{dt_{sk,m}^{(+)}}{dt_{max}} \cdot \frac{1}{1+F_2} \right) \right] \quad (3.13)$$

kde $a = 0,3 \text{ K}^{-1}$ pre $\Delta t_{sk,m} < 0$; a $1,08 \text{ K}^{-1}$ pre $\Delta t_{sk,m} > 0$. $\frac{dt_{sk,m}^{(-)}}{dt} = 0$ pre $\frac{dt_{sk,m}}{dt} > 0$ a F_2 vypočítame z rovnice

$$F_2 = 7,94 \times \exp \left(\frac{-0,902}{\Delta t_{hy} + 0,4} + \frac{7,612}{\Delta t_{sk,m} \pm 4} \right) \quad (3.14)$$

teda vstupnými podmienkami pre tento model je teplota jadra (hypotalamu) t_{hy} a stredná teplota pokožky $t_{sk,m}$ a jej časovej derivácii $\frac{dt_{sk,m}}{dt}$.

3.1.3 TANABEHO DYNAMICKÝ MODEL

Ďalším modelom založenom na princípe Stolwijkového modelu [11] je Tanabeho 65-uzlový model (65MN), ktorý reprezentuje priemerného človeka o hmotnosti 74,43 kg a ploche pokožky 1,87 m². Telo je rozdelené na 16 segmentov (hlava, hrudník, chrbát, panva, ľavé rameno, pravé rameno, ľavá ruka, pravá ruka, ľavá dlaň, pravá dlaň, ľavé stehno, pravé stehno, ľavá noha, pravá noha, ľavé chodidlo, pravé chodidlo). Jednotlivé segmenty sa skladajú zo štyroch vrstiev:

- Jadro
- Svaly
- Tuk
- Pokožka [17].

Teplo sa prenáša cez tkanivá medzi jednotlivými segmentmi vedením. Medzi telom a prostredím sa teplo vymenia konvenciou, radiáciou, odparovaním a dýchaním. Výmena tepla medzi lokálnymi tkanivami a krvným obehom je zjednodušená ako výmena tepla medzi lokálnymi tkanivami a centrálnym krvným zásobníkom [17]. Vstupom do tohto modelu sú činitele prostredia ovplyvňujúce tepelný komfort, teda metabolická produkcia tepla a tepelný odpor odevu a popisuje termoregulačné mechanizmy vazomotoriky, potenia a svalovej triašky, ktoré ovplyvňujú pasívny systém. V nasledujúcich rovniciach bude písmenko i reprezentovať číslo segmentu a písmenko j rozdielne vrstvy.

$$\text{Vrstva jadra : } C(i, 1) \frac{dt^{(i,1)}}{dt} = Q(i, 1) - B(i, 1) - D(i, 1) - RES(i, 1) \quad (3.15)$$

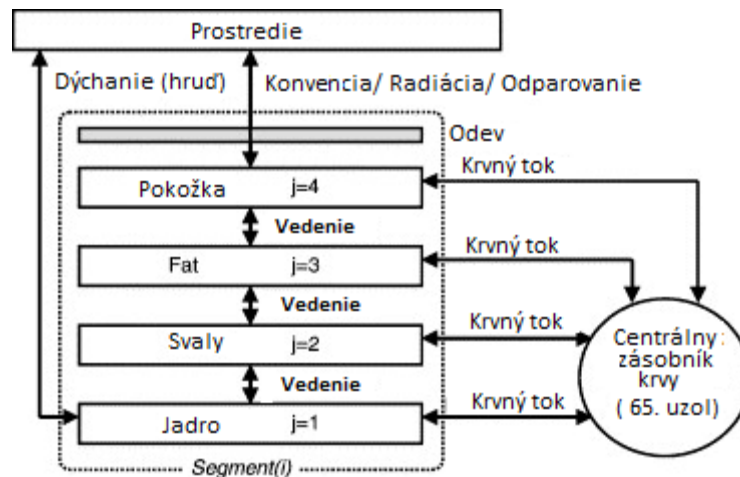
$$\text{Vrstva svalov : } C(i, 2) \frac{dt^{(i,2)}}{dt} = Q(i, 2) - B(i, 2) + D(i, 1) - D(i, 2) \quad (3.16)$$

$$\text{Vrstva tuku : } C(i, 3) \frac{dt^{(i,3)}}{d\tau} = \dot{q}(i, 3) - B(i, 3) + D(i, 2) - D(i, 3) \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \text{Vrstva pokožky : } C(i, 4) \frac{dt^{(i,4)}}{d\tau} = & \dot{q}(i, 4) - B(i, 4) + D(i, 3) \\ & - \dot{q}_t(i, 4) - E(i, 4) \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\text{Centrálne zásobisko krvi : } C^{(65)} \frac{dt^{(65)}}{d\tau} = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^4 B(i, j) \quad (3.19)$$

kde $C(i, j)$ je tepelná kapacita uzlu, $t(i, j)$ je teplota, $\dot{q}(i, j)$ je tepelná produkcia, $B(i, j)$ je teplo vymenené medzi každým uzlom a centrálnym zásobníkom krvi, $D(i, j)$ je teplo prenášané vedením na susednú vrstvu v rámci toho istého segmentu a RES je strata tepla dýchaním a má sa vyskytovať iba vo vrstve jadra uzla hrudného segmentu. $E(i, 4)$ je strata tepla spôsobená vyparovaním na povrchu kože. $\dot{q}_t(i, 4)$ je konvenčný a radiačný pomer tepelnej výmeny medzi povrchom pokožky a prostredím. Na vyhodnotenie vnútorného prostredia používa Tanabe vo svojom modeli [17] štandardnú efektívnu teplotu SET*, ktorá je zadefinovaná v nasledujúcej kapitole.



Obr. 3.1- Koncept 65MN. Prevzaté od Tanabe [17].

Nakoľko je Tanabeho model modelom fyziologickým, výstupy z neho sú stredné teploty pokožky $t_{st,m}$ každého segmentu tela na základe reakcií pasívneho a aktívneho telesného systému a podmienok prostredia. Ak chceme získať informácie o komforte, je k nemu potrebné pridať psychologický model. Streblow [27] prepojila Tanabeho model [17] s modelom od Zhang [23] rozobratým podrobnejšie nižšie. Model Tanaby je dobrým základom na predvídanie komfortu v nerovnomernom a prechodnom prostredí. Na základe fyziologických výsledkov modelu od Tanabe predpovedať celkový a lokálny tepelný pocit a komfort v pripojenom psychologickom modeli založenom na teórii Zhangovej [27].

3.1.4 MODEL PODĽA KOHRI

Na začiatku vývoja viacsegmentového Gaggovho modelu zistili, že 2 uzlový Gaggov model [12] je jednoduchý, ale sú potrebné modifikácie pre praktické použitie. Cieľom tohto modelu je predpovedať rozloženie tepelného toku q_{sk} cez teplotu pokožky t_{sk} a miery pokožky pokrytej potom w . Pred vyšetrením tohto modelu sa snažili predpovedať tieto faktory

konvenčným 2 uzlovým modelom pre každú časť tela zvlášť. Výsledkom však bola neprimeraná fyziologická odpoveď sprevádzaná triaškou a potením, čo bolo spôsobené rozdielmi v prenose tepla z jadra do každej ďalších častí tela[24] .

Na rozdiel od 2 uzlového modelu má viacsegmentový model tieto funkcie:

- Tepelná rovnováha je vypočítaná pomocou dvojuzlového modelu pre každý segment
- Teplota jadra má rovnakú teplotu pre každú časť tela, ktorá je rovnaká s teplotou arteriálnou
- V úvahu je braný účinok odvodu tepla obehom krvi v tele
- Teplota kože má individuálne hodnoty pre každé oddelenie podľa tepelného prostredia
- Distribúcia toku krvi do pokožky, metabolické teplo a potenie súvisiace s reguláciou teploty sú založené na podrobnom modeli prenosu tepla u človeka [24] .

Na Obr. 2.2 je zobrazená základná myšlienka viacsegmentového modelu. Každý segment vychádza z jadra tela a je prijatý 2 uzlovým modelom. V jadre je teplo prakticky unášané, čo simuluje efekt cirkulácie krvi.

Kohri a Michuda [24] v roku 2002 použili tento model na hodnotenie tepelného prostredia vo vozidle. V prvej polovici hodnotenia vykonali tri zisťovania vstupných podmienok, ktorými boli meranie teploty a rýchlosti prúdenia vzduchu a v kabíne, teoretický výpočet prenosu tepla radiáciou a merania konvenčných vlastností prenosu tepla figuríny. V druhej polovici vykonali výpočty s viacsegmentovým modelom a Gaggeovým 2 uzlovým modelom na predikciu tepelnej rovnováhy segmentu a celého tela. Nakoniec predpovedali výsledok hlasovania o tepelnom pociť TSV (thermal sensation vote), ktorý je založený na sedembodovej stupnici tepelného pocitu ASHRAE [8].

Gagge [26] v roku 1971 vyvinul efektívnu teplotu ET, tak aby zahŕňala aj vplyv aktivity a oblečenia a nazýva sa štandardná efektívna teplota SET*. V reálnom prostredí je definovaná ako „teplota v štandardnom prostredí“ [24]. Ak sú v dvoch priestoroch rovnaké SET*, tak vyvolávajú rovnaké reakcie organizmu, aj pri rozdielnej teplote aj vlhkosti vzduchu. Musí však byť splnená podmienka rovnakého oblečenia, aktivity človeka a rýchlosť prúdenia vzduchu.

Na analyzovanie príspevku SET* pre celé telo, bola vynájdená nová metóda na výpočet Local-SET* s týmto viacuzlovým modelom. Pokiaľ však ide o tepelné vlastnosti musí byť SET* konzistentný s Local-SET*.

$$TSV = 0,240 \cdot SET^* - 6,34 \quad (3.20)$$

Predchádzajúci vzorec (3.20) je definovaný pre mladých dospelých ľudí (subjektov) so sedavou aktivitou a nosením oblečenia s tepelným odporom približne 0.5 clo, teplota steny je približne rovná teplote vzduchu a rýchlosť vzduchu je nižšia ako 0.2 m/s po vystavení podmienkam na jednu hodinu[25].

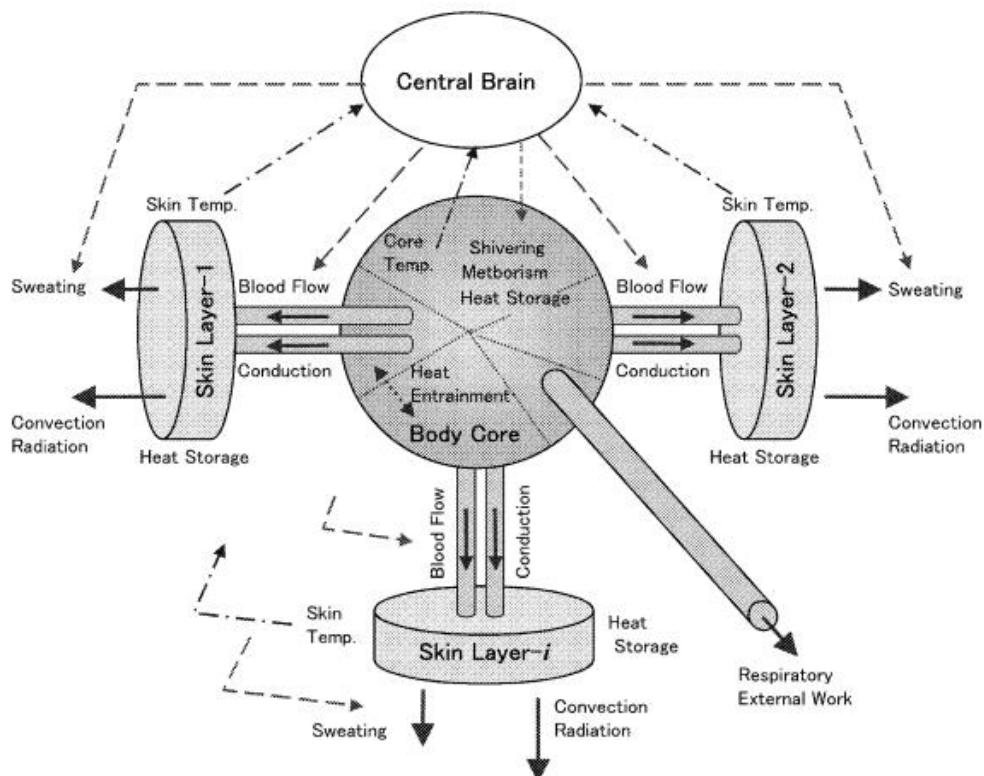
$$TSV = 0,220 \cdot t_a + 0,233 \cdot p_a - 5,673 \quad (3.21)$$

kde p_a [kPa] je tlak pár vzduchu. I keď sa tento vzorec považuje za definovaný za približne rovnakých podmienok ako pri štandardnom stave SET*, môže byť v prostredí akákoľvek

vlhkosť. Ak je ale v klimatickej komore, kde je vlhkosť 50% a $t_a = SET^*$, môžeme predchádzajúcu rovnicu prepísať:

$$TSV = 0,246 \cdot SET^* - 5,92 \quad (3.22)$$

Predpokladá sa, že za rozptyl hlasov tepelného vnímania nie je spôsobený iba individuálnym vnímaním testovaných subjektov, ale aj rozdielom v detailnej tepelnej kondícii subjektov, ako je oblečenie, metabolizmus či fyzické vlastnosti.



Obr. 3.2- Konceptia viacsegmentového modelu, prevzaté od Kohri [24].

3.1.5 UTCI- MODEL

Prostredníctvom iniciatívy Komisie 6 Medzinárodnej biometeorologickej spoločnosti a COST-action Európskej únie, bol vyvinutý nový klimatický index UTCI (Universal ThermalClimate Index). Biometeorologický svet potreboval univerzálny index, ktorý by pokrýval celú škálu klimatických podmienok a oblastí od zimy po teplo a mohol sa používať v aplikáciách na predpoveď počasia, modelovanie vplyvov zmeny klímy či štúdie o chorobnosti a úmrtnosti súvisiacich so zmenou klímy. Po úplnom vývoji by mal model UTCI zohľadňovať nasledujúce funkcie:

- byť založený na najpokročilejších viacuzlových fyziologických modeloch, čo je potrebné pre získanie kľúčových výsledkov zo systematických simulácií;
- zahŕňať schopnosť predpovedať tepelné účinky celého tela (hypotermia a hypertermia, nepríjemné pocity tepla a chladu) a lokálne účinky (chlad na tvári, na rukách či nohách a omrzliny);

- predstavovať index tepelného rozsahu (t.j. teplotu vzduchu v definovanom referenčnom prostredí, ktoré poskytuje rovnaké fyziologické odozvy);
- vyžaduje minimálny počítačový čas na to, aby umožnili meteorológom výpočty celosvetovej siete [5].

Niekoľko viacuzlových fyziologických modelov, ako aj rôzne dvojuzlové modely, boli zvažované pre ich vhodnosť na vývoj UTCI modelu. V porovnaní s intermodely boli modely vyhodnotené porovnaním s ohľadom na predpovedané teploty tela jadra a kože, kalorimetrické premenné, ako aj termoregulačné odozvy. Na základe výsledkov týchto porovnaní experti z COST-action 730 a WG1 na termofyziologické modelovanie súhlasili s použitím Fialovoho viacuzlového modelu ako primeraného prístupu na účely činnosti COST-action. Bolo považované za dôležité, aby používaný model pri vývoji UTCI dokázal reprodukovat' tepelné a regulačné správanie priemernej osoby v spektre atmosférických prostredí. Na tento účel bol pôvodný model Fiala upravený a rozšírený na účely činnosti COST-action 730 [5].

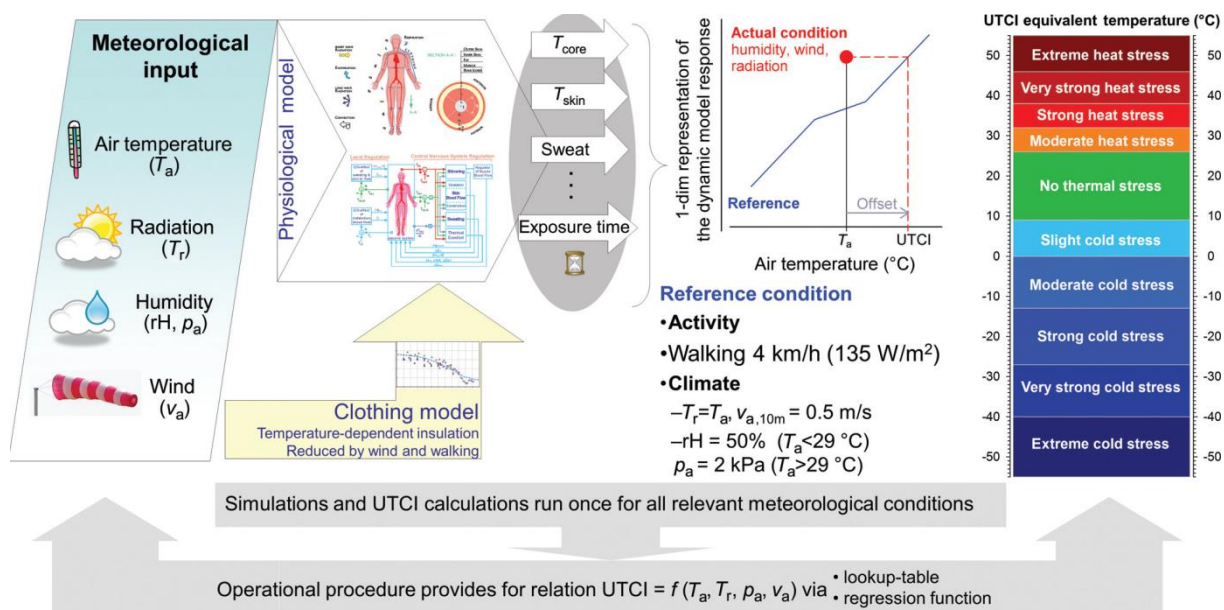
Po zvolení „UTCI-Fiala modelu“ ako základu pre vývoj, ďalším krokom bolo vyvinúť postup používania tohto modelu na preklad skutočných klimatických podmienok do hodnoty UTCI. Bolo rozhodnuté, že sa použije princíp referenčného stavu, s ktorým sa porovnávali skutočné podmienky: „UTCI je definovaný ako teplota vzduchu t_a referenčného stavu, ktorá spôsobuje rovnakú reakciu fyziologického modelu ako aktuálny stav človeka [5]. Odstup, ktorý je odchýlkou UTCI od teploty vzduchu, závisí na aktuálnych hodnotách teploty vzduchu a strednej radiačnej teploty t_r , rýchlosti vzduchu a vlhkosti (vyjadrenej ako tlak vodnej pary v_p). To môže byť napísané v matematických termínoch ako:

$$UTCI = f(t_a; t_r; v; v_p) = t_a + Offset(t_a; t_r; v; v_p) \quad (3.23)$$

Aplikácia tejto charakteristiky si vyžiadala identifikáciu referenčného stavu a reakcie dynamického modelu. Na zmenu klímy na jedinú hodnotu a na uľahčenie interpretácie a pochopenia UTCI musia byť referenčné podmienky (1) definované v zmysle, ktorý zodpovedá väčšine skúseností ľudí a (2) relevantné v celom spektre klimatických zón, v ktorých sa UTCI bude používať. Preto sú nemeteorologické premenné, teda metabolická rýchlosť a tepelné vlastnosti oblečenia (odpor, odolnosť voči pare, priepustnosť vzduchu), veľmi dôležité. Komisia ISB na UTCI definovala v r. 2000 reprezentatívnu vonkajšiu aktivitu ako osobu, ktorá sa pohybuje rýchlosťou 4km/h. Predpokladaná metabolická rýchlosť je by bola 2.3 met pre referenčnú osobu. Bolo rozhodnuté že klíma pre referenčné prostredie bude:

- meteorologická rýchlosť vetra $v = 0,5$ m/s vo výške 10 m (približne 0.3 m/s vo výške 1,1 m);
- stredná radiačná teplota T_r sa rovná teplote vzduchu T_a ;
- tlak pár v_p , ktorý reprezentuje relatívnu vlhkosť vzduchu $\varphi = 0,5$; pri vysokých teplotách vzduchu ($> 29^\circ\text{C}$) bola referenčná vlhkosť požadovaná za konštatný tlak pár pri 20 hPa, pretože vyššie hodnoty by sa len zriedka vyskytovali v prírodných podmienkach [5].

Keďže oblečenie má silný vplyv na fyziologické reakcie, pre UTCI bol vyvinutý samostatný odevný model, ktorý opisuje správanie ľudí v odevoch, založené na teplote okolia. Taktiež boli zabudované vplyvy vetra a aktivita na izoláciu odevu a odolnosť proti parám [5].



Obr. 3.3- Konceptia UTCI odvodená ako ekvivalentná teplota z dynamickej viacnásobnej odozvy termofyziologického UTCI-Fiala modelu, ktorý bol spojený s odevným modelom. Prevzaté od Havenith a Fiala [5].

3.2 TEPELNÉ MODELY

Tepelné modely boli vyvinuté, aby prekonalí rozdielnosti v priamom prieskume subjektov. Matematické rovnice pre takéto modely boli vyvinuté predovšetkým štatistickým prístupom, teda koreláciou experimentálnych podmienok s tepelným pocitom ľudských subjektov [18].

Tabuľka 3.2, ktorá bola vypracovaná do roku 2010 v dizertačnej práci Pokorného [10], som rozšíril a vybral tieto modely na hlbšiu analýzu:

- Fangerov PMV-PPD model
- Nillsonov Model komfortných zón
- Zhangov Berkeley model tepelného komfortu

3.2.1 ČSN ISO 7730 – MODEL PMV-PPD

Tento model je jeden z najpoužívanějších modelov na predikciu tepelného komfortu pre určenie kvality vnútorných prostredí budov. V roku 1970 bol vytvorený Ole Fangerom [13] a v roku 1984 sa stal súčasťou normy ČSN ISO 7730 [19]. Tento model vznikol na základe meraní s vysokým počtom skúmaných osôb, ktoré boli vystavené miernemu vnútornému prostrediu s homogénnymi časovo nepremennými podmienkami. Skúmané osoby hodnotili aký celkový tepelný pocit majú v danom prostredí. Ten bol definovaný podľa ASHRAE sedemstupňovej stupnice spomínanej v podkapitole 2.1. Na základe štatistického spracovania hodnotení prostredia v dotazníkoch bol odvodený vzťah pre výpočet indexu PMV (Predicted Mean Vote), ktorý reprezentuje stredný výsledok hlasovaní väčšej skupiny ľudí o tepelnom pociť v danom prostredí. Fanger [13] prirovnal index PMV k nerovnováhe medzi skutočným tokom tepla z tela v danom prostredí a tokom požadovaným pre optimálny komfort pri špecifickej aktivite [8].

Tab 3.2 Prehľad modelov pre predikciu tepelného komfortu a pocitu. Prevzaté od Pokorný [10].

Autor	Popis
Houghton a Yaglou, 1923	Zavedenie indexu efektívnej teploty
Bedford, 1936	Merítka tepelných pocitov, empirický model
Fanger, 1970, 7730, 1997	PMV-PPD model v ISO 7730 od roku 1984
Givoni a Goldman, 1971	Empirický model tepelného komfortu
Gagge a kol., 1986	Index tepelného komfortu TSENS, DISC
Wyon a kol., 1989	Model ekvivalentnej teploty
Hagino a Hara, 1992	Empirický model tepelného komfortu v aute (pre Nissan)
Taniguchi a kol., 1992	Vplyv chladného vzduchu na pocit v tvári (pro Toyota)
Ingersoll a kol., 1992	3 segmentový Gagge model, spojený s indexom PMV
Gan, 1993	Stacionárny model PMV-PPD, využitie CFD
Wang, 1994	Dynamický model tepelného komfortu
Maué a kol., 1997	8 segmentový model tepelného komfortu
Brown a Jones, 1997	Empirický model tepelného komfortu v aute (pre Ford)
Fiala, 1998, Fiala a kol., 2003	Index DTS – dynamický tepelný pocit
Guan a kol., 2003	Dynamický viacsegmentový Gaggov model
Nilsson, 2004	Model komfortných zón (v ISO 14505)
Streblow, 2008	Prepojení modelu Tanabe a Zhang (pre Airbus)
Zhang, 2003, Zhang a kol., 2010a, Zhang a kol., 2010b, Zhang a kol., 2010c	Berkeley model tepelného komfortu (striktné rozlíšenie pojmu pocit a komfort)
Yao a kol., 2009 [30]	Teoretický adaptívny model (aPMV) tepelného komfortu
Takada a kol. 2013 [31]	Model na predikciu tepelného pocitu celého tela
Zhou a kol., 2014 [32]	SJTU model
Kim, 2015 [33]	Adaptívny nPMV- model

Fanger [13] prepojil údaje o komfote s fyziologickými premennými. Pri danej hladine metabolickej aktivity M , a ak nie je telo ďaleko od tepelnej neutrality, sú priemerná teplota pokožky t_{sk} a rýchlosť potenia E_{rsw} jedinými fyziologickými parametrami, ktoré ovplyvňujú tepelnú rovnováhu. Avšak tepelná rovnováha sama o sebe nepostačuje na dosiahnutie tepelného komfortu. V širokej škále podmienok prostredia, kde môže byť tepelná rovnováha nadobudnutá, iba málo z nich poskytuje i tepelný komfort. Fanger tieto kritéria zjednotil a rozšíril o rovnice tepelnej výmeny medzi človekom a okolím, čím vznikol model PMV [8].

$$PMV = (0,303 \cdot e^{0,036M} + 0,028) \cdot L \quad (3.24)$$

kde L je tepelná záťaž tela v danom prostredí, definovaná ako rozdiel medzi vnútornou výrobou tepla a tepelnými stratami do prostredia pre osobu, ktorá je hypoteticky udržiavaná v komfortných hodnotách t_{sk} a E_{rsw} pri aktuálnej úrovni aktivity. $L = (M - W) - \dot{q}_{sum}$ [W/m^2] kde M je metabolická produkcia tepla, W je mechanická práca a \dot{q}_{sum} je celkový merný tepelný tok medzi človekom a okolím, obvykle sú to tepelné straty spôsobené radiáciou \dot{q}_r , konvenciou \dot{q}_c , vyparovaním \dot{q}_e , potením \dot{q}_{sw} a dýchaním \dot{q}_{res}

$$\dot{q}_{sum} = \dot{q}_r + \dot{q}_c + \dot{q}_e + \dot{q}_{sw} + \dot{q}_{res} \quad (3.25)$$

$$\dot{q}_r = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \quad (3.26)$$

$$\dot{q}_c = f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (3.27)$$

$$\dot{q}_e = 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p] \quad (3.28)$$

$$\dot{q}_{sw} = 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \quad (3.29)$$

$$\dot{q}_{res} = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) + 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \quad (3.30)$$

Tepelné radiačné straty sú vyjadrené v zmysle Stefan-Boltzmannového zákona a difúzia vodných pár cez kožu je vyjadrená ako difúzny koeficient a lineárna aproximácia pre tlak nasýtených pár je zahrnutá v t_{sk} . Dôležitú rolu v modeli hrá výpočet teploty odevu t_{cl} a súčiniteľ prestupu tepla konvekcií h_c , ktoré sú zadané implicitne a pre ich výpočet je nutné použiť iteračnú metódu [8].

$$t_{cl} = 35,7 - 0,0275(M - W) - R_{cl} \cdot (\dot{q}_r - \dot{q}_c) \quad (3.31)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a| & \text{pre } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} \geq 12,1 \cdot \sqrt{v} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v} & \text{pre } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} \leq 12,1 \cdot \sqrt{v} \end{cases} \quad (3.32)$$

f_{cl} je povrchový faktor odevu definovaný ako pomer povrchu odeného človeka k povrchu nahého človeka.

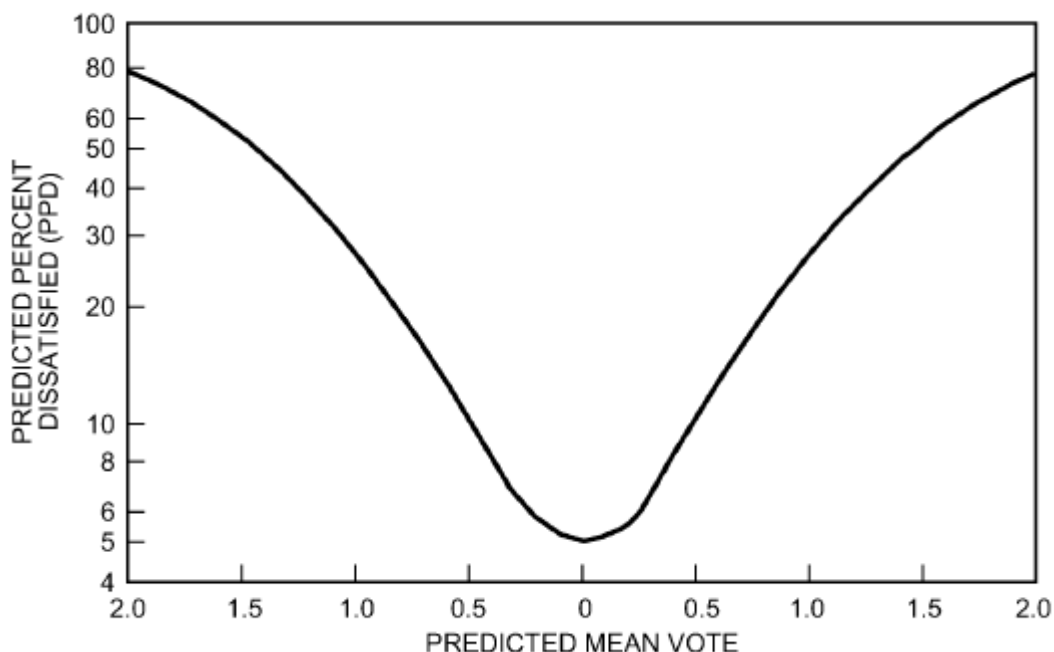
$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 0,2 \cdot I_{cl} & \text{pre } I_{cl} \leq 0,5 \text{ clo} \\ 1,05 + 0,1 \cdot I_{cl} & \text{pre } I_{cl} \geq 0,5 \text{ clo} \end{cases} \quad (3.33)$$

Hodnota indexu PMV, teda spokojnosť ľudí s tepelným pocitom, je vyjadrená indexom PPD (predicted percent dissatisfied), ktorý určuje predpokladané percento nespokojných ľudí.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp[-(0,03353PMV^4 + 0,2179PMV^2)] \quad (3.34)$$

kde sa za nespokojného definuje, každý, kto nehlasoval -1, +1 alebo 0. Tento vzťah je zobrazený na Obr. 3.4.

PMV-PPD model je široko používaný a akceptovaný pre návrh a hodnotenie podmienok komfortu. Norma ISO 7730 obsahuje krátky počítačový výpis, ktorý uľahčuje výpočet PMV a PPD pre širokú škálu parametrov [8].



Obr. 3.4– Závislosť PMV na PPD prevzaté z ASHRAE [8].

3.2.2 MODEL KOMFORTNÝCH ZÓN

Tento model je navrhnutý Nilssonom [20] pre vyhodnocovanie tepelného komfortu v prostredí kabín dopravných prostriedkov. Na vyhodnocovanie vnútorného prostredia kabíny sa používa tepelný manekýn. Technika manekýna bola validovaná v testoch so subjektmi. Tepelné straty figurín ako aj subjektívna reakcia oboch skupín subjektov boli získané pre viac ako 30 druhov klimatických podmienok. Pokusy boli vykonané v malej klimatickej skúšobnej komore, ktorá umožňovala kontrolu asymetrie, ako aj kontrolu všeobecnej teploty. Podmienky zahŕňali rôzne asymetrické tepelné zaťaženia, ktoré vytvárajú rôzne úrovne tepelných strát celého tela [20].

Asymetrie boli vytvorené vertikálnymi teplotnými gradientmi a slnečným žiarením. Používajú úrovne izolácie oblečenia na testovaných subjektoch a figuríne, aby mohli skúmať účinky letného a zimného oblečenia. Do štúdií sa zapojilo celkovo 20 mužských subjektov, ktorý boli vystavení rôznym podmienkam. Tí sedeli v skúšobnej kabíne 60 minút a ich odozvy boli zaznamenané na konci prvého a druhého 30-minútového obdobia. Tepelná citlivosť sa zaznamenávala pomocou stupnice indexu MTV (Mean Thermal Vote):

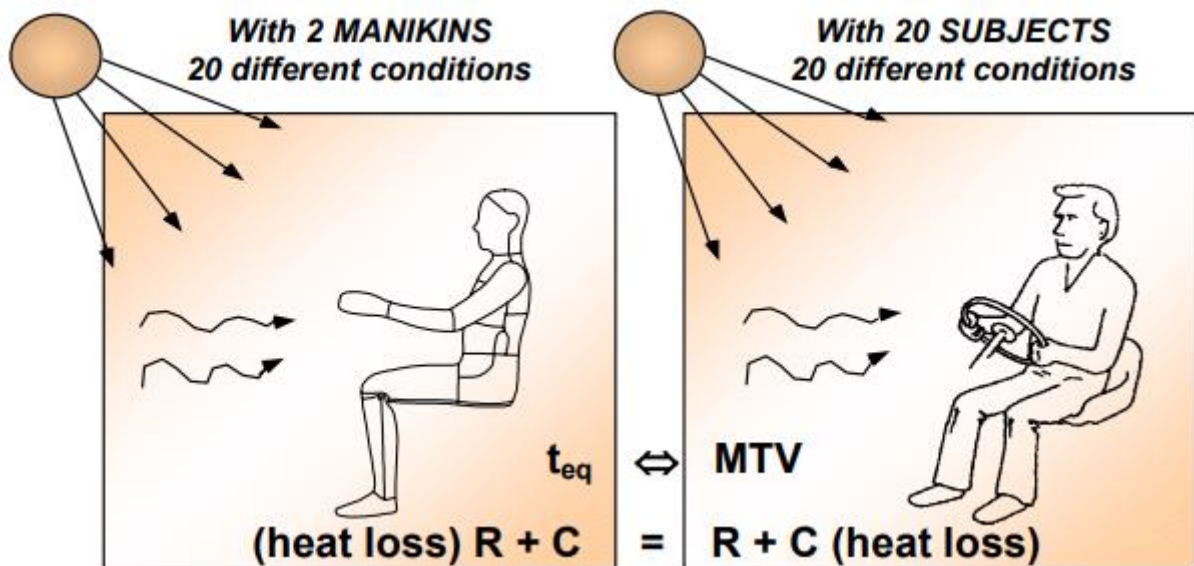
- +3 príliš teplo
- +2 teplo
- +1 teplo ale prijateľne
- 0 neutrálne
- -1 chladno ale prijateľne
- -2 chladno
- -3 príliš chladno

Subjekty hodnotili svoj tepelný pocit pre rôzne segmenty tela a pre telo ako celok. Segmenty zodpovedali samotným alebo kombináciám segmentov tepelného manekýna.

V dvoch sériách experimentov boli celkové tepelné lokálne toky z dvoch figurín prepočítane na ekvivalentné teploty t_{eq} pre celkovo 30 rôznych klimatických podmienok (14 zimných a 16 letných). Tieto ekvivalentné teploty sa potom porovnávali s tepelným pocitom dvadsiatich subjektov vystavených rovnakým podmienkam. Merania v zimných podmienkach boli vykonané použitím extra svetra s celkovým tepelným odporom odevu 1,6 clo a v letných podmienkach bez svetra s tepelným odporom 1,3 clo. Subjekty, ako aj figuríny boli oblečené v rovnakom oblečení s množstvom veľkostí, ktoré sa dali podobne prispôbiť všetkým tvarom tela. Ekvivalentnú teplotu vypočítame z nasledujúceho vzťahu:

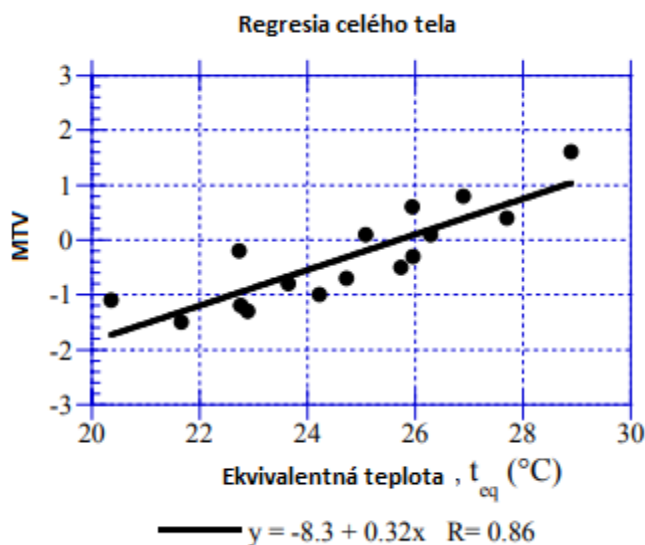
$$t_{eq} = t_s - (R_{cl} + R_a) \cdot \dot{q}_t \quad (3.35)$$

kde t_s je povrchová teplota manekýna, ktorý je ohrievaný na všetkých segmentoch na teplotu 34°C. $R_{cl} + R_a = 0,155$. $I_{cl} + R_a$ je celkový tepelný odpor, ktorý zahŕňa tepelný odpor odevu R_{cl} a tepelný odpor konvenciou vzduchu $R_a = 0,1395 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Merný tepelný tok pocitového tepla sa označuje \dot{q}_t [20].



Obr. 3.5- Manekýni a subjekty boli vystavené 20 identickým asymetrickým klimatickým podmienkam. Prevzaté od Nilssona [20].

MTV a t_{eq} boli pre všetky podmienky podrobené lineárnej regresnej analýze. Boli zistené vysoké korelačné koeficienty pre segmentový tepelný tok a strednú tepelnú charakteristiku subjektov pre tie isté telesné segmenty. Postup sa zopakoval pre všetky rôzne časti tepla, pre ktoré boli získané subjektívne hodnotenia [20].



Obr. 3.6- Regresia MTV na a t_{eq} s meraniami s dvoma manekýnmi. Prevzaté z Nilsson [20].

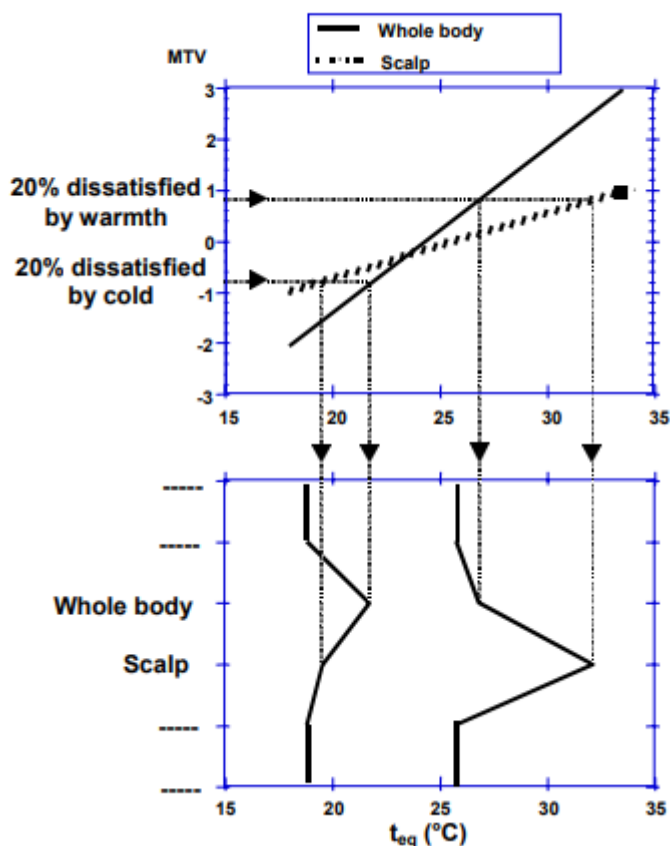
Tento diagram znázorňuje rozsah hodnôt t_{eq} , v ktorých by mali byť umiestnené testovacie hodnoty prijateľné. Hodnoty bližšie k strednému optimálnemu profilu znamenajú lepšie tepelné podmienky.

V ideálnom prípade by priesečník každej čiary s hodnotou $MTV = 0$ (neutrálny tepelný pocit) naznačoval optimálne klimatické podmienky. Použitie jednej stredovej čiary ako základu pre hodnotenie nie je realistické z praktických a ekonomických dôvodov [20].

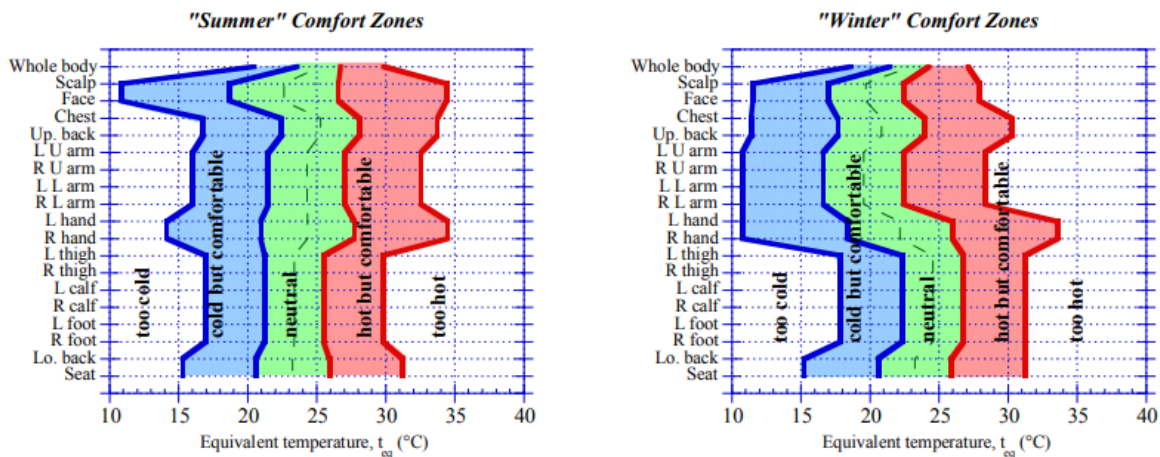
Primeranejším spôsobom hodnotenia tepelných klimatických podmienok je poskytnúť aspoň dva limity hodnôt t_{eq} . Ak by ste sa nachádzali medzi nimi, určité percento subjektov by bolo spokojné. V súčasnosti je zvolená hodnota $\pm 0,8$ MTV, čo je úroveň, pri ktorej sa predpokladá, že 80% osôb je medzi limitnými čiarami spokojných [20]. Pre každú regresiu MTV na t_{eq} je možné tento rozsah odvodiť. Nízke a vysoké hodnoty t_{eq} získané týmto spôsobom sa potom použili na vykreslenie t_{eq} -profilu ako na Obr. 2.6.

Pri použití tohto prístupu sa limity líšia v niektorých bodoch, keď sa používajú rôzne panely a manekýni. Najväčšie rozdiely je možné pozorovať na rukách v zimných podmienkach a na hlave v letných podmienkach. Podobné rozdiely by mohli byť medzi inými figurínami a panelmi v rovnakých situáciách. Taktiež treba uvážiť aj dve hodnoty blízke hraničnej čiare, ale na rôznych stranách, jedna bude považovaná za neprijateľnú a druhá za prijateľnú. Pre relatívne merania jednou a tou istou figurínou môžu byť použité absolútne limity opísané touto konkrétnou figurínou.

Na porovnávacie účely medzi figurínami a prezentáciu absolútnych hodnôt, tak ako aj výsledkov metodických a individuálnych variácií by mali byť zadané „priemerné zóny“, príklad je znázornený na Obr. 3.8.



Obr. 3.7– Konštrukcia t_{eq} -profilu. Prevzaté z Nilsson [20].



Obr. 3.8- Komfortné zóny pre 16 segmentov tela. Skratky znamenajú R- pravá, L- ľavá, U- horná. Schémy komfortných zón odvodené pre letné a zimné odevné komplety používané v štúdiách korelácie subjektov aj figurín. Prevzaté z Nilsson [20].

3.2.3 MODEL PODĽA ZHANG

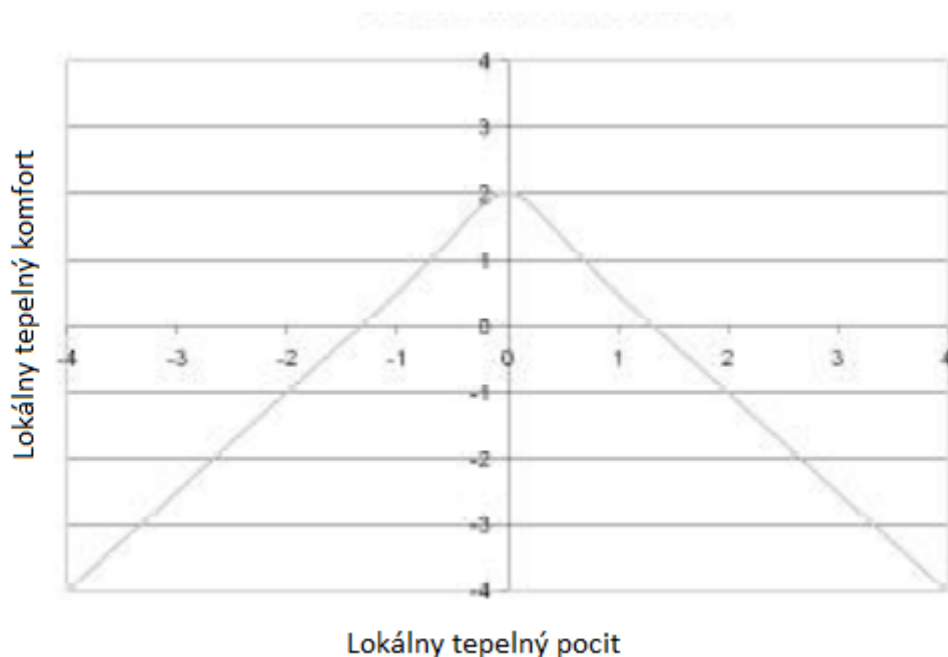
Zo zhromaždených údajov zo 109 pokusov s ľudskými subjektmi vyvinuli v U.C. Berkeley štyri modely na predpovedanie lokálneho a celkového tepelného vnímania komfortu a pocitu

v asymetrických, prechodných podmienkach. Merania teploty pokožky a jadra boli realizované na skupine 27 ľudí rôzneho veku, pohlavia a stavby tela na 28 miestach ľudského tela. Ďalej sa pýtali ľudí na pocit a komfort pre 19 lokálnych častí tela tieto údaje použili ďalej na vývoj modelu. Na Obr. 3.10 sú jednotlivé časti ukázané a sú nimi: čelo, hrud', chrbát, brucho, ľavá paža, pravá paža, ľavé predlaktie, pravé predlaktie, ľavá ruka, pravá ruka, ľavé stehno, pravé stehno, ľavé lýtko, pravé lýtko, ľavé chodidlo, pravé chodidlo, ústa, líce, krk. Výsledky meraní z prstov a krku neboli použité pri vývoji modelu.

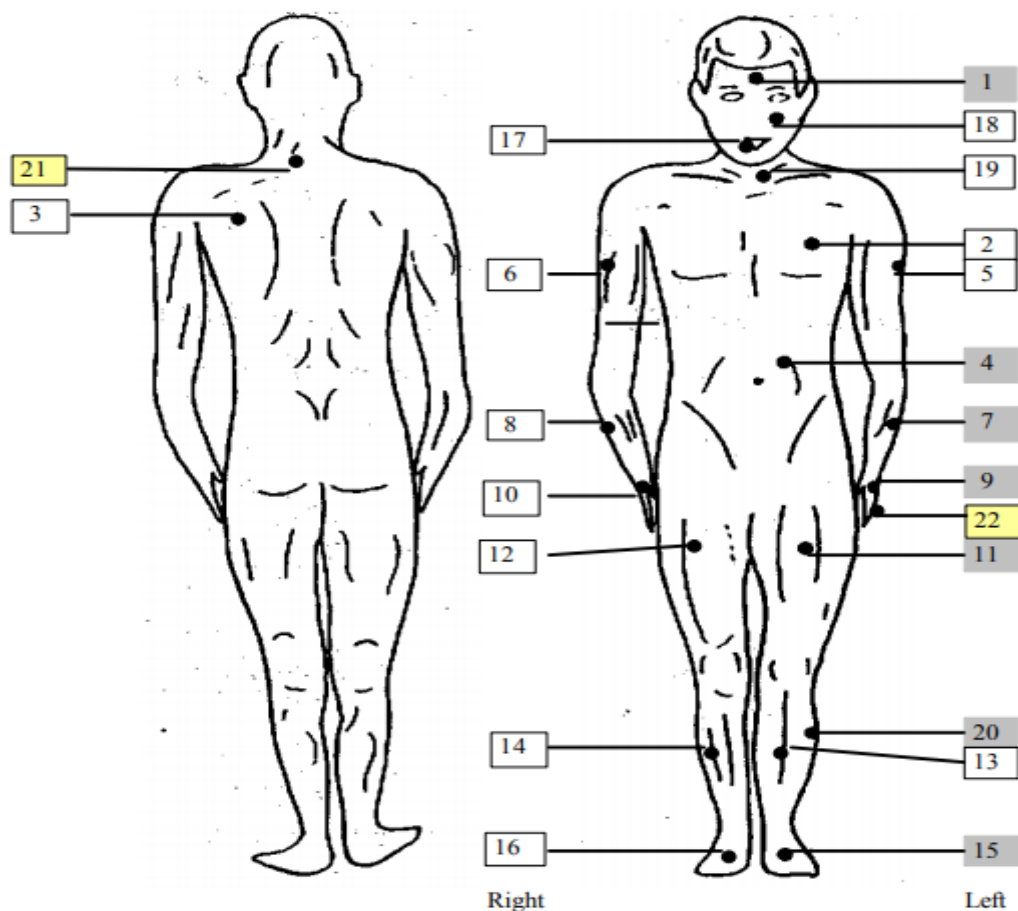
Na základe vnímania lokálneho a celkového pocitu a komfortu ľudí vykonali regresné analýzy s cieľom dospieť k integrácii modelov [21]. Model sa skladá zo štyroch častí, ktorých úlohou je predpovedať:

- Lokálny tepelný pocit $S_l^{(i)}$
- Lokálny tepelný komfort $C_l^{(i)}$
- Celkový tepelný pocit S_o
- Celkový tepelný komfort C_o

V modeli je použitá 9 stupňová stupnica tepelných pocitov ASHRAE a na opis tepelného komfortu je použitá 9 stupňová stupnica tepelného komfortu. Čím sú ľudia teplejší/ studenší, tým nepohodľnejšie sa cítia. Toto je znázornené na Obr. 3.9.



Obr. 3.9- Lineárny model lokálneho tepelného pocitu a komfortu



Obr. 3.10- 22 miest na meranie teploty. Prevzaté z Zhang [21].

V modely lokálneho tepelného pocitu je ako vstup použitá stredná teplota pokožky $t_{sk,m}$ a teplota jadra t_{co} . Stredná teplota pokožky je používaná na reprezentáciu tepelného stavu celého tela [21]. Dá sa vypočítať sedembodovou metódou, v ktorej vystupujú teploty senzorov:

$$\begin{aligned}
 t_{sk,m} = & 0,07 \cdot t_{sk}^{(\text{čelo})} + 0,35 t_{sk}^{(\text{brucho})} + 0,14 t_{sk}^{(\text{ľavá paža})} + 0,05 \cdot t_{sk}^{(\text{ľavá ruka})} \\
 & + 0,16 t_{sk}^{(\text{ľavé stehno})} + 0,13 t_{sk}^{(\text{ľavé lýtko})} + 0,07 \cdot t_{sk}^{(\text{ľavý nárt})}
 \end{aligned} \quad (3.36)$$

Lokálny tepelný pocit

Lokálny tepelný pocit $S_l^{(i)}$ je základnou veličinou modelu od Zhang a ostatné veličiny, teda celkový tepelný pocit S_o , lokálny tepelný komfort $C_l^{(i)}$ a celkový tepelný komfort C_o , sú odvodené práve z lokálnych tepelných pocitov jednotlivých častí ľudského tela.

$$S_l^{(i)} = S_{static}^{(i)} + S_{dynamic}^{(i)} \quad (3.37)$$

Na pokrytie celého rozsahu zmeny teploty pokožky, vrátane extrémov, navrhli, aby lokálny tepelný pocit boli funkciou lokálnej teploty kože, prezentovanej ako rozdiel medzi miestnou teplotou kože a jej prahovou hodnotou [21].

$$S_{static}^{(i)} = 4 \left(\frac{2}{1 + e^{-C_1(t_{sk}^{(i)} - t_{sk,0}^{(i)}) - K_1[(t_{sk}^{(i)} - t_{sk,m}) + (t_{sk,0}^{(i)} - t_{sk,m,0})]}} - 1 \right) \quad (3.38)$$

kde $t_{sk}^{(i)}$ a $t_{sk,m}$ sú aktuálne hodnoty lokálnych a stredných teplôt pokožky. $t_{sk,0}^{(i)}$ je lokálna teplota pokožky v neutrálnom stave a je to hraničná hodnota vnímania chladu a tepla. $t_{sk,m,0}$ je stredná teplota pokožky neutrálneho stavu a C_1 a K_1 sú regresné koeficienty.

$$S_{dynamic}^{(i)} = \left(C_{21} \cdot \frac{d t_{sk}^{(i)}}{dt^{(-)}} + C_{22} \cdot \frac{d t_{sk}^{(i)}}{dt^{(+)}} + C_3 \frac{d t_{co}^{(i)}}{dt^{(+)}} \right) \cdot \frac{1}{3600} \quad (3.39)$$

Dynamický člen lokálneho tepelného pocitu závisí na časovej derivácii teploty pokožky a na časovej derivácii vnútornej teploty. C_{21} , C_{22} a C_3 sú regresné koeficienty [22].

Celkový tepelný pocit

Celkový pocit je modelovaný ako vážený priemer lokálneho pocitu a zaťaženia.

$$S_o = \frac{\sum \text{záťaž}_i \cdot S_l^{(i)}}{\sum \text{záťaž}_i} \quad (3.40)$$

Lokálny tepelný komfort

Je to dvojdielna lineárna funkcia lokálneho tepelného pocitu. Ako sa lokálny pocit pohybuje z neutrálneho na veľmi horúce (+4) a veľmi chladné (-4) lokálny komfort sa pohybuje na veľmi nepohodlné (-4). Lokálny pocit $C_l^{(i)}$, v ktorom je pocitovo maximálny komfort sa mení s celkovým pocitom tela, teda maximálny komfort je funkciou celkového pocitu [23].

V modely od Zhang rozlišujeme odlišné vnímanie lokálneho komfortu ak ide o chladné a teplé pocity, takže pre každú časť tela dostávame rozdielne regresívne koeficienty C_{71} , C_{72} , C_{31} , C_{32} na vnímanie chladu a tepla.

$$C_l^{(i)} = (F + D) \cdot |E|^{C_9} + A \quad (3.41)$$

A,B,C,D,E,F sú substitučné členy, a C_6 a C_9 sú regresné koeficienty. Toto zjednodušenie som čerpal z dizertačnej práce Pokorného [10].

$$\begin{aligned} A &= C_6 + C_{71} \cdot |S_0^-| + C_{72} \cdot |S_0^+| ; B = C_8 + C_{31} \cdot |S_0^-| + C_{32} \cdot |S_0^+| ; \\ C &= \frac{-4-A}{|-4+B|^{C_9}} ; D = \frac{-4-A}{|4+B|^{C_9}} \\ E &= S_l + B ; F = \frac{C - D}{e^{25 \cdot E} + 1} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Celkový tepelný komfort

Je určený lokálnym komfortom $C_l^{(i)}$ segmentu a vyjadruje mieru spokojnosti s tepelnými podmienkami prostredia. Tieto pravidlá ukazujú, že nepohodlie má vplyv na celkový komfort:

1. Celkový tepelný komfort sa rovná priemernej hodnote dvoch najmenších lokálnych komfortov, ak neplatí pravidlo 2.
2. Ak sú splnené tieto kritériá:
 - Druhý najnižší lokálny komfort je $> -2,5$
 - Subjekt má určitú kontrolu nad jeho/jej tepelným prostredím alebo sú tepelné podmienky prechodné

tak celkový komfort je priemerom dvoch najnižších lokálnych a jedného maximálneho lokálneho komfortu [21].

3.3 SÚHRN

Tab 3.3- Súhrnná tabuľka vstupov a výstupov jednotlivých modelov

Model	Vstupy	Model počíta	Výstupy
Gaggov model	2 uzlový -podmienky okolitého prostredia -parametre človeka	-teplota pokožky -teplota jadra	-TSENS index -DISC index
Fialov model	dynamický -štandardné parametre okolia -parametre človeka	-teplota hypotalamu -stredná teplota pokožky	-DTS index
Tanabeho model	-teplota vzduchu -stredná radiačná teplota -relatívna vlhkosť vzduchu -rýchlosť prúdenia vzduchu -tepelný odpor odevu -metabolická produkcia tepla -externá práca	-lokálna teplota pokožky -stredná teplota pokožky	-SET*
Kohri model	-štandardné parametre prostredia -parametre človeka	-teplota pokožky -miera pokrytia pokožky potom	-TSV index

UTCI model	-teplota vzduchu -stredná radiačná teplota -rýchlosť vzduchu -vlhkosť vzduchu -faktory oblečenia	-teplota okolitého prostredia pre referenčné hodnoty okolia	-UTCI index
PMV-PPD model	-metabolická produkcia tepla -mechanická práca -celkový merný tepelný tok -faktory oblečenia -teplota vzduchu -stredná radiačná teplota	-teplota oblečenia	-PMV-PPD index
Model komfortných zón	-lokálny tepelný tok -tepelné straty	-ekvivalentné teploty	-MTV index -diagram komfortných zón
Zhang model	-teplota pokožky -teplota jadra	-lokálne teploty pokožky -stredná teplota pokožky -teplota jadra	-lokálny a celkový tepelný pocit -lokálny a celkový tepelný komfort

Jednotlivé podmienky použiteľnosti sú vysvetlené v predchádzajúcich podkapitolách.

ZÁVER

V tejto práci som sa najskôr zamerlal na priblíženie fungovania termoregulačného systému ľudského tela. V minulosti bolo vyvinutých už niekoľko matematických modelov ľudskej termoregulácie, rozdelených na aktívny a pasívny systém, na ktorého báze funguje i ľudské telo.

V ďalšej kapitole sme si zafinovali tepelný pocit, a tepelný komfort, o ktorých predikciu sa pokúšame pomocou jednotlivých tepelných modelov. Boli rozvinuté primárne faktory, ktorý majú najväčší dopad na vnímanie tepelného komfortu a vysvetlených i niekoľko sekundárnych faktorov ako vek, pohlavie či individuálna variabilita rôzneho znášania záťaže.

Vplyv tepelného prostredia na človeka možno predpovedať indexmi a modelmi predpovedajúcimi tepelný pocit a komfort. Bližšie boli rozobraté fyziologické modely: Gaggov 2 uzlový model, ktorý počíta index tepelného pocitu TSENS a tepelného nepohodlia DISC, Fialov Dynamický model, ktorého výstupom je index dynamického tepelného pocitu DTS. Ďalším rozobraným modelom bol model podľa Tanabe, ktorý slúži na predikciu vnútorných teplôt tepelných tokov a vlhkosti pokožky. Koeficienty pre výpočet modelu podľa Tanabe sa dajú dohľadať v jeho práci. Kohriho model je fyziologickým modelom, ktorý používa index TSV, ktorý bol vytvorený na zlepšenie tepelného prostredia vo vozidle. Posledným fyziologickým modelom spojeným s predikciou tepelného stavu je UTCI-Fialov individualizovaný model, ktorého UTCI index zahŕňa všetky klimatické podmienky.

V nasledujúcej podkapitole som sa venoval tepelným modelom, ktoré predpovedajú tepelný pocit a komfort. Prvým z nich bol PMV-PPD model vytvorený Fangerom, ktorý je najpoužívanejším modelom na predikciu tepelného komfortu a používa index PMV, ktorý indikuje spokojnosť ľudí s tepelným prostredím a je vyjadreným indexom PPD, ktorý predpokladá percento nespokojných ľudí. Ďalším spomenutým je Model komfortných zón, kedy autor určil závislosť indexu MTV na ekvivalentnej teplote. Hranice komfortných zón sú stanovené podľa hodnoty indexu MTV a vyjadrené ekvivalentnou teplotou. Posledným mapovaným modelom bol Model podľa Zhang, ktorý bol vytvorený regresnou analýzou a slúži na predikciu celkového a lokálneho tepelného pocitu a komfortu, ktoré boli zafinované v tejto podkapitole. Regresné koeficienty potrebné pre výpočet sa dajú dohľadať v literatúre autora. V závere práce som vypracoval súhrnnú tabuľku vybraných modelov, z ktorej je vidieť, že vybrané parametre majú rôzne vstupy a výstupy.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] HENSEL, H.; SCHAFER, K. Thermoreception and temperature regulation in man. In: Recent advances in medical thermology. Springer, Boston, MA, 1984. p. 51-64. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4684-7697-2_8
- [2] HEMMINGSEN A. M. Energy metabolism as related to body size and respiratory surfaces, and its evolution. Rep. Steno. Mem. Hosp. Nord. Insulin Lab. 9, pp.1-110,1960.
- [3] GAGGE, A.P.; STOLWIJK, J. A. J.; HARDY, J. D. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. Environmental research, 1967, 1.1: 1-20. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(67\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0013-9351(67)90002-3)
- [4] FU, Ming, et al. Review on modeling heat transfer and thermoregulatory responses in human body. *Journal of thermal biology*, [online],2016, 62: 189-200. Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.06.018>
- [5] HAVENITH, G; FIALA, D. Thermal Indices and Thermophysiological Modeling for Heat Stress. *Comprehensive Physiology* [online]. 2016, 6(1), 255–302. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cphy.c140051>
- [6] KATIC, K.; LI, R.; ZEILER, W. Thermophysiological models and their applications: A review. *Building and Environment*, [online] 2016, 106: 286-300. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Katarina_Katic/publication/304576719_Thermophysiological_models_and_their_applications_A_review/links/5893054daca272f9a55914ac/Thermophysiological-models-and-their-applications-A-review.pdf
- [7] FIALA, Dusan. *Dynamic simulation of human heat transfer and thermal comfort*. 1998. PhD Thesis. De Montfort University. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Dusan_Fiala2/publication/35402573_Dynamic_Simulation_of_Human_Heat_Transfer_and_Thermal_Comfort/links/5633311308ae911fcd4a25fc/Dynamic-Simulation-of-Human-Heat-Transfer-and-Thermal-Comfort.pdf
- [8] 2001 ASHRAE Handbook: Fundamentals. SI Edition. Atlanta: ASHRAE, 2001. ISBN 18-834-1388-5.
- [9] FANGER, P. O. The variability of man's preferred ambient temperature from day to day. *Archives des sciences physiologiques*, 1973, 27(4): 403-407.
- [10] POKORNÝ, Jan. Svázání fyziologického modelu s modelem tepelného komfortu [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/6317>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Miroslav Jícha.
- [11] STOLWIJK, J. A. J., a kol. A mathematical model of physiological temperature regulation in man. [online]. 1971, (Nasa CR-1855), 82. ISSN 0031-6768. Dostupné z : <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19710023925.pdf>

- [12] GAGGE, A. Pharo; FOBELETS, A. P.; BERGLUND, LoG. A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans.:(United States)*, 1986, 92.CONF-8606125-.
- [13] FANGER, Poul O., et al. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.*, 1970.
- [14] FIALA, D; LOMAS, K. J.; STOHRER, M. First principles modeling of thermal sensation responses in steady-state and transient conditions. *ASHRAE transactions*, 2003, 109: 179.
- [15] FIALA, D; LOMAS, K. J.; STOHRER, M. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *Journal of applied physiology* [online].1999, 87.5: 1957-1972. Dostupné z: <https://www.physiology.org/doi/full/10.1152/jappl.1999.87.5.1957>
- [16] FIALA, D; LOMAS, K J.; STOHRER, M. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology* [online]. 2001, 45.3: 143-159. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s004840100099>
- [17] TANABE, S, a kol. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings* [online]. 2002, 34.6: 637-646. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778802000142?via%3Dihub>
- [18] KOELBLEN, B., A. PSIKUTA, A. BOGDAN, S. ANNAHEIM a R. M. ROSSI. Thermal sensation models: a systematic comparison. *Indoor Air* [online]. 2017, 27(3), 680-689. DOI: 10.1111/ina.12329. ISSN 09056947. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12329>
- [19] ČSN ISO 7730. *Mírné tepelné prostředí – Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody.*, Český normalizační institut. 1997.
- [20] NILSSON, Håkan O. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models [online]. 2004. Dostupné z: <https://gupea.ub.gu.se/handle/2077/4340>
- [21] ZHANG, Hui. Human thermal sensation and comfort in transient and non-uniform thermal environments [online]. 2003. Dostupné z: <https://escholarship.org/uc/item/11m0n1wt>
- [22] ZHANG, Hui, et al. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts. *Building and Environment* [online]. 2010, 45.2: 380-388. Dostupné z: <https://cloudfront.escholarship.org/dist/prd/content/qt3sw061xh/qt3sw061xh.pdf>

- [23] ZHANG, Hui, et al. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort. *Building and Environment* [online]. 2010, 45.2: 399-410. Dostupné z: <https://escholarship.org/uc/item/2tm289vb>
- [24] KOHRI, I; MOCHIDA, T. Evaluation Method of Thermal Comfort in a Vehicle with a Dispersed Two-Node Model Part 1—Development of Dispersed Two-Node Model. *Journal of the Human-Environment System* [online]. 2002, 6.1: 19-29. Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jhes/6/1/6_1_19/pdf
- [25] KOHRI, I. a MOCHIDA, T. Evaluation Method of Thermal Comfort in a Vehicle with a Dispersed Two-Node Model Part 2—Development of New Evaluation. *Journal of the Human-Environment System* [online]. 2002 6 (2), 77-91. Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jhes/6/2/6_2_77/pdf
- [26] GAGGE, A., a kol. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response *ASHRAE Transaction*. 1971, 77 (1), 247-262. Dostupné z: https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/37901/1/13Suppl_21-36.pdf
- [27] STREBLOW, R., a kol. A coupled simulation of the thermal environment and thermal comfort with an adapted Tanabe comfort model. In: *7th International Thermal Manikin Modelling Meeting, Portugal* [online]. 2008. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Rita_Streblow2/publication/266571867_A_COUPLED_SIMULATION_OF_THE_THERMAL_ENVIRONMENT_AND_THERMAL_COMFORT_WITH_AN_ADAPTED_TANABE_COMFORT_MODEL/links/54e286880cf2c3e7d2d3ac65/A-COUPLED-SIMULATION-OF-THE-THERMAL-ENVIRONMENT-AND-THERMAL-COMFORT-WITH-AN-ADAPTED-TANABE-COMFORT-MODEL.pdf
- [28] SCHELLEN, L., a kol. The use of a thermophysiological model in the built environment to predict thermal sensation: coupling with the indoor environment and thermal sensation. *Building and Environment* [online]. 2013, 59: 10-22. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.010>
- [29] CHEN, Y.; MATZARAKIS, A. Modified physiologically equivalent temperature—basics and applications for western European climate. *Theoretical and Applied Climatology* [online]. 2018, 132.3-4: 1275-1289. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2158-x>
- [30] YAO, R.; LI, B.; LIU, J. A theoretical adaptive model of thermal comfort—Adaptive Predicted Mean Vote (aPMV). *Building and environment* [online]. 2009, 44.10: 2089-2096. Dostupné z: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/45513561/A_theoretical_adaptive_model_of_thermal_20160510-11107-1o8kk43.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1527156207&Signature=4zNxxabEKp9b7eBaRWvpfpyT618%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DA_theoretical_adaptive_model_of_thermal.pdf

- [31] TAKADA, S.; MATSUMOTO, S.; MATSUSHITA, T. Prediction of whole-body thermal sensation in the non-steady state based on skin temperature. *Building and Environment* [online]. 2013, 68: 123-133. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.06.004>
- [32] ZHOU, Xin, et al. Predict thermal sensation of Chinese people using a thermophysiological and comfort model [online]. 2014. Dostupné z: <https://cloudfront.escholarship.org/dist/prd/content/qt7v26r8jp/qt7v26r8jp.pdf>
- [33] KIM, Jeong Tai, et al. Development of the adaptive PMV model for improving prediction performances. *Energy and Buildings* [online]. 2015, 98: 100-105. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.051>