

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

STUDIE VLIVU RADIČNÍHO VYTÁPĚNÍ A CHLAZENÍ NA TEPELNOU POHODU ŘIDIČE OSOBNÍHO AUTOMOBILU

INVESTIGATION OF IMPACT OF RADIANT HEATING AND COOLING ON CAR DRIVER THERMAL
COMFORT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Pavlík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Bc.Ing. Jan Fišer, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Vojtěch Pavlík**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Technika prostředí
Vedoucí práce: **Bc.Ing. Jan Fišer, Ph.D.**
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 diplomové práce:

Studie vlivu radiačního vytápění a chlazení na tepelnou pohodu řidiče osobního automobilu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ze současných výzkumů je patrné, že radiační vytápění/chlazení může zlepšit tepelný komfort i při nižších/vyšších nastavených teplotách v kabině, což přináší energetickou úsporu při vytápění/chlazení kabiny a tím i výhoda pro EV vozidla. Nicméně otázkou zůstává optimální umístění a tepelné toky, které je možné využít, jak z pohledu tepelného komfortu, tak z pohledu energetické efektivity této technologie.

Cíle diplomové práce:

Pomocí virtuálního manekýna a CFD simulace proveďte studii vlivu radiačního vytápění/chlazení na tepelnou pohodu řidiče v kabině vozu v zimním/letním období pro klimatické podmínky ČR. Tepelná pohoda bude vyhodnocována metodikou diagramu komfortních zón dle Nilssona.

Seznam doporučené literatury:

Vehicle thermal management: heat exchangers & climate control. Editor Gursaran D. MATHUR. Warrendale: Society of Automotive Engineers, c2004. PT (SAE). ISBN 0-7680-1445-X.

NILSSON, H. O. a I. HOLMER. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models. Indoor Air [online]. 2003, 13(1), 28-37 [cit. 2017-10-24]. DOI: 10.1034/j.1600-0668.2003.01113.x. ISSN 0905-6947. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1034/j.1600-0668.2003.01113.x>

ČSN EN ISO 14505-2. Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného komfortu ve vozidlech. Český normalizační institut (2007).

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

V Brně, dne 9. 10. 2017



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

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

ABSTRAKT

Tato diplomové práce se zabývá radiačním vytápěcím systémem pro zajištění tepelného komfortu posádky osobního automobilu a určením vhodných provozních parametrů takového systému. V rešeršní části jsou shrnuty vlivy významné pro tepelný komfort člověka, metody stanovení tepelného komfortu, způsoby přenosu tepla mezi lidským tělem a okolím a technické možnosti vytápění interiéru vozu. Ústředním bodem práce je poté simulace interiéru automobilu vytápěného pomocí radiačních panelů a vyhodnocení tepelného stavu virtuálním manekýnem. Tepelný stav byl vyhodnocen metodou ekvivalentní teploty v kombinaci s diagramem komfortní zóny (metoda dle O. H. Nilssona). Celkem bylo nasimulováno 42 scénářů, ze kterých vyplývá, že při dodržení maximální teploty 43 °C nemůže být dosaženo tepelného komfortu čistě jen radiačním vytápěním, ale je nezbytná kombinace s dalšími způsoby distribuce tepla. Radiační vytápění nicméně přispívá k úspoře energie nezbytné pro dosažení tepelného komfortu v kabině posuzovaného vozu.

Klíčová slova

Radiace, panely, vytápění, HVAC, automobil, úspory, komfort, pohoda

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on the matter of radiation heating, thermal comfort maintenance and setting optimal operation parameters for heating system equipped with radiation panels. The research section summarizes the effects most important for thermal comfort, methods of its determination, heat exchange distribution between the human body and its environment, and technical possibilities of heating car interiors. The central points of this work are the simulation of car interiors heated with radiation panels and the evaluation of thermal comfort with a virtual mannequin. Thermal state was determined via the equivalent temperature and thermal comfort zones diagram (method by O.H. Nilsson). Forty-two simulated scenarios led us to conclude that thermal comfort is not possible to obtain with panels exuding a maximum temperature of 43 °C and the combination of several heat sources is required. Nevertheless radiation heating considerably contributes to energy savings without the loss of thermal comfort in assessed car.

Key words

Radiation, panels, heating, HVAC, car, savings, thermal comfort, energy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAVLÍK, V. *Studie vlivu radičního vytápění a chlazení na tepelnou pohodu řidiče osobního automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 91 s.
Vedoucí diplomové práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Studie vlivu radiačního vytápění a chlazení na tepelnou pohodu řidiče osobního automobilu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

24.05.2018

.....

Bc. Vojtěch Pavlík

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat Ing. Bc. Janu Fišerovi, Ph.D. za cennou pomoc, připomínky a ochotu při vypracování této diplomové práce, Ing. Janu Pokornému, Ph.D. za pomoc při vytváření modelu, celé své rodinně za podporu během mého studia a v neposlední řadě také Marcelovi Sapíkovi.

OBSAH

1. ÚVOD	8
2. Cíle a limity práce	9
3. Metabolismus lidského těla a tepelná pohoda.....	10
3.1. Lidský metabolismus	10
3.2. Přenos tepla z lidského těla radiací.....	12
3.3. Hodnocení tepelného komfortu	13
4. Prostředí v kabinách a systémy na jeho úpravu	16
4.1. Systém HVAC	16
4.2. Reverzibilní čerpadlo	17
4.3. Peltierovy články	18
4.4. Radiační panely.....	19
5. Metody a modely.....	20
5.1. Simulace CFD.....	20
5.2. Virtuální manekýn.....	21
6. Tvorba modelu a simulačního scénáře	22
6.1. Příprava geometrie modelu	22
6.2. Definování okrajových podmínek a fyzikálních modelů.....	24
6.3. Definice řezů, bodů, reportů a monitorů.....	30
6.4. . Kalibrace tepelného manekýna	31
7. Simulační scénáře.....	35
7.1. Tvorba a vyhodnocení základních scénářů chování sálavých panelů.....	35
7.2. Vyhodnocení vlivu úprav na vybrané scénáře	38
8. Výsledky a diskuze.....	41
9. Závěr.....	43
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	47
Seznam obrázků.....	49
Seznam tabulek.....	50
Seznam příloh.....	51

1. ÚVOD

Na automobily se spalovacími motory jsou kladeny čím dál tím přísnější emisní požadavky a automobilky byly nuceny tento problém řešit zaváděním automobilů s nízko emisními pohony mezi které patří i pohon elektrickou energií. Základní limitující vlastností elektromobilů je kromě ceny také relativně nízký dojezd na jedno nabití, a tak je pochopitelná snaha snížit spotřebu všech systémů, které nesouvisí s jízdou, na minimum. Tím nejnáročnějším na energii je právě systém pro vytápění, větrání a klimatizaci (dále jen „HVAC“ z anglického Heating, Ventilation and Air Conditioning), který spotřebuje až 46 % energie pro podpůrné systémy [10]. Reálné zkušenosti z provozu Nissanu Leaf v našich podmínkách tato čísla potvrzují. Zatímco při normální jízdě bez topení či klimatizace činila spotřeba 18,5 kWh/100 km, při stejném stylu jízdy se zapnutým topením a teplotě mezi -15 °C a -20 °C se zvýšila na 31,2 kWh, což je asi 69% nárůst [18]. Pro současné elektromobily je zejména problematické ohřívání přiváděného vzduchu. U automobilů se spalovacím motorem k tomu můžeme využít odpadní teplo, ale u elektromobilů vzniká díky vysokým účinnostem komponent pouze minimum ztrátového tepla a to ještě v místech, kde jej nelze využít pro vytápění kabiny.

Proto se nyní zkoumají možnosti využití i jiných mechanismů přenosu tepla. Například ve stavební praxi se čím dál častěji využívá vytápění pomocí radiačních panelů a pro jejich jednoduchou konstrukci a možnosti vyrobit panel jakéhokoliv tvaru jsou ideální i pro použití v automobilech. Tato možnost je perspektivní zvláště proto, že je možné díky ní dosáhnout tepelného komfortu nezávisle na teplotě okolního vzduchu. Nadále však zůstává otázkou rozmístění radiačních panelů, jejich výkony a způsob regulace s cílem zabezpečit optimální tepelný komfort, bezpečnost provozu a minimální energetickou spotřebu. Reálný experiment, který by nám poskytl odpovědi na tyto otázky, by byl velmi časově a finančně náročný a k jeho provedení bychom potřebovali celou řadu sofistikovaných zařízení a zkušebních osob. Další možností je místo reálného experimentu využít experiment výpočetní jinak řečeno simulaci.

Výpočetní metoda CFD umožňuje řešit problémy proudění a přenosu tepla v podobě simulačního experimentu. Dokáže nám dát odpověď na otázku, zda se má vůbec cenu tímto směrem ubírat a jaké jsou možné předpokládané úspory. Navíc tuto metodu můžeme použít k parametrizaci takovéto studie a vytvořit si představu o chování tohoto systému vytápění při různých okolních podmínkách či provozních parametrech testovaného systému.

Tato práce se zabývá popisem alternativní možnosti pro zajištění tepelného komfortu v automobilech, následně se blíže zaměřuje na využití radiačních panelů, a nakonec se zabývá postupy pro CFD simulace s tepelným manekýnem. Součástí práce je i zhodnocení výsledků a definování doporučení pro zkoumaný typ vytápění.

2. Cíle a limity práce

Cíle práce:

- Vytvoření modelu interiéru automobilu s virtuálním manekýnem
- Sestavení diagramů komfortních zón pro daný oděv
- Predikce tepelného stavu prostředí v kabině s radiačním vytápěním
- Vyčíslení úspory při použití radiačního vytápění v porovnání s klasickým teplovzdušným vytápěním

Limity práce:

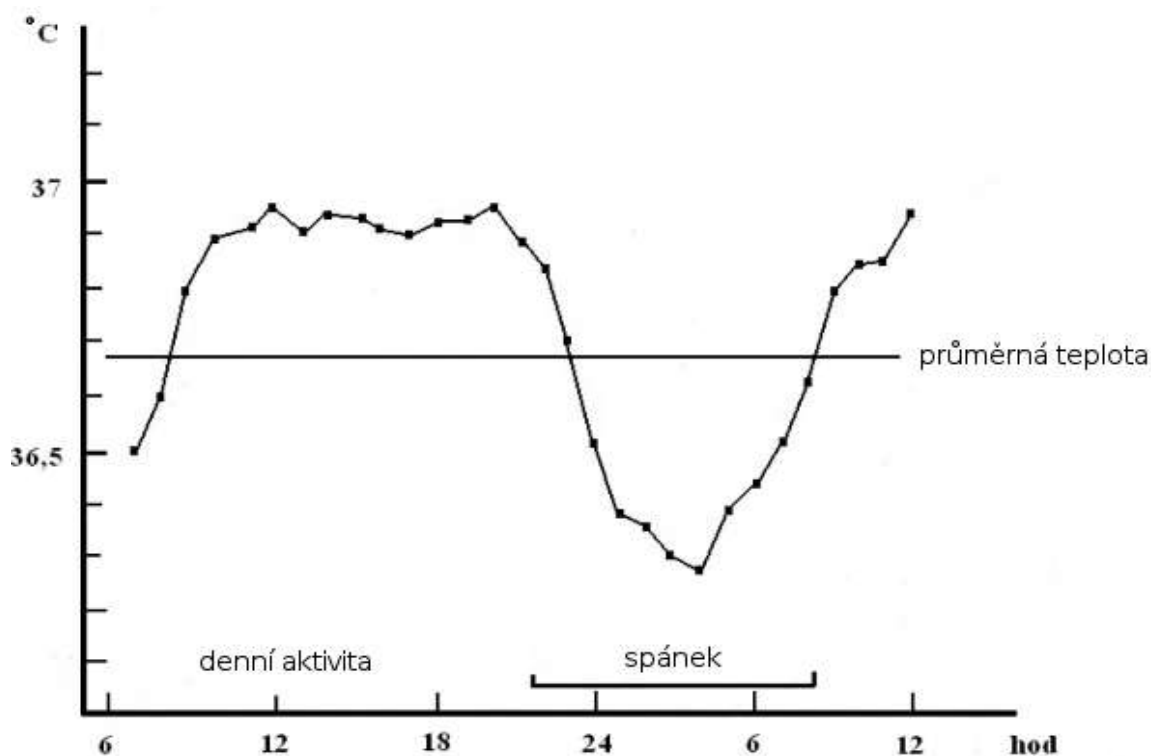
- Výsledky jsou získané pouze výpočtem CFD a nejsou experimentálně potvrzeny
- Práce se zaměřuje pouze na případ, kdy je použito konvenční teplovzdušné vytápění a radiační panely
- Práce nezkoumá případy radiačního chlazení neboť to je v praxi jen obtížně použitelné z důvodu obtížnosti kontroly kondenzace vodních par na chlazených plochách
- Výsledky platí pouze pro návrhové provozní podmínky a pouze ustálený stav (nezabývá se, za jak dlouho by bylo tepelného komfortu dosaženo)
- Práce pouze využívá výpočetní metody jako nástroje pro zjištění poznatků, nezabývá se jejich podrobnějším popisem

3. Metabolismus lidského těla a tepelná pohoda

Pro pohodlné a bezpečné cestování automobilem je potřeba zajistit tepelný komfort posádky. Abychom byly schopni zajistit tepelný komfort, musíme nejdřív pochopit, jak teplo v lidském těle vzniká a jakým způsobem přenáší z/do svého okolí

3.1. Lidský metabolismus

U zdravého člověka se snaží nervový systém udržet vnitřní teplotu na úrovni $36,5 \pm 0,5$ °C a k termoregulaci dochází bez našeho vědomí. Při této teplotě může docházet k chemickým procesům, které jsou zapotřebí k našemu životu a při překročení hranice jednoho stupně Celsia od této teploty dojde k významnému narušení průběhu těchto reakcí, a i k nezvratnému poškození lidského organismu. Během dne není teplota lidského těla konstantní, odvíjí se zejména zda člověk provozuje nějakou aktivitu fyzickou či mentální nebo spí a tomu odpovídají i procesy, které v našem organismu probíhají a které potřebují vždy o trochu jinou teplotu. Tento průběh je znázorněn na grafu Graf 1 [8].



Graf 1: Průběh hodnot tělesné teploty během 24 hod [8]

Pro snížení tělesné teploty lidské tělo využívá vasodilatace (rozšíření) cév. To umožňuje větší průtok krve do okrajových částí lidského těla (ruce a nohy). Zvětšením průtoku krve v kůži se zvýší povrchová tělesná teplota a také tepelný tok odcházející do okolí. Pokud má ovšem okolí vyšší teplotu, než je povrchová tělesná teplota, zůstává jedinou možností pro snížení

teploty pocení. Pocení je velmi účinný mechanismus, kdy se na pokožce vylučují kapičky vody obsahující ionty minerálních látek např. Na^+ , K^+ , Cl^- a kyseliny mléčné nebo močové. Pot se v takovém prostředí začne odpařovat a pro odpaření si bere teplo z pokožky. V případech extrémního horka může člověk vyprodukovat až 1 litr potu za hodinu [15]. Naopak pro zvýšení tělesné teploty tělo může využít vasokonstrikace (zúžení) cév, které naopak průtok do krajních částí těla omezí a lidské tělo se tím snaží zajistit co nejmenší ztráty do okolí a udržení si tepla v tělesném jádře. Dále také svalovým třesem, který je podvědomou reakcí na chlad. Práce svalů produkuje teplo. Limitními teplotami pro lidské tělo jsou 24 a 41 °C [16]. Když lidské tělo dosáhne nebo klesne pod tyto hodnoty dochází ke ztrátám vědomí a následně ke smrti. I když by byl v této fázi člověk zachráněn, lidský mozek již bude nenávratně poškozen. [17]

Z pro nás důležitého pohledu produkce tepla, rozlišujeme teplo bazálního metabolismu, což je minimum, které vzniká při práci vnitřních orgánů a lidská činnost na něj nemá vliv a na svalový metabolismus, který produkuje teplo činností svalů a zvýšenou činností vnitřních orgánů. Pro zajištění tepelné rovnováhy a udržení konstantní teploty uvnitř těla je daná podmínka, že teplo Q vyprodukované lidským tělem se musí rovnat Q odvedenému, které se skládá z tepelných toků odvedeného vedením Q_{ved} , konvekcí Q_k , radiací Q_r , vypařováním (pocením) Q_v a dýcháním Q_d , to platí v případě, že nedochází k akumulaci (to bývá příznakem nemoci). Dle [9] můžeme tepelnou rovnováhu vyjádřit rovnicí 1 pomocí zmíněných tepelných toků.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{ved} + \dot{Q}_k + \dot{Q}_r + \dot{Q}_v + \dot{Q}_d [W] \quad (\text{rov. 1})$$

Dle [9] lze v některých případech zanedbat tepelný tok vedením například, kdy člověk sedí v neodvětrávané a nevytápěné sedačce. V takové situaci je nutné odvádět teplo z těla konvekcí, radiací, vypařováním a dýcháním. Rovnice 1 se poté upraví do podoby rovnice 2.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_k + \dot{Q}_r + \dot{Q}_v + \dot{Q}_d [W] \quad (\text{rov. 2})$$

Abychom dosáhli tepelného komfortu, je bezpodmínečně nutné splnit podmínku tepelné rovnováhy. Další podmínkou je, aby nervový systém nemusel zasahovat ve velké míře do tělesné termoregulace. Kdyby docházelo k nadměrnému pocení anebo ke snížení prokrvení končetin, tak by se v žádném případě nedalo mluvit o tepelném komfortu. Dá se tedy říct, že stav tepelné rovnováhy musí být dosažen při minimálních zásazích tělesné regulace [9]. Veličiny, které mají vliv na tepelnou pohodu, se tedy dají rozdělit do dvou kategorií subjektivní (týkající se konkrétního jedince) a prostředí. Subjektivní veličiny jsou například tělesná činnost, stupeň pokrytí těla oděvem a veličiny prostředí jsou například rychlost proudění vzduchu, teplota okolního vzduchu, střední radiační teplota okolních povrchů a relativní vlhkost.

3.2. Přenos tepla z lidského těla radiací

Každé těleso, které má teplotu vyšší než absolutní nula (0 Kelvinů), vyzařuje část své energie ve formě elektromagnetických vln. Pohlcením části této energie při dopadu dojde k přeměně na vnitřní energii a tento proces probíhá neustále i když mají tělesa, které se účastní výměny stejnou teplotu. Fyzikální podstata radiace je stejná jako pro viditelné světlo, jediný rozdíl je jejich vlnová délka. Při přenosu vzduchem je část záření pohlcena složkami atmosféry např. vodní parou, k maximálnímu přenosu beze ztrát dochází pouze ve vakuu.

Materiály mají čtyři vlastnosti z pohledu přenosu tepla radiací a tou jsou:

- propustnost záření, transmisivita t
- absorpce záření, absorptivita a
- odražení záření, reflexivita r
- vyzáření záření, emisivita ε

Existují dva základní zákony při přenosu tepla zářením, které se nazývají Kirchhoffovy. První říká, že součet transmisivity, absorptivity a reflexivity je roven jedné a druhý, že emisivita a absorptivita jsou si rovny.

Pro zjištění množství vyzářené energie za jednotku času slouží rovnice 3, Stefan-Boltzmanův zákon, index 1 označuje těleso a index 2 prostor.

$$Q_{r1-2} = F_{1-2} \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot S_1 \cdot (T_1 + 273,15)^4 \quad (\text{rov. 3})$$

Kde:

F_{1-2}	úhlový faktor mezi tělesem 1 a 2	[-]
ε_1	emisivita tělesa 1	[-]
σ	Stefan-Boltzmanova konstanta $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8}$	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
S_1	plocha tělesa 1	[m ²]
T_1	teplota povrchu tělesa 1	[°C]

Úhlový faktor ve Stefan-Boltzmanově zákoně vyjadřuje podíl energie, která opustila těleso 1 a zachytilo ji těleso 2. Laicky řečeno se dá říct, že je to úhel, kterým na sebe obě tělesa „vidí“. Přesněji vyjadřuje vzájemné geometrické uspořádání dvou povrchů v prostoru.

Tělesa obecně vyzařují v celém spektru vlnových délek, ale podstatná část probíhá v úzkém intervalu a mají tedy spojitě spektrum. Existují však výjimky látky, které vyzařují jen určité vlnové délky a mají selektivní záření. Spojitým zářením se zabíral Planck, který zjistil, že tělesa uvolňují energii v takzvaných kvantech a že množství energie je přímo úměrné kmitočtu, a tak pro různé vlnové délky mají tělesa různé hodnoty emisivity, transmisivity a

absorptivity. Wienův zákon, rovnice 4, definuje v Planckově zákoně polohu maxima závislosti intenzity záření.

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T} \quad (\text{rov. 4})$$

Kde:

λ_{max} vlnová délka záření s největší intenzitou [m]

T termodynamická teplota černého tělesa [K]

Povrch lidského těla pokrývá pokožka, která je specifická svojí vysokou absorptivitou krátkých vln a emisivitu dlouhých vln. Z hlediska tepelného vnímání je podstatné rozdělení spektra na dlouhé a krátké vlny. Za dlouhovlnné záření je nejčastěji označováno s vlnovou délkou větší než 4 μm neboli infračervené. Krátkovlnné naopak s délkou kratší, to bývá typicky sluneční záření.

3.3. Hodnocení tepelného komfortu

Tepelný komfort můžeme popsat dle [14] jako dosažení takových tepelných poměrů, kdy se člověk cítí příjemně, není mu ani chladno, ani příliš teplo. S jedním z prvních modelů pro hodnocení komfortu ve vnitřním prostředí již před druhou světovou válkou přišel Bedford, a i v současných modelech je používána jeho stupnice: -3 nepohodlně příliš chladno, -2 nepohodlně chladno, -1 pohodlně chladno, +1 pohodlně teplo, +2 nepohodlně teplo, +3 nepohodlně příliš teplo [12]. Drtivá většina modelů byla však vyvinuta pro hodnocení komfortu v budovách a velkých místnostech, kde lze předpokládat homogenní teplotní pole, nízké rychlosti vzduchu a bez vlivu solárního záření. Metoda diagramu komfortních zón dle H.O. Nilssona byla však vyvinuta právě pro problematiku tepelného komfortu v kabinách dopravních prostředků, které mají mnohem menší objem než místnosti v budovách, a tak počítá s nehomogenitou teplot, většími rychlosti proudění a vlivem solárního záření. H.O. Nilsson tuto metodu publikoval v roce 2004 a díky svému častému a relativně jednoduchému použití byla v roce 2006 přijata jako standart normou ISO 14505 (v ČR následně přežata jako ISO ČSN EN 14505 – Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech).

Princip této metody je založen na určení ekvivalentní teploty na jednotlivých částech lidského těla a vyhodnocením těchto teplot v diagramu na obrázku 1. Ekvivalentní teplota je definována jako: „*Teplota imaginárního uzavřeného prostoru, kde je střední radiační teplota rovná teplotě vzduchu a vzduch je klidný, a v kterém má lidské tělo stejnou tepelnou výměnu radiací a konvekcí jako v aktuálním prostředí.*“ [13]. Definice je velmi podobná definici operativní teploty. Ta představuje jednotnou teplotu černého uzavřeného prostoru (z pohledu přenosu tepla konvekcí a radiací), ve kterém by docházelo k přenosu tepla konvekcí a radiací ve stejné míře jako teplotně nesourodém prostoru [9]. Ekvivalentní teplotu lze dle Nilssona určit pomocí rovnic 5 a 6 a 7 a operativní teplota v rovnici 8.

$$T_s = 36,4 - (0,05 \cdot q) [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{rov. 5})$$

$$T_{eq} = T_s - R_{cl} \cdot q [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{rov. 6})$$

Kde:

T_s	teplota povrchu figuríny	[$^{\circ}\text{C}$]
T_{eq}	ekvivalentní teplota	[$^{\circ}\text{C}$]
R_{cl}	tepelný odpor oblečení	[$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
q	měrný tepelný tok	[W/m^2]

Při použití Nilssonova modelu pro CFD můžeme dle [9] použít jednodušší způsob získání ekvivalentní teploty, a to pomocí rovnice 7.

$$T_{eq} = T_s - \frac{q}{h_{virtual}} \quad (\text{rov.7})$$

Kde:

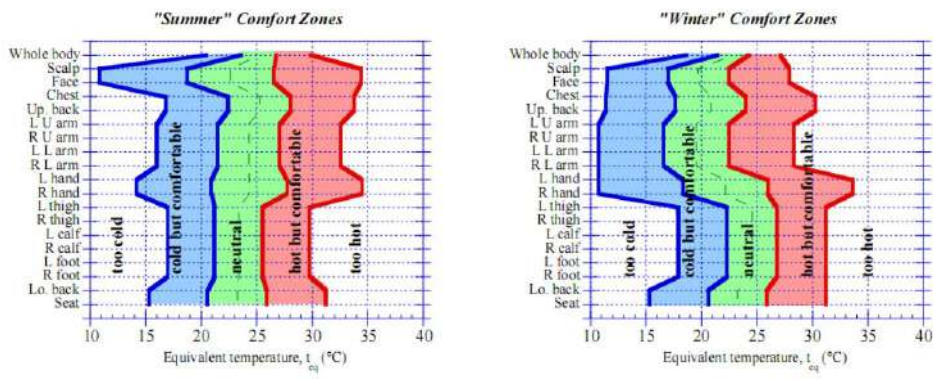
$h_{virtual}$	součinitel přenosu tepla získaný z virtuální kalibrace (kapitola 6.4) v homogenních podmínkách dle definice ekvivalentní teploty	[$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
---------------	--	-----------------------------------

Abychom si definovali jednotlivé zóny komfortu, jak je vidíme v diagramu, použili jsme k tomu rovnici 8, kde změnou lineárních konstant určíme, o jakou zónu půjde.

$$t_{eq} = t_s - R_T \cdot (a + b \cdot MTV_{zone}) \quad (\text{rov.8})$$

Kde:

T_s	teplota povrchu figuríny	[$^{\circ}\text{C}$]
T_{eq}	ekvivalentní teplota	[$^{\circ}\text{C}$]
R_T	celkový tepelný odpor	[$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
a, b	lineární konstanty	[W/m^2]
MTV_{zone}	tolerance tepelného komfortu	[-]



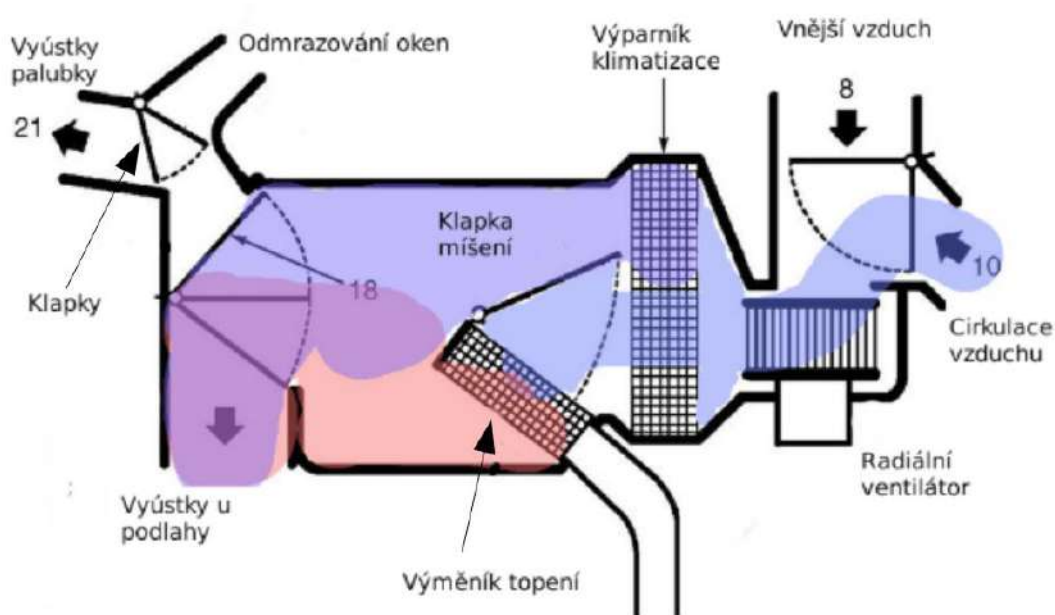
Obrázek 1: Diagramy komfortních zón dle Nilssona [7]

4. Prostředí v kabinách a systémy na jeho úpravu

4.1. Systém HVAC

S pojmem HVAC se lze setkat v souvislosti jak s budovami, tak i s dopravními prostředky. První systémy pro kontrolu vnitřního prostředí v automobilech se začaly objevovat již v 30. letech minulého století. Byly však velmi drahé a dodávány na zakázku specializovanými firmami. K největšímu rozvoji došlo v 50. letech v Americe, kdy se začaly objevovat jako volitelná výbava a v pozdějších letech už i jako standardní.

V současné době vývoj pokročil do takové míry, že kromě rozmrazování oken tento systém dokáže upravovat do značné míry i prostředí různě pro jednotlivé členy posádky (zóny). Topení a chlazení je od počátku až po dnešek řešeno ve své podstatě stejně. Nasávaný vzduch je ohřát nebo ochlazen výměníky a přes klapky dodáván do kabiny skrze vyústky, tak jak je to zobrazeno na obrázku 2.



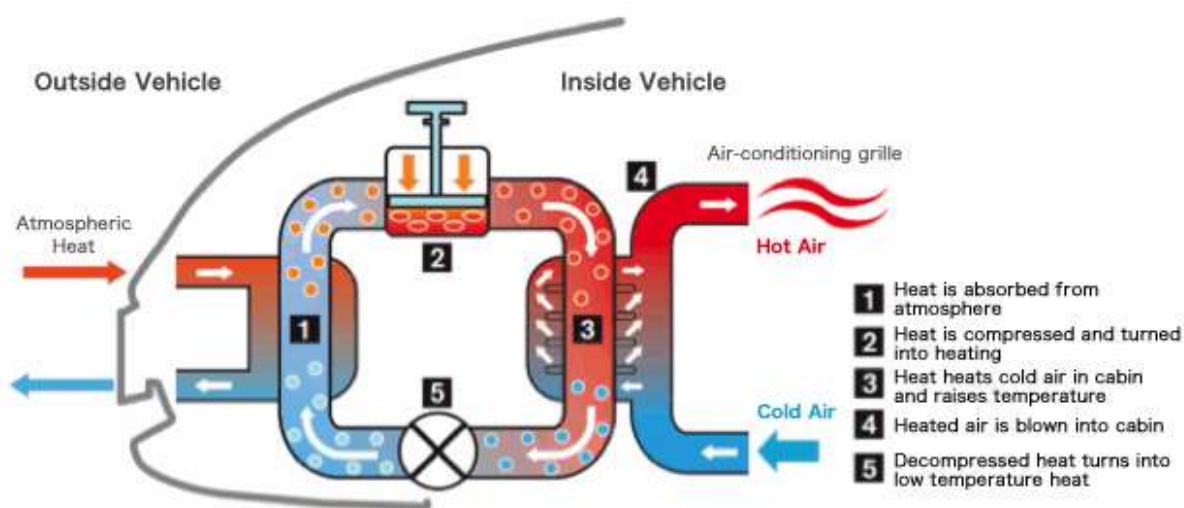
Obrázek 2: Schéma vedení vzduchu systémem HVAC [1]

Tato koncepce měla u spalovacích motorů výhodu, že byla jednoduchá a pro ohřev využívala odpadní teplo motoru. U elektricky poháněných vozidel je však odpadního tepla málo kvůli vysoké účinnosti elektromotorů, která dle katalogů firem ABB nebo Siemens dosahuje v některých případech až 95 %.

4.2. Reverzibilní čerpadlo

V roce 2014 automobilka Nissan uvedla na trh elektrický model Leaf s reverzibilním tepelným čerpadlem. V roce 2015 představila tento systém také společnost BOSCH, která jej dodává do automobilu VW e-Golf pro americký trh nebo Renault ZOE.

Na obrázku 3 je schematicky zobrazen princip práce při ohřevu vzduchu v interiéru. Při režimu klimatizace se celý proces obrátí, chladivo odebere teplo z interiéru a ochladí se ve vnějším prostředí. Dle [3] bylo zjištěno, že tepelné čerpadlo dokázalo dodat až 2,9 kWh „chlada“ na 1 kWh spotřebované elektrické energie (chladičí faktor $\epsilon_{CH}=2,9$) při okolní teplotě 40 °C. Při režimu topení naopak dokázalo dodat 2,3 kWh „tepla“ na 1 kWh spotřebované elektrické energie (topný faktor $\epsilon_T=2,3$) při okolní teplotě -10 °C.



Obrázek 3: Schéma reverzibilního tepelného čerpadla Nissan Leaf [2]

I přes jednoduchý princip se jedná o poměrně složitou konstrukci, která využívá chladivo R134a a má i řadu nevýhod. Například pokud venkovní teploty dosáhnou níže než -10 °C, může dojít k zamrznutí výparníku. Pokud taková situace nastane, řídicí systém cyklus automaticky obrátí a výměník rozmrazí, aby nedošlo k jeho poškození. Další nevýhodou je chladivo, které nepříznivě ovlivňuje ozonovou vrstvu a značně se podílí na skleníkovém efektu. Jiná chladiva jsou však buď hořlavá, jedovatá nebo mají nízkou účinnost.

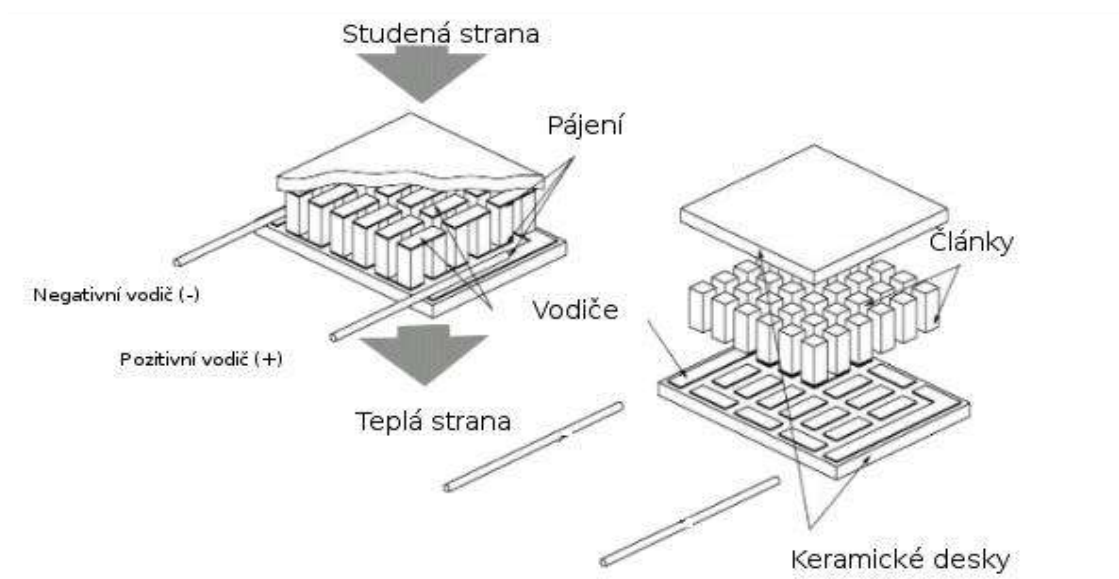
4.3. Peltierovy články

Jsou to termoelektrická zařízení využívající Peltierova efektu, který byl objeven na počátku 19.století. „Peltierův jev popisuje vznik anebo zánik tepla na styku dvou vodičů při průchodu elektrického proudu. Při průchodu elektrického proudu spojem dvou vodičů se na přechodu teplo buď uvolňuje, nebo pohlcuje, v závislosti na směru proudu. Tento jev je výsledkem změny entropie nosičů náboje při průchodu přechodem.“ [4]

Peltierovy články mají výhodu kompaktních rozměrů, přesného řízení teploty a snadným přepínáním mezi topením a chlazením. Také neobsahují žádné pohyblivé části ani pracovní médium. „Nevýhodou těchto článků je velká spotřeba elektrického proudu, což se odráží i na celkové spotřebě automobilu. Při překročení provozních teplot může docházet k přehřívání a je nutné dostatečně chladit teplou stranu, aby byl snížen teplotní rozdíl mezi chladnou a teplou stranou článku.“ [5]

V automobilech jsou tyto články využívány například jako generátory elektrické energie nebo jako aktivní vytápění/chlazení sedaček. Vzduch, který je dopravován ventilátory v konstrukci sedačky, proudí přes termoelektrické články a je ohříván/chlazen. Vzduch poté proudí skrze perforované vrstvy sedadla. Pokud je sedačka přepnuta na chlazení je teplo vygenerované Peltierovým článkem odváděno do prostoru kabiny.

Mezi další způsoby vytápění, které negenerují CO₂, lze například zařadit i nezávislé spalování paliv jako je bioetanol ke generování tepla. Tyto systémy, však mají vyžadují nádrž na palivo, vedení paliva, hořáky a další díly, kvůli kterým se nejedná o příliš často využívané řešení.



Obrázek 4: Ukázka konstrukce jednořadého Peltierova článku [6]

4.4. Radiační panely

Tato technologie je založená na efektu, kdy při průchodu elektrického proudu vodičem dochází k produkci tepla a toto teplo je vyzařováno ve formě infračerveného záření. Přenos tepla radiací má zásadní výhodu a tou je, že jen minimálně dochází k ohřevu vzduchu a většina tepla je přenesena radiací přímo na posádku. Teplo přenášené radiací je obecně považováno za velmi příjemné, a i při nižších teplotách vzduchu v kabině může zajistit či dokonce zvýšit tepelný komfort posádky a mohou být navrženy v libovolných rozměrech a tvarech nebo i jako kontaktní. Na obrázku 5 je vidět, že díky jejich flexibilitě mohou být instalovány na téměř jakýkoliv povrch v automobilu (palubní deska, výplně dveří, sloupky atd.). Tento způsob vytápění představila automobilka BMW, která jej chce použít v další generaci plně elektrické verze automobilu i8.



Obrázek 5: Experimentální radiační panely [7]

Samozřejmě teoreticky existují i další technické řešení, které by se dali použít pro ohřátí interiéru, ale jako třeba v případě magnet kalorického chlazení je není možno vyrábět v milionových sériích nebo mají jiná technická omezení [5].

5. Metody a modely

V této práci jsme postupovali zhruba v podle následujícího seznamu činností. U každé jsou i zmíněny kapitoly, které se danou částí podrobněji zabývají.

- Vytvoření geometrie (kapitoly 6.1)
 - Import geometrie
 - Čištění a oprava chyb
 - Detekce geometricky významných hran (Feature edges)
 - Generování povrchové a objemové sítě buněk
 - Zjemňování a úprava sítě
- Virtuální manekýn (kapitola 6.4)
 - Vytvoření geometrie kalibračního boxu
 - Definování okrajových podmínek dle normy a práce [11]
 - Validace
- Hlavní geometrie (kapitoly 6.2, 6.3 a 7)
 - Definování okrajových podmínek dle materiálů a dat, pro jednotlivé části interiéru a virtuálního manekýna
 - Validace základních scénářů
 - Simulace vlivu radiace

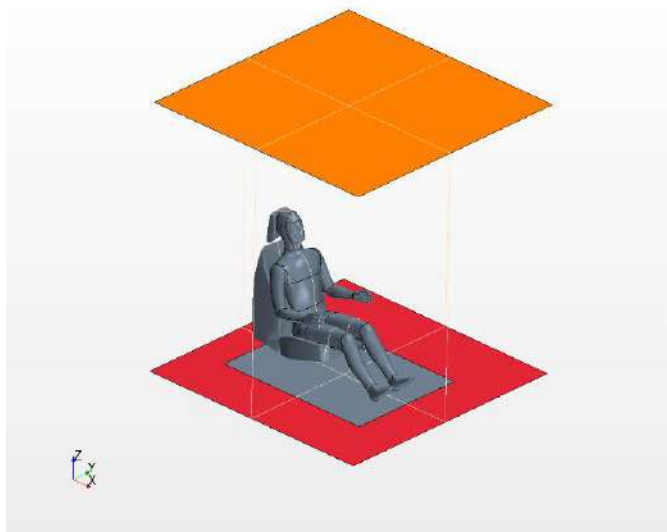
5.1. Simulace CFD

CFD je zkratka anglického Computational Fluid Dynamics, je to soubor matematických postupů a metod pro počítačovou simulaci proudění tekutin a přenosu tepla. Díky CFD je možné simulovat spoustu situací, které by jinak vyžadovali mnoho času a nákladných experimentů a lze je například využít již při návrhu řešení a vybrat to nejvhodnější ještě předtím, než vůbec začne samotná realizace.

Matematicky se nejčastěji využívá metoda tzv. Finite Volume Method (metoda konečných objemů). Lze se setkat i s jinými metodami, ale pro proudění kapalin je tato nejvhodnější. Vzhledem k tomu, že vzniká velké množství rovnic, je nutno řešit tyto problémy na počítačích a získání řešení silně závisí na jejich výkonu. Zpravidla může trvat od několika minut až po několik dní. Metoda CFD nedokáže posoudit správnost výsledku, a proto je nutné disponovat značnými znalostmi o problematice, kterou chceme řešit.

5.2. Virtuální manekýn

Virtuální manekýn je matematickým modelem lidské fyziologie a reprezentuje reálného tepelného manekýna v numerických simulacích. V našem případě se jedná o model tepelného manekýna Newtona, který se na ústavu používá k měření a je vhodný pro stacionární i dynamické výpočty. Takovýto model se dá uplatnit v oborech jako je například medicína, armáda, sport nebo i textilní a obuvní průmysl. Jeho výhodou je možnost odhadnutí parametrů, které nelze určit přímo měřením.



Obrázek 6: Model virtuálního manekýna v kalibračním boxu

Virtuální manekýn je modelem skutečného manekýna, který byl vyvinut pro rychlejší a snadnější vyhodnocování experimentů. Dříve bylo zapotřebí experiment provést na dostatečném vzorku lidí. To bylo zejména časově a finančně náročné. S tepelným manekýnem jsme schopni provést libovolný počet měření za stálých podmínek (tím pádem vysokou opakovatelností). Skutečný a virtuální manekýn jsou vyobrazeni na obrázcích 6 a 7.

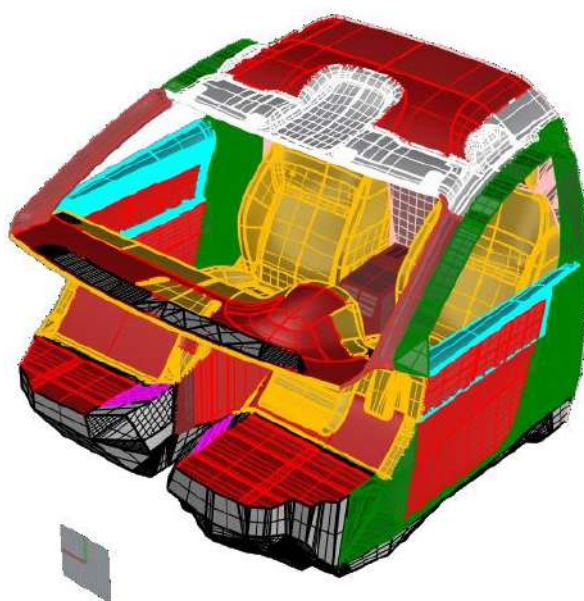


Obrázek 7: Tepelný manekýn [11]

6. Tvorba modelu a simulačního scénáře

6.1. Příprava geometrie modelu

Nejdříve bylo potřeba sjednotit všechny soubory geometrie, které byly v různých formátech, a navíc vždy obsahovaly pouze část potřebného modelu. To jsme provedli v programu Rhinoceros, který obsahuje množství funkcí, usnadňující práci s plochami. Navíc, díky možnosti rozdělení si ploch do jednotlivých vrstev, se lze odlišením barev v modelu jednoduše orientovat, jak je patrné na obrázku 8. Nevýhodou použití tohoto programu je, že při exportu a importu geometrie do programu STAR CCM+ nebyla dostatečně kvalitní a po příkazu k vytvoření povrchové sítě vzniklo velké množství chyb, které znemožňovaly výpočet.

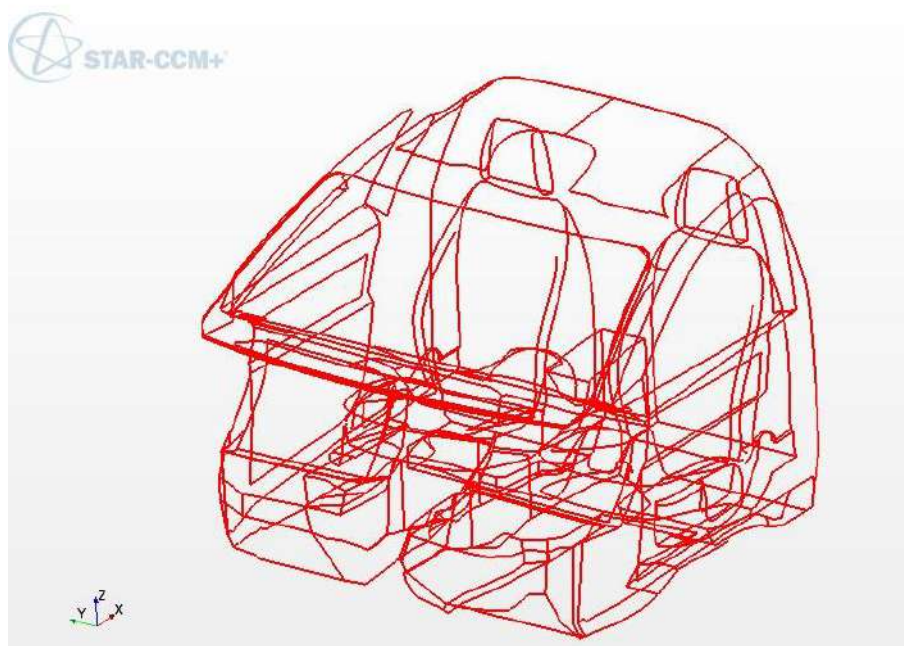


Obrázek 8: Sjednocený model v programu Rhinoceros

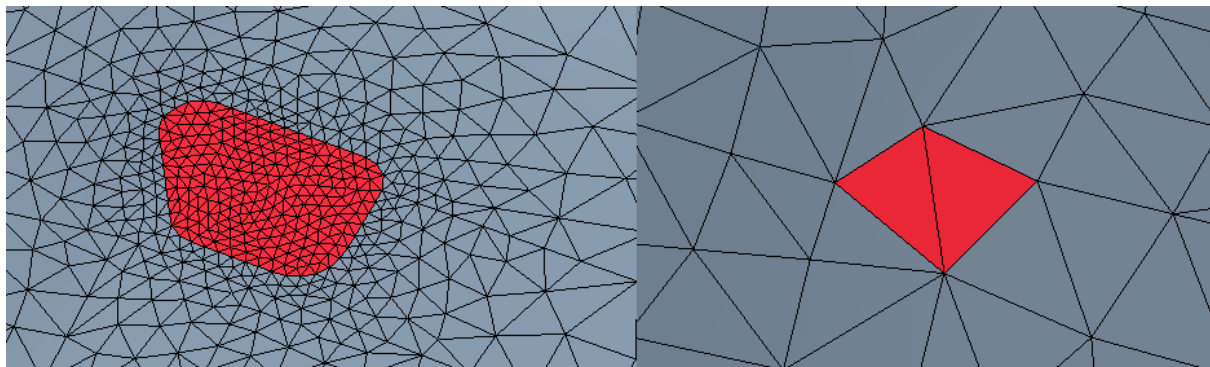
Chyby sítě jsme museli opravit již v programu STAR-CCM+ ve kterém budeme následně provádět i výpočet. Šlo většinou šlo o nevhodné vysítování ve složitých oblastech, kde se například stýkaly dvě a více rovin v jednom bodě. Při importu STAR-CCM+ zachoval i rozdělení rovin a z každé dokázal vytvořit samostatný region. To nám usnadnilo práci a mohli jsme již pouze přejmenovat regiony, pro lepší orientaci. V sekci modelu sítě jsme zvolili možnost vytvoření povrchové sítě (Surface Remesher) a základní velikost buňky (Base Size) nastavili na velikost 5 cm, to zajišťuje že i v místech, jako například mezi sedačkou a středním tunelem jsou alespoň dvě výpočetní buňky.

V dalším kroku bylo třeba definovat tzv. Feature Edges, neboli geometricky významné hrany, které určují pevné rozměry modelu. Ideálně jsou vytvořeny zejména v ostrých přechodových hranách modelu a na hranách vstupů a výstupů kanálů přivádějících médium, jak lze vidět na obrázku 10. Tyto hrany nám zajistí kvalitně vygenerovanou síť v místech, kde by

při základní velikosti buněk mohlo dojít ke změně tvaru a znehodnocení geometrie. Takový rozdíl ilustruje obrázek 10, vlevo je obrázek bez použití geometricky významných hran a napravo při jejich použití. Lze vidět, že výustky jsou v první řadě mnohem přesněji vykresleny za pomoci menších dílů a nedošlo tedy k jejich deformaci jako v případě na pravé straně. Mezi posledními kroky jsme dosadily virtuálního manekýna na místo řidiče a odečtem jeho objemu od vnitřního objemu automobilu nám vznikla sjednocená hranice prostoru pro proudění



Obrázek 9: Vybrazení geometricky významných hran modelu



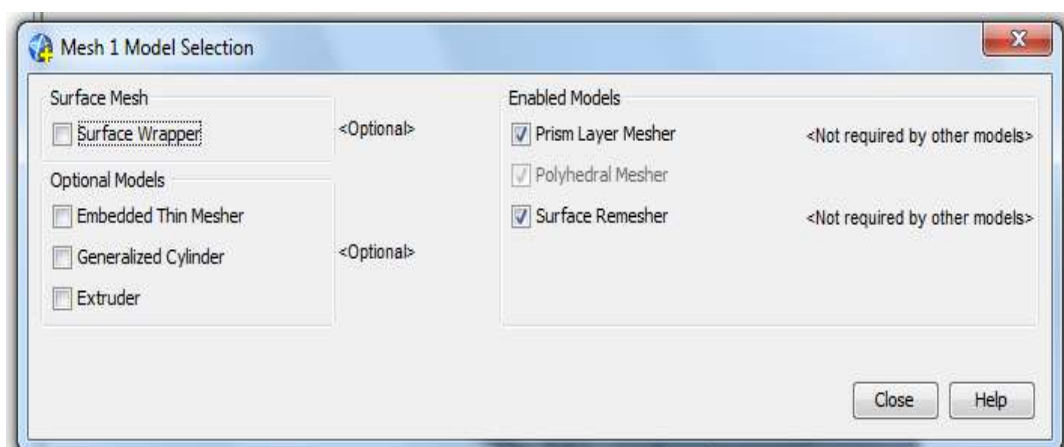
Obrázek 10: Porovnání sítě regionu s použitím Feature Edges (vlevo) a bez použití vzduchu a energetickou výměnu. V případě manekýna jsme potřebovali hustou a kvalitní povrchovou síť, protože jsme řešili problém s přenosem tepla radiací a konvekcí, tudíž dochází k výpočtu i na samotné hranici.

Nastavení meshe proběhlo dle tabulky 1. Bylo vhodné, aby síť v okolí manekýna byla jemnější, protože zde jsme chtěli zjišťovat tepelné toky z povrchu manekýna do okolí. STAR CCM+ nám umožňuje i lokální zjemnění povrchové sítě, ze které se potom generuje objemová.

Tohoto lze využít například i u skel, kde lze předpokládat velký tepelný tol. V těchto regionech jsme nastavili relativní velikost buněk k základním na 50 %. Před finálním generování objemové sítě byly funkce modulu Mesh vybrány dle obrázku 11.

Tabulka 1: Nastavení generování sítě

Velikost buňky [m]	0,03
Počet prizmatických vrstev	3
Růst prizmatické vrstvy	1,3
Volumetric controls_Newton	
Velikost buňky [%]	50
Počet prizmatických vrstev	6
Růst prizmatické vrstvy	1,2



Obrázek 11: Nastavení generátoru výpočetní sítě

6.2. Definování okrajových podmínek a fyzikálních modelů

Každý region lze nastavit samostatně. Celé nastavení jsme provedli dle tabulky 2, která je výtahem tabulky v příloze 1. V první řadě se určí, zda se jedná třeba o pevnou hranici (Wall), vstup proudění (Velocity Inlet) nebo výstup (Pressure outlet), v našem případě jsme použili pouze tyto tři. Následně se u všech regionů typu Wall nastaví jejich tepelná specifikace (Thermal Specification). Pro regiony, které představují topné panely jsme nastavili specifikaci na druh teplota (Temperature) a pro regiony, které jsou více či méně společné s okolním prostředím na druh okolní prostředí (Environment).

U specifikace Temperature následně nastavíme pouze teplotu, kterou má daný region pro výpočet mít, emisivitu a transmisivitu jeho povrchu. Složka Reflektivita je automaticky dopočítána. U specifikace Environment nastavíme teplotu na vnější straně (okolí), tepelné odpory jednotlivých regionů na základě vstupních dat, emisivitu a transmisivitu povrchu a součinitel přestupu tepla na vnější straně. U regionů, jako jsou například dveře, které mají na

nesimulované straně opravdu vnější prostředí jsme součinitel přestupu tepla nastavili na hodnotu 115 W/m²K, tato hodnota je brána na základě zkušeností z experimentů. Pro regiony, jako například palubní deska, kde na odvrácené straně je ve skutečnosti „vzduchová kapsa“ a vzduch je v podstatě pořád součástí interiéru, jsme nastavili hodnotu 1 W/m²K. Transmisivita oken je nastavena nulová, protože okna považujeme pro infračervené záření nepropustná.

Tabulka 2: Nastavení regionů auta (zkratky Environ.=Environment a Temp.=Temperature)

Část	Region	Typ	Thermal Specification	Tepelný odpor [m2K/W]	Heat Transfer Coefficient [W/m2K]	Teplota [K]	Emisivita	Reflektivita	Transmisivita	
Car	Base	Wall	Environ.	1,6146	115,00	283,15	0,972	0,028	0,000	
	Dash	Wall	Environ.	0,1221	1,00	283,15	0,970	0,030	0,000	
	Door.Driver	Wall	Environ.	0,1221	115,00	273,15	0,970	0,030	0,000	
	Door.Passenger	Wall	Environ.	0,1221	115,00	273,15	0,970	0,030	0,000	
	Pillar.A	Wall	Environ.	0,1221	115,00	273,15	0,970	0,030	0,000	
	Pillar.B	Wall	Environ.	0,1221	115,00	273,15	0,970	0,030	0,000	
	Roof	Wall	Environ.	0,1221	115,00	273,15	0,970	0,030	0,000	
	Seats	Wall	Environ.	0,1221	3,54	268.15	0,970	0,030	0,000	
	Tunnel	Wall	Environ.	0,1221	1,00	283,15	0,970	0,030	0,000	
	Plane.Split.Wall	Wall	Environ.	0,0000	1,00	287,93	0,000	0,000	0,000	
Heating	Dash	Wall	Temp.	0,1294	1,00	273,15	0,980	0,020	0,000	
	Driver	Dash.Legs	Wall	Temp.	0,0364	1,00	273,15	0,983	0,017	0,000
		Door.1	Wall	Temp.	0,0364	115,00	273,15	0,983	0,017	0,000
		Door.2	Wall	Temp.	0,0364	115,00	273,15	0,983	0,017	0,000
		Feet	Wall	Temp.	0,0364	1,00	273,15	0,983	0,017	0,000
		Roof	Wall	Temp.	0,0364	115,00	273,15	0,983	0,017	0,000
		Tunnel	Wall	Temp.	0,0364	1,00	273,15	0,983	0,017	0,000
	Passenger	Dash.Legs	Wall	Temp.	0,0364	1,00	273,15	0,983	0,017	0,000
		Door.1	Wall	Temp.	0,0364	115,00	273,15	0,983	0,017	0,000
		Door.2	Wall	Temp.	0,0364	115,00	273,15	0,983	0,017	0,000
		Feet	Wall	Temp.	0,0364	1,00	273,15	0,983	0,017	0,000
		Roof	Wall	Temp.	0,0364	115,00	273,15	0,983	0,017	0,000
		Tunnel	Wall	Temp.	0,0227	1,00	273,15	0,983	0,017	0,000
	Transparent	Window.Front	Wall	Environ.	0,0081	115,00	273,15	0,870	0,130	0,000
Window.Sides		Wall	Environ.	0,0041	115,00	273,15	0,871	0,129	0,000	

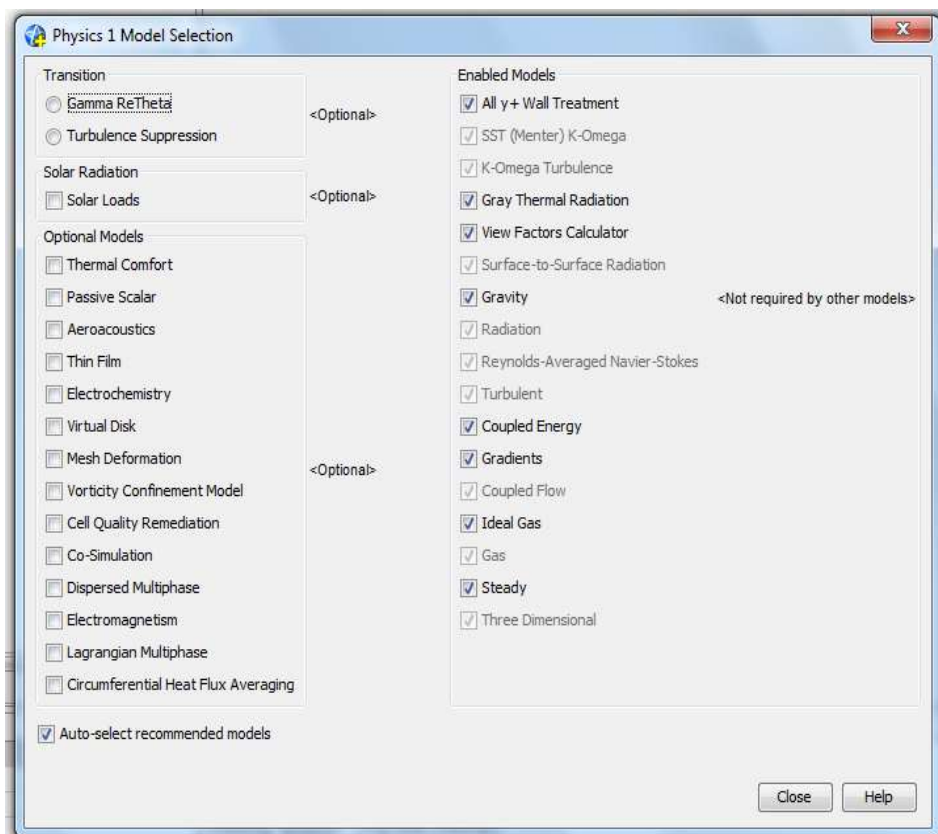
Stejným způsobem nastavíme i regiony manekýna, ty budou opět všechny typu Wall a jako Thermal specification dáme Convection nebo Temperature, vše podle tabulky 3. U regionů, které jsou brány jako pokryté oblečením je zvoleno Convection, protože půjde o plochy, u kterých chceme nastavit i parametr prostupu tepla. U nich už pouze nastavíme teplotu povrchu, emisivitu, transmisivitu. Tepelný odpor se u Convection a Temperature nenastavuje, protože se zde zadává teplota povrchu. Nastavujeme zde, ale Heat transfer coefficient (součinitel přestupu tepla) Zjištění jeho hodnoty je popsáno v kapitole 6.4 Kalibrace virtuálního manekýna. Kalibrační i hlavní simulace byly řešeny se stejnými fyzikálními modely. Jejich volba lze vidět na obrázku 12, kde je náhled okna nastavení fyzikálních modelů programu STAR CCM+. Modely jsme volili podle doporučení z odborné literatury a doporučení podle zkušeností

Tabulka 3: Nastavení regionů manekýna (zkratky Temp.=Temperature Conv.=Convection)

Část	Region	Typ	Thermal Specification	Teplota [K]	Emisivita	Reflektivita	Transmisivita
Arm	Hand	Wall	Temp.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Lower_Bk	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Lower_Fr	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Lower_Joint	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Upper_Bk	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Upper_Fr	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Upper_Joint	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
Body	Abs	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Back_Lower	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Back_Midd	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Back_Upper	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Chest	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Waist	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
Head	Face	Wall	Temp.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Hair1	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Hair2	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Neck	Wall	Temp.	307,15	0,980	0,020	0,000
Leg	Calf_Bk	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Calf_Fr	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Foot	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Joint	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Thigh_Bk_1	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Thigh_Bk_2	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Thigh_Bk_3	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
	Thigh_Fr_1	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000
Thigh_Fr_2	Wall	Conv.	307,15	0,980	0,020	0,000	

vedoucího práce. Problém řešíme jako časově nezávislý a vzduch simulujeme jako ideální plyn. Protože rozdíl v rychlostech proudění u výustek a v kabině je řádový, byl zvolen model turbulence K-Omega SST. Jiné modely nedokážou predikovat vývoj turbulence a separaci proudů [9]. Dále byl zvolen All +y Wall Treatment, který dokáže rozřešit proudění v mezní vrstvě, kdy v některých oblastech je Reynoldsovo číslo nízké a v jiných naopak vysoké.

Inicializační podmínky ve většině zůstávali stejné, jen teplota vzduchu se měnila, v závislosti na scénáři, tak že se rovnala teplotě vzduchu přiváděného vyústkami.

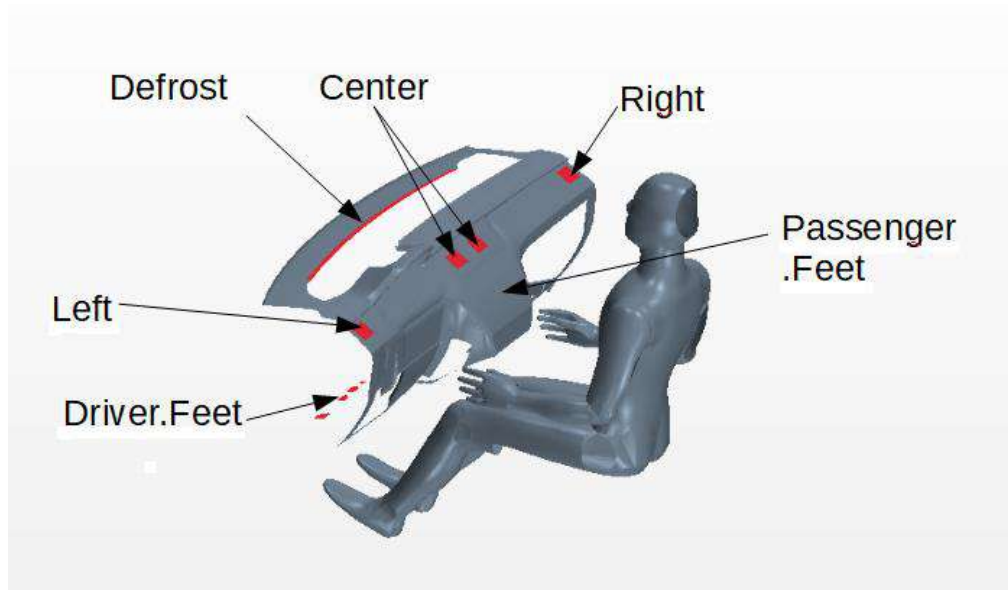


Obrázek 12: Nastavení fyzikálního modelu

Následně jsme nastavovali regiony vyústek, které lze vidět na obrázku 13. Ty byly předepsány jako Velocity inlet, protože jimi vstupuje vzduch do kontrolního objemu. Pro všechny scénáře byly předepsány stejně, kromě teplot, podle tabulky 4.

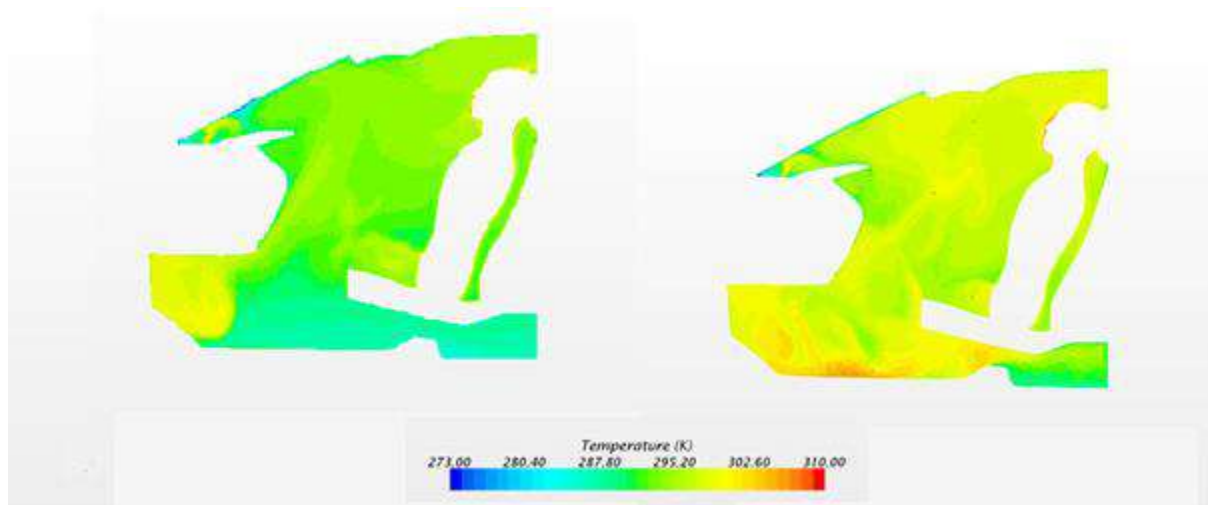
Tabulka 4: Nastavení regionů výustek

Region	Typ	Plocha [m ²]	Poměrný průtok [-]	Objemový tok [l/s]	Rychlost [m/s]	Teplota (C0)[°C]	Teplota (C10)[°C]	Teplota (-C10)[°C]
Center	Velocity Inlet	0,031	0,067	2,70	0,09	303,15	298,15	308,15
Defrost		0,014	0,180	7,30	0,53	303,15	298,15	308,15
Left		0,010	0,132	4,80	0,48	303,15	298,15	308,15
Right		0,010	0,124	4,50	0,44	303,15	298,15	308,15
Dri.Feet		0,009	0,088	2,70	0,38	313,15	308,15	318,15
Pass.Feet		0,009	0,059	3,50	0,29	313,15	308,15	318,15



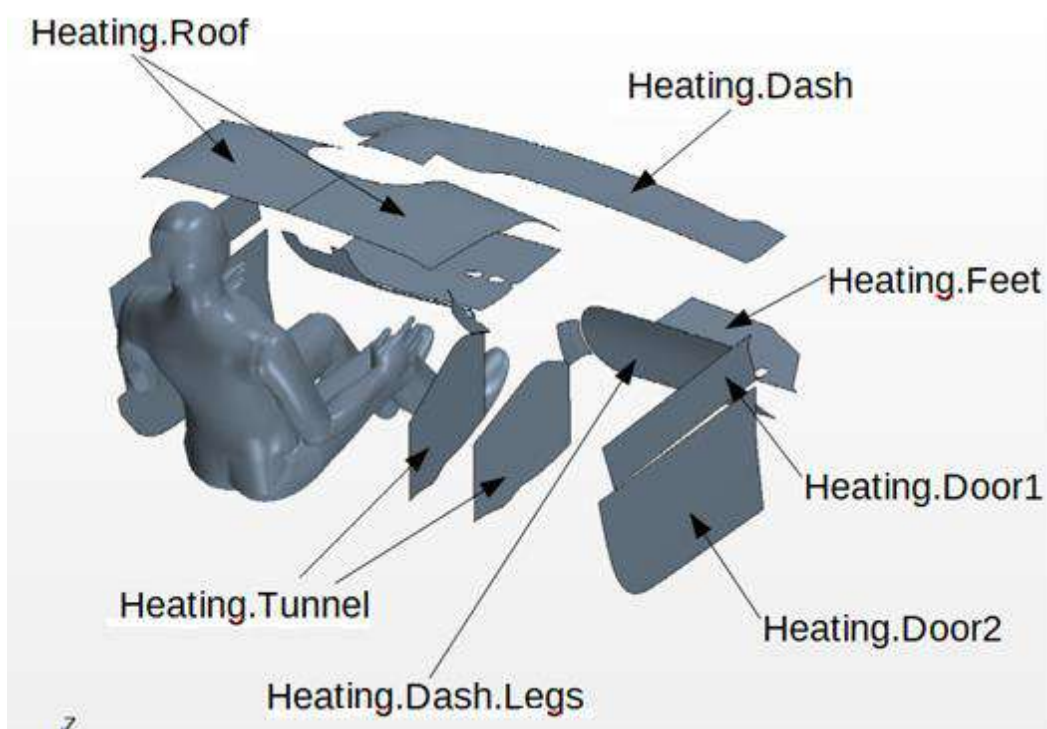
Obrázek 13: Popis umístění a pojmenování jednotlivých výustek. Výustky pro nohy jsou zčásti zakryty

V našem modelu chybí přívodní kanály vzduchu, které by pro co nejlepší výsledky byly zapotřebí. A to zejména, protože proud na výstupu bývá ovlivněn jejich vedením a také nevíme jakým směrem z vyústek přesně proudí. Rozhodli jsme se proto v první fázi, že u všech vyústek předepíšeme směr proudu po normále k ploše vyústky. Po první výsledcích jsme dospěli k závěru, že tento problém budeme muset řešit jen u výustek nohou, kudy proudí velké množství vzduchu, a i o vyšší teplotě než z ostatních výustek. Jak lze vidět z levého v obrázku 14 proud téměř nikam neproudí, pouze se víří o nohou a potom stoupá kolem palubní desky nahoru a všechno teplo v tomto případě přijde vniveč. Na pravé straně obrázku lze vidět proud, který nastavili ve sklonu 20° k normále. Pomocí funkce cosinus jsme přepočítali průtočnou plochu vyústky, bychom zachovali celkovou energii, která se dostává do interiéru. Lze vidět, že proud nyní více proudí prostorem a tím i předává více své energie okolí. To se podepsalo i na lepším tepelném komfortu manekýna, a tak jsme toto nastavení použili ve všech simulacích.



Obrázek 14: Porovnání vlivu směřování proudu z vyústky pro nohy - 0° (obrázek vlevo) a 30° k normále plochy (obrázek vpravo)

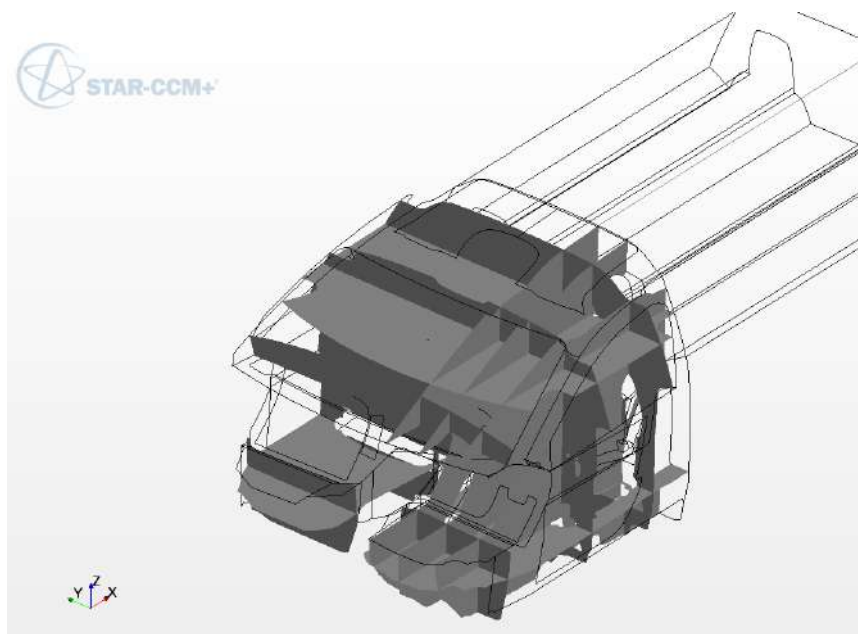
Jako poslední jsme nastavovali regiony, které představují radiační panely, vyobrazené na obrázku 15. Ty byly v základních simulacích bez radiace nastaveny stejně jako jejich okolní regiony. Ale v případech, kdy se zkoušel jejich vliv byly předepsány jako Temperature s příslušnou povrchovou teplotou. Ostatní vlastnosti zůstaly stejné. Panely, které byly umístěny stejně pro pasažéra i řidiče, byly ovládány samostatně a s přídavkem ve jméně určujícím, zda jde o panel mířící na řidiče nebo na pasažéra (Driver nebo Passenger).



Obrázek 15: Popis umístění a pojmenování jednotlivých radiačních panelů v modelu

6.3. Definice řezů, bodů, reportů a monitorů

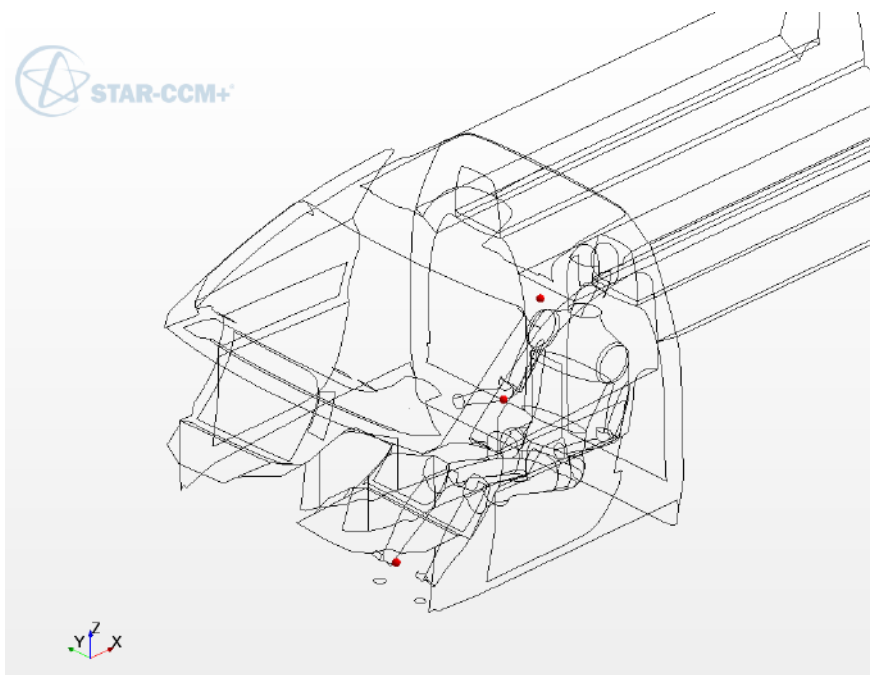
Abychom mohli zobrazit co se v objemu našeho modelu děje, musíme definovat řezy. Ty nám určují roviny, ve kterých chceme výsledky naší simulace zobrazit, a proto je důležité je



Obrázek 16: Zobrazení rovin pro vykreslení řezů jednotlivých polí

správně definovat. Na obrázku 16 jsou vidět námi definované roviny. Definovali jsme je hlavně v oblasti manekýna, protože ta je pro nás nejdůležitější a v každé ose aspoň tři (pro nohy, hrudník a hlavu). Na těchto rovinách poté můžeme zobrazit nejrůznější veličiny, které nás mohou zajímat, při proudění to bývá nejčastěji rychlost, teplota nebo tlak. Barevné zobrazení nám však nedá žádná konkrétní data, slouží spíše pro pochopení celého problému a vizuální kontrolu, jak se celý model chová. Pro získání pevných dat je proto potřeba definovat body, které slouží jako virtuální sondy pro sběr dat a definování reportů a monitorů. My jsme podle obrázku 17 definovali tři body, a to v oblasti hlavy, hrudníku a nohou, protože jsou nejvíce exponované a citlivé na přestup tepla.

Reporty a monitory definujeme před započítím simulace, protože při běhu slouží k záznamu řešení. U reportů definujeme, z jaké oblasti (bodů) a jakou veličinu chceme sledovat, následně report funguje jako textový soubor se záznamem



Obrázek 17: Umístění bodů pro měření bodových hodnot

6.4. Kalibrace tepelného manekýna

K získání správných výsledků, je nutná kalibrace virtuálního manekýna. Důvodem je, že vzájemný vliv jednotlivých mechanismů, tepelných konvekci je složitý, a i když by si program mohl k hodnotám součinitele přenosu tepla dopočítat, nemuselo by to být správně a výsledek by tím byl významně ovlivněn, proto je lepší udělat podružnou simulaci s jednoduchými okrajovými podmínkami. Snažíme se dodržet podmínky, které jsou popsány i při fyzické kalibraci manekýna normou ISO 14505-2,2007.

Manekýn je umístěn v „boxu“ ve tvaru krychle ve stejné poloze jako v hlavní simulaci, a to včetně sedačky. Krychli jsme si rozdělili v podstatě do tří oblastí, které tvoří stěny, vstup a výstup media. Stěny jsou předepsány samozřejmě jako Wall a typu Convection s předepsanou emisivitou 0,98.

Vstup vzduchu je předepsán na základně krychle po obvodu, jak je vidět na ilustraci s rychlostí $0,05 \text{ m}^{\text{s}^{-1}}$ a teplotou $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$, kterou jsme zvolili pro ulehčení výpočtu (rozdíl v teplotě vzduchu a manekýna bude $\Delta t = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Výstup byl předepsán na „stropu“ boxu na kterém jsme pouze použili funkci Extruder, která nám vygeneruje objemovou síť i mimo přímo simulovanou oblast.

Jádrem této kalibrace bylo správné nastavení odporů prostupu tepla u částí pokrytých oděvem. Neměli jsme totiž žádná data s tepelnými odpory oblečení, a tak jsme využili poznatků z dřívějších prací vedených panem doktorem Fišerem. Použili jsme k tomu data dle [11] a předpokladu, že součinitel přestupu tepla byl všude stejný jako na odhalených částech (obličej a ruce). Potom jsme z rovnice 9 pro výpočet celkového odporu přestupu tepla vypočítali odpor prostupu tepla oblečení na dané části manekýna, tyto hodnoty můžeme vidět v tabulce 5.

$$h_{cl} = \frac{1}{R_{cl}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{cel}} + \frac{1}{\alpha_{Face,Hand}}} \quad (\text{rov.9})$$

Kde:	h_{cl}	odpor prostupu tepla oblečením virtuálního manekýna	[W/m ² K]
	h_{cel}	celkový odpor přestupu tepla celkový	[W/m ² K]
	$h_{Face,Hand}$	odpor přestupu tepla	[W/m ² K]

Tabulka 5: Tabulka odporů prostupu tepla oblečením pro kalibraci manekýna

Region	h_{cel} [W/m ² K]	$H_{Face,Hand}$ [W/m ² K]	R_{cl} [m ² K/W]	h_{cl} [W/m ² K]
Arm_Lower	4,58	9,11	0,10	10,00
Arm_Upper	3,20		0,20	5,00
Back_Lower	2,60		0,27	3,70
Back_Upper	3,06		0,21	4,76
Calf	5,17		0,08	12,50
Chest	2,66		0,26	3,85
Face	9,49		0,00	0,00
Foot	5,24		0,08	12,50
Hand	8,73		0,00	0,00
Scalp	5,29		0,07	14,29
Thigh	4,58		0,10	10,00
Seat	3,45		0,18	5,56

Z kalibrace jsme si zjistily tepelné toky, které prohází regiony manekýna a podle rovnice 10 vypočetli součinitel prostupu tepla do naší simulace. V tabulce 6 jsou uvedeny výsledky se součiniteli dle [11] pro porovnání.

$$h_{virtual} = \frac{\dot{q}_{cal}}{T_s - T_o} \quad (\text{rov.10})$$

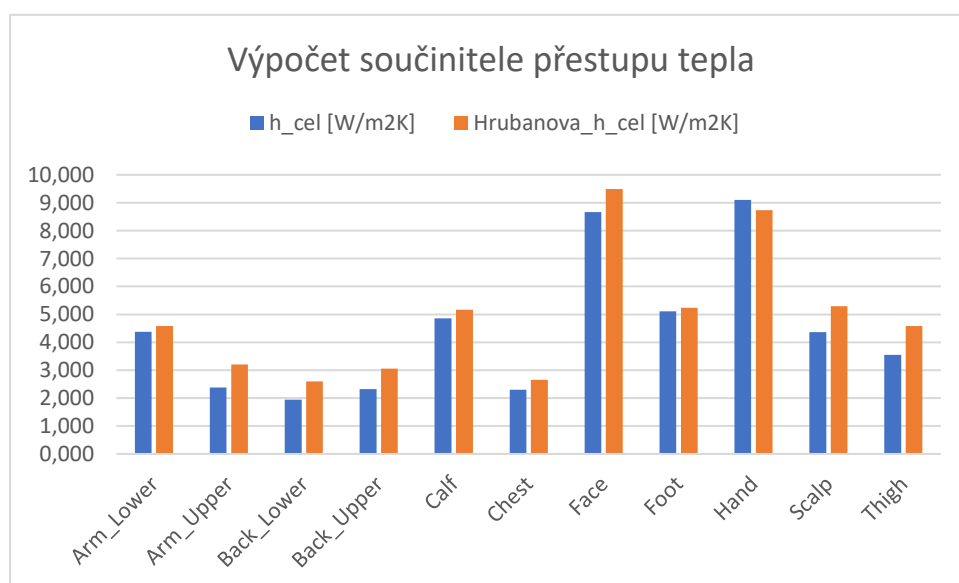
Kde: \dot{q}_{cal} tepelný tok manekýnem [W/m²]

T_s povrchová teplota manekýna [°C]

T_o teplota okolí [°C]

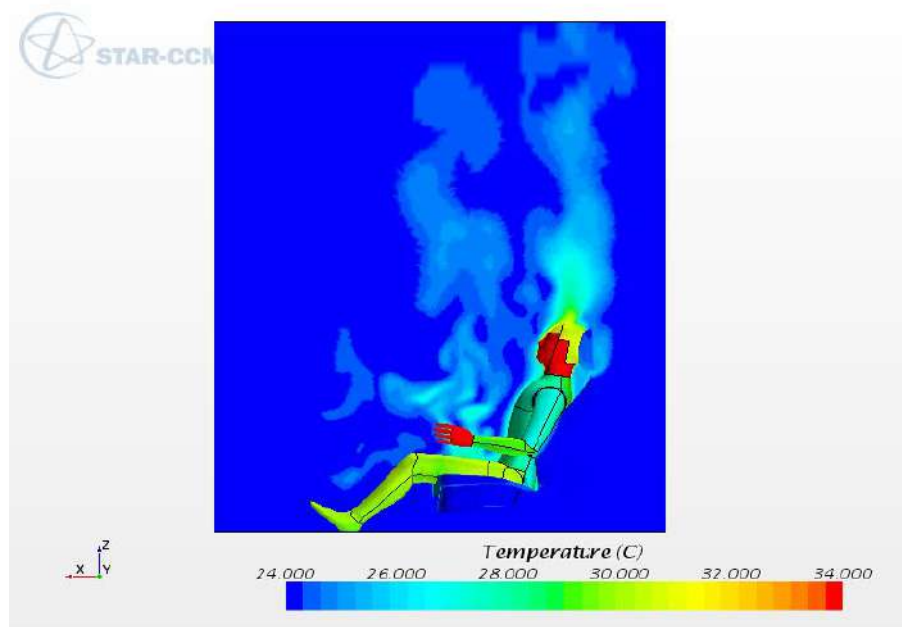
Tabulka 6: Porovnání výsledků kalibrace manekýna s výsledky měření dle [11]

Region	$h_{virtual}$ [W/m ² K]	Hrubanova_re- sult (h_{cel}) [W/m ² K]
Arm_Lower	4,37	4,58
Arm_Upper	2,38	3,20
Back_Lower	1,94	2,60
Back_Upper	2,32	3,06
Calf	4,86	5,17
Chest	2,30	2,66
Face	8,67	9,49
Foot	5,11	5,24
Hand	9,10	8,73
Scalp	4,36	5,29
Thigh	3,55	4,58
Seat	-0,04	3,45



Graf 2: Porovnání hodnot odporu přestupu tepla ve výpočtu a experimentu

Správnost našeho postupu jsme si následně vizuálně ověřili vyobrazením teplot, obrázku 18 a opět porovnáním výsledku celkového odporu přestupu tepla s daty dle [11] na grafu 2. Následně jsme hodnoty h_{virtual} mohli zadat do naší hlavní simulace.



Obrázek 18: Teplotní pole při kalibraci manekýna

Je vidět, že se výpočet s naším nastavením chová správně. Větší rozdíly jsou pouze v místech, kde dochází k ovlivnění nejspíše kvůli sedačce. Tímto jsme si potvrdili, že hodnoty z kalibrace můžeme zadat do hlavní simulace, kde manekýn sedí v autě.

7. Simulační scénáře

7.1. Tvorba a vyhodnocení základních scénářů chování sálavých panelů

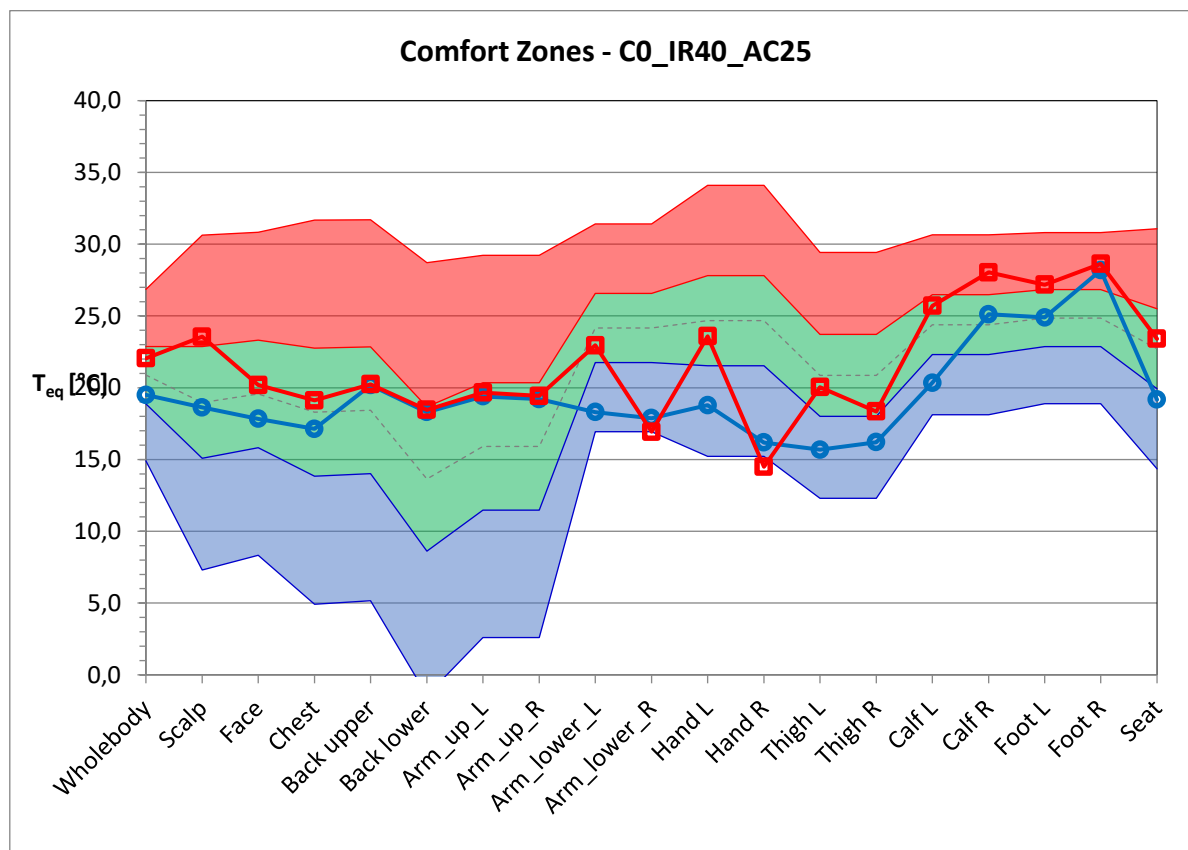
Při vytváření scénářů jsme vycházeli z praxe běžné v automotive a vytvořili tři základní scénáře, které představují situaci v automobilu s běžným systémem vytápění. Systém vytápění testují ve třech vnějších podmínkách. Pro první scénář je to vnější teplota -10 °C a relativní vlhkost vzduchu 90 %, pro druhý 0 °C a 80 % a pro třetí 10 °C a 70 %. Tyto základní scénáře jsme poté použili k porovnání s 27 scénáři, ve kterých jsme kombinovali různou teplotu přiváděného vzduchu a povrchovou teplotu radiačních panelů. Všechny můžete přehledně vidět v tabulce 2. Teploty panelů jsme volili tak, aby byly vyšší než teplota manekýna. Na zelené linii, leží scénáře, u kterých předpokládáme dosažení ideálního tepelného komfortu, naopak v červených a modrých polích předpokládáme, že zde by bylo posádce příliš horko nebo zima. Číslo uvedené v buňce slouží k orientaci v grafech v příloze 2. Scénáře, které by využívaly vytápění pouze radiačními panely jsme vyloučili hned od začátku, neboť ze zdroje [7] vyplynulo, že panely nejsou schopné samostatně zajistit dostatečný výkon pro dosažení tepelného komfortu.

Tabulka 7: Seznam porovnávacích scénářů (označení scénáře X.Y.Z X-číslo základního scénáře, Y-teplota přiváděného vzduchu, Z-povrchová teplota panelů)

Teplota přiváděného vzduchu \ Teplota panelů Ambient temp: 10°C	40	45	50
15	1.15.40	1.15.45	1.15.50
20	1.20.40	1.20.45	1.20.50
25 (T_Base Case1)	1.25.40	1.25.45	1.25.50
Vlhkost okolního vzduchu [%]	70		
Teplota přiváděného vzduchu \ Teplota panelů Ambient temp: 0°C	40	45	50
20	2.20.40	2.20.45	2.20.50
25	2.25.40	2.25.45	2.25.50
30 (T_Base Case2)	2.30.40	2.30.45	2.30.50
Vlhkost okolního vzduchu [%]	80		
Teplota přiváděného vzduchu \ Teplota panelů Ambient temp: -10°C	40	45	50
25	3.25.40	3.25.45	3.25.50
30	3.30.40	3.30.45	3.30.50
35 (T_Base Case3)	3.35.40	3.35.45	3.35.50
Vlhkost okolního vzduchu [%]	90		

Přesné nastavení teplot vzduchu přiváděného u jednotlivých výustek je definováno v tabulce v příloze 1 v části nastavení okrajových podmínek výustek. Pro všechny případy, byly vždy zachovány stejné objemové toky, pouze se měnila teplota přiváděného vzduchu.

Z každého hotového scénáře jsme následně získali data o tepelných tocích na segmentech manekýna, které jsme mohli poté použít ke zjištění ekvivalentní teploty a tepelného komfortu jako je graf 3.



Graf 3: Komfortní zóny scénáře 2.25.40

Scénář 2.25.40 ($T_{amb}=0\text{ °C}$, $T_{AC}=25\text{ °C}$, $T_{IR}=40\text{ °C}$) nám potvrzuje náš přístup, že se zapojením tepelných panelů můžeme snižovat teplotu přiváděného vzduchu. Podařilo se nám i o $2,5\text{ °C}$ zvýšit celkový tepelný komfort, tak že je lehce nad ideálním. Z grafů dalších scénářů v příloze 2 (jmenovitě 2.20.45 a 2.20.50) vyplývá, že bychom teoreticky mohli s teplotou vzduchu ještě níže, ale se zvyšující se teplotou panelů se zvětšuje rozdíl v komfortu v oblasti rukou, kdy na pravé straně se již nacházejí v oblasti „Warm Comfort“ (Teplé, ale příjemné) a na pravé „Cold Comfort“ (Chladé, ale příjemné). Tento trend se opakuje ve všech simulovaných případech. Dále musíme vyřešit problém, že oblast nohou se ve většině scénářů nachází také v oblasti velmi teplého komfortu.

Na základě výše popsaného může odhadnout, které kombinace teplot má smysl dále prozkoumat a které můžeme z prověřování vyloučit. Z těchto poznatků můžeme již také vytvořit tabulku v příloze 3, která nám předběžně vyhodnotí i přibližné úspory tepla potřebného k ohřátí vzduchu přicházejícího z venku do interiéru. Ta nám může následně pomoci při

rozhodování, kdy dva scénáře mohou vycházet podobně z hlediska tepelného komfortu. Pro výpočet tepla potřebného k ohřátí proudícího vzduchu do interiéru jsme použili rovnici 11:

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho \cdot \Delta i \quad (\text{rov.11})$$

Kde:	Q	tepelný tok	[W]
	V	objemový tok	[m ³ /s]
	ρ	hustota	[kg/m ³]
	i	měrná entalpie	[J/kg]

V tabulce 8 je vidět výtah s výsledky z tabulky v příloze 3. Červeně jsou označeny teploty, které jsou nastaveny pro základní scénáře, a proto u nich není ani vyhodnocena úspora.

Tabulka 8: Průběžné vyčíslení úspor prvních navrhovaných scénářů

T case	minC10 (phi=90%)			C0 (phi=80%)			C10 (phi=70%)		
	25	30	35	20	25	30	15	20	25
Σ Q vzduch[W]	1530,6	1710,3	1886,4	939,0	1122,5	1303,4	355,6	515,7	728,1
Úspora IR45 (159 W) [%]	10,4	0,9		15,8	1,7		29,3	7,3	
Úspora IR40 (117 W) [%]	12,7	3,2		19,0	4,9		35,2	13,2	

Z tabulky je ihned jasné, že nejvíce energie se dá vždy uspořit snížením teploty přiváděného vzduchu. Proto budeme dále pokračovat se scénáři, s nejnižšími hodnotami vstupního vzduchu a nedostatky se snažit korigovat zapojením panelů pasažéra nebo úpravou teplot vzduchu a panelů.

Tabulka 9: Seznam doplňkových scénářů

Seznam doplňkových scénářů	
T_amb=-10 °C	IR40_AC30_HeadFootIR35
	IR40_AC25_Pass40
	IR40_AC30_FootAC25
	IR45_AC25_Pass45
T_amb=0 °C	IR40_AC25_HeadFootIR35
	IR40_AC20_Pass40
	IR40_AC25_FootAC20
	IR45_AC20_Pass45
T_amb=10 °C	IR40_AC20_HeadFootIR35
	IR40_AC15_Pass40
	IR40_AC20_FootAC15
	IR45_AC15_Pass45

Navrhli jsme tedy dalších dvanáct scénářů, které vychází z poznatků grafů tepelného komfortu a tabulky 8. Pro každou vnější teplotu zkusíme snížit povrchovou teplotu v oblasti hlavy a nohou, dále snížit teplotu přiváděného vzduchu o 5 °C a zapojit panely na dveřích a

střeše, abychom kompenzovali chlad na pravé straně, také zkusíme zvýšit povrchovou teplotu panelů řidiče i zmíněných pasažérových a snížit teplotu přiváděného vzduchu o 5 °C a jako poslední možnost zkusíme pouze snížit teplotu přiváděného vzduchu z nožních vyústek o 5 °C. Pro jednoduchost jsou všechny úpravy uvedeny v tabulce 9.

Tabulka v příloze 2 vyhodnocuje úspory pouze při povrchové teplotě panelů 40 °C a 45 °C. Tato skutečnost je zapříčiněna tím, že až po získání dat z námi připravených scénářů, jsme zjistili doporučené maximální hodnoty povrchové teploty materiálů. Podle tabulky 4 (zde tabulka 10) v nařízení vlády č. 361/2007 Sb. v příloze 1 části E je teplota 48 °C maximální pro kontakt nechráněné kůže po dobu 10 minut při které by nemělo dojít k popálení.

Tabulka 10: Příпустné povrchové teploty pevných materiálů

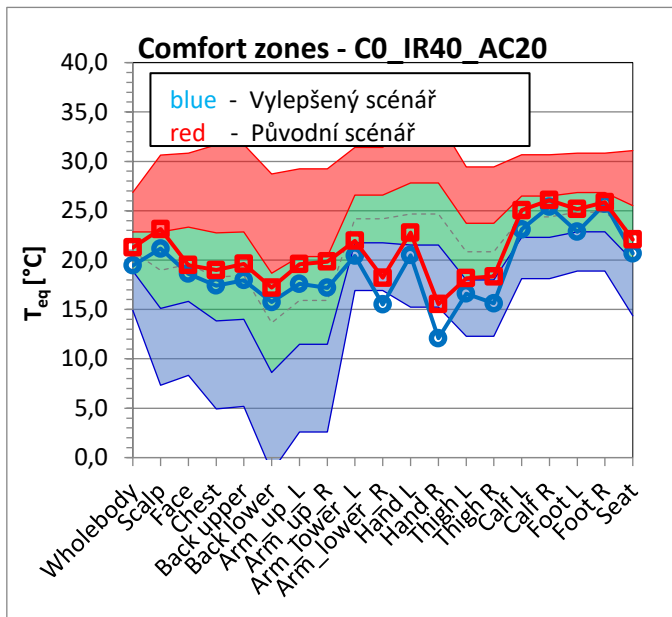
Materiál	prahy popálení při trvání dotyku			
	10 sekund	1 minuta	10 minut	8 hodin a déle
	°C	°C	°C	°C
kov	55	51	48	43
keramické, skleněné a kamenné materiály	66	56	48	43
plasty	71	60	48	43
dřevo	89	60	48	43

Vysvětlivky k tabulce:

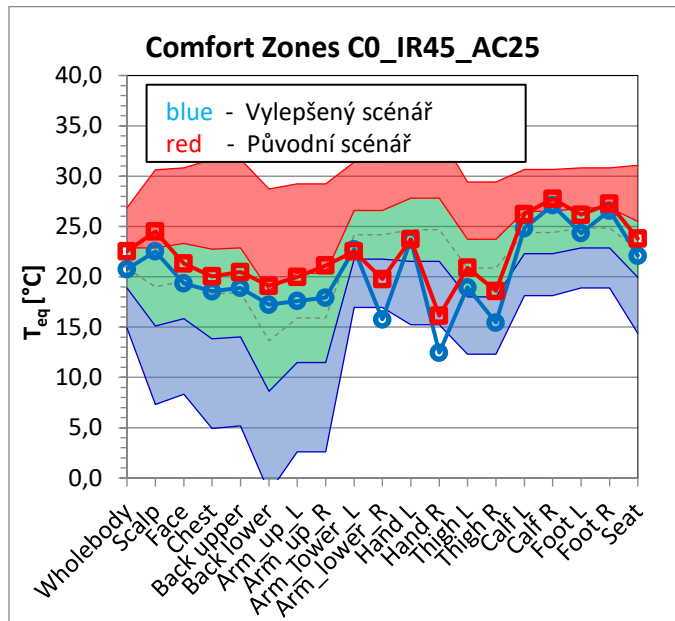
Práh popálení je povrchová teplota vymezující hranici mezi kůží bez popálení a povrchovou popáleninou vyvolanou dotykem kůže s horkým povrchem při určitém trvání dotyku. Hodnota 51°C pro dobu 1 minuty platí také pro jiné materiály s vysokou tepelnou vodivostí, které nejsou v tabulce uvedeny, pro ostatní materiály s nízkou tepelnou vodivostí platí teplota 60°C.

7.2. Vyhodnocení vlivu úprav na vybrané scénáře

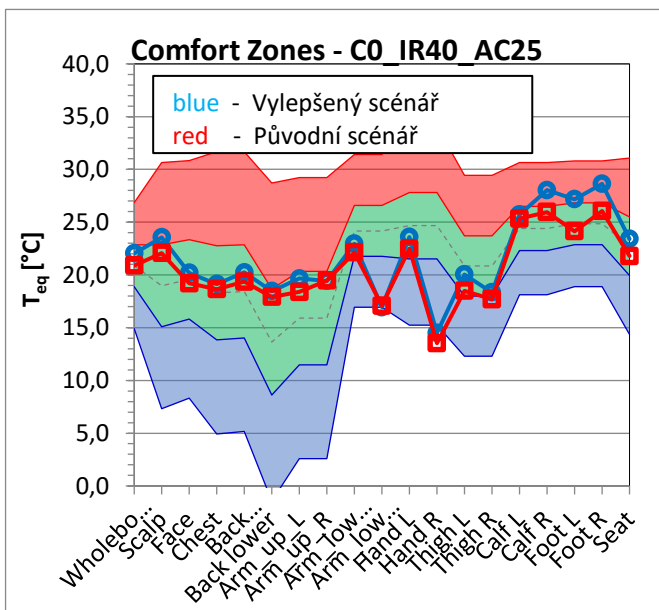
Při hodnocení výsledných diagramů z doplňkových scénářů jsme si mohli všimnout několika jevů. Připojením panelů na dveřích a střeše u pasažéra s povrchovou teplotou 40 °C, vycházela při venkovních teplotách 0 a -10 °C nejlépe. Rozdíl mezi levou a pravou rukou se snížil, a přitom nedošlo k velkému ovlivnění zbytku těla tak, aby ekvivalentní teploty byly významně vychýleny mimo neutrální oblast, jak lze vidět na grafu 4 a grafu 6.25.40-2 v příloze 2, které srovnávají scénáře včetně a bez zapojení pasažérových panelů. V případech, kdy měly panely povrchovou teplotu 45 °C, jak je vidět na grafu 5, se rozdíl ještě více snížil, avšak většina ekvivalentních teplot se již dostala do oblasti „Warm Comfort“ (Tepla, ale příjemné) a oblasti nohou a hlavy, byly ve všech případech vystaveny až příliš vysoké teplotě. Případy, kdy jsme snížili teplotu vzduchu přiváděného vyústkami k nohám o 5 °C, si lze na grafu 6 všimnout malého rozdílu v celkovém komfortu a lehkém snížení ekvivalentní teploty u nohou. To nám může pomoci uspořit velké množství energie, protože skrze vyústky u nohou proudí velké množství vzduchu, a tedy i změna o 5 °C dělá velký rozdíl (přibližně 70 W). Navíc ve většině případů máme problémy s příliš vysokou teplotou nohou. U poslední úpravy, kterou jsme pouze snížili teplotu panelů u nohou a hlavy na 35 °C se ve všech třech venkovních teplotách neprojevil žádný velký vliv na teplotu nohou, v grafu 7 lze vidět pouze v oblasti hlavy, že se přiblížila ideální ekvivalentní teplotě což hodnotíme jako pozitivní



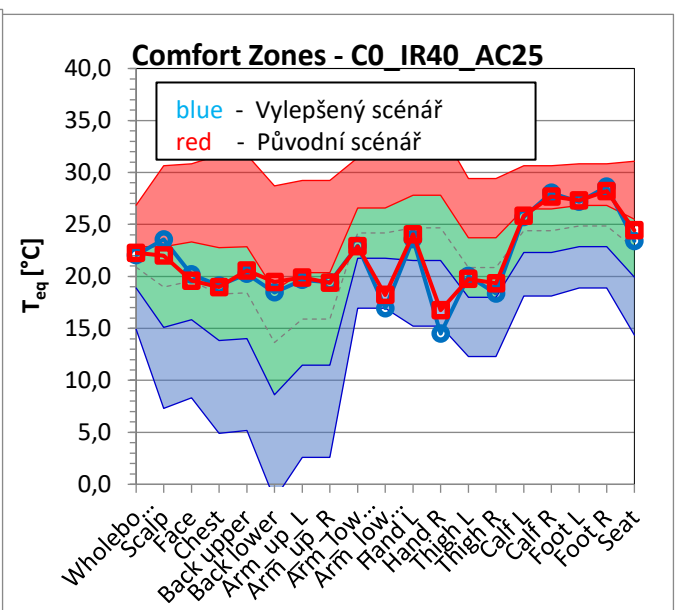
Graf 4: Zapojení panelu střechy a dveří u pasažéra s teplotou 40 °C



Graf 5: Zapojení panelů střechy a dveří u pasažéra s teplotou 45 °C



Graf 6: Diagram při snížení teploty vzduchu u nohou o 5°C



Graf 7: Snížení teploty panelů u hlavy a nohou na 35°C

V případě teploty okolního vzduchu -10 °C lze uvažovat i o možnosti pouze snížení teploty panelů nohou a střechy na 35 °C, která podle grafu 6.30.40-1 v příloze 2 (str. 87), vychází

také do jisté míry výhodně. Nicméně by úspora na panelech nepokryla navýšení teploty vzduchu. V případě, kdy mají všechny panely teplotu 40 °C je úspora pouze 3,2 %, pro případ s nižší teplotou vzduchu vychází tato úspora přibližně 13 % a zapojením panelů pasažéra nedojde k takovému navýšení spotřebované energie, proto jsme se rozhodli i v tomto případě zvolit variantu se zapojením panelů pasažéra.

Ke stejnému závěru jsme dospěli i při okolní teplotě +10 °C. Z grafu 4.20.40-1 a 4.15.40-2 (str. 79 a 80) a opět tabulky v příloze 3 jsme vyhodnotili, že z pohledu úspor je mnohem výhodnější varianta se vzduchem o nižší teplotě a zapojení panelů pasažéra. Rozdíl v procentuální úspoře při ohřívání vzduchu na 15 a 20 °C a povrchovou teplotou panelů 40 °C jen na řidičově straně je téměř třináásobný.

8. Výsledky a diskuze

Pro zběžné posouzení vlivu radiačních panelů jsme si vytvořili tabulku v příloze 3, která nám hodnotí úspory pro základní scénáře. U těch jsme zvolili povrchovou teplotu panelů na straně řidiče 40 a 45 °C. Pro teplotu okolí nula stupňů jsme i vzhledem k diagramu komfortních zón tohoto případu zvolili jako ideální teplotu přiváděného vzduchu 20 °C. Při výpočtech spotřeby panelů, vycházíme pro jednoduchost z hodnot pro teplotu 0 °C pro všechny venkovní teploty. Rozdíl v tepelném toku z panelů mezi krajními případy je přibližně 7 W. To nám při výpočtech úspor tvořilo chybu v řádech desetin procent, a proto jsme tento rozdíl zanedbali.

Pro výpočet úspory jsme použili rovnici 12.

$$\xi = \left(1 - \frac{(\dot{V} \cdot \rho_{střT} \cdot \Delta i) + P_{IR}}{P_{BC}}\right) \cdot 100 \quad (\text{rov.12})$$

Kde: ξ procentuální úspora [%]

P_{IR} celkový výkon radiačních panelů [W]

P_{BC} výkon pro ohřev vzduchu v základním scénáři [W]

V případě teploty vnějšího vzduchu o teplotě 0 °C, předběžně víme z tabulky v příloze 3, že by se úspora měla pohybovat do 20 %. V navrhovaném případě, kdy chceme zvýšit komfort končetin na pravé straně, abychom docílili bližší teploty se celkový výkon soustavy vyšplhal na přibližně 1150 W a úspora proti základnímu případu klesla na přibližně 11,5 %, jak je vidět v tabulce 6.

Tabulka 11: Vyhodnocení úspory pro scénář C0_IR40_AC20 se zapojením panelů pasažéra

Vyústka	Objem.tok [l/s]	$\rho_{střT}$ [kg/m ³]	Δi [kJ/kg]	Panel	Výkon [W]	Suma panelů [W]	Celkový výkon [W]	Base Case výkon [W]	Úspora [%]
Center	2,54	1,22	20,31	Dash.Legs	7,29	212,20	1151,17	1303,4	11,68
Defrost	6,83			Door1	30,85				
Left	4,50			Door2	75,55				
Right	4,22			Feet	22,14				
Driver	7,09			Roof	62,02				
Passanger	6,21			Tunnel	14,35				

Pro případ okolní teploty -10 °C, se v základním scénáři pohybovala úspora přibližně 12,5 %. V tabulce 7 lze vidět, že při zapojení panelů pasažéra se celkový výkon soustavy zvýšil z původních 1650 W, podle tabulky v příloze 2, na 1740 W. Tím se nám celkový úspora energie snížila o 5 % na hodnotu přibližně 7,5 %.

Tabulka 12: Vyhodnocení úspor pro scénář minC10_IR40_AC25 se zapojením panelů pasažéra

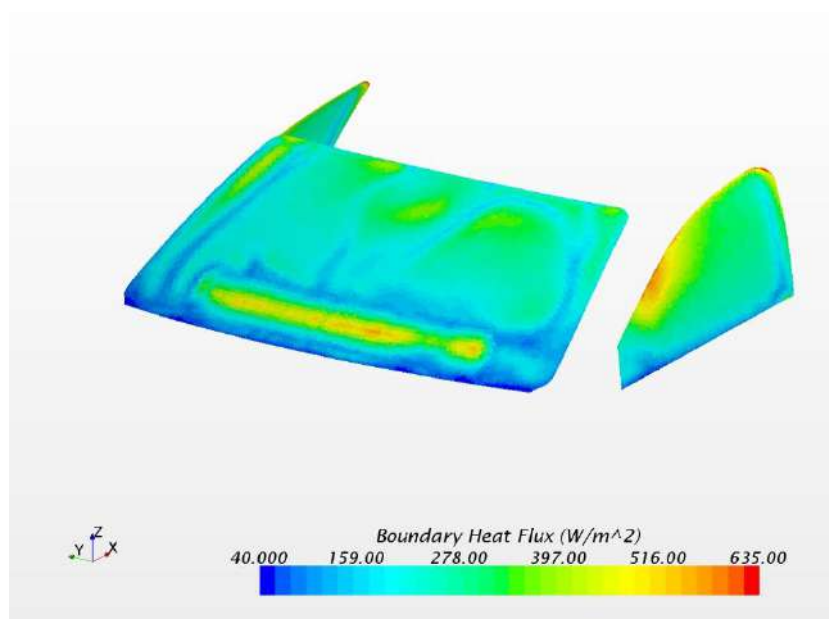
Vyústka	Objem.tok [l/s]	$\rho_{stř_T}$ [kg/m ³]	Δi [kJ/kg]	Panel	Výkon [W]	Suma panelů [W]	Celkový výkon [W]	Base Case výkon [W]	Úspora [%]
Center	2,54	1,23	35,44	Dash.Legs	7,29	212,20	1742,81	1886,38	7,61
Defrost	6,83			Door1	30,85				
Left	4,50			Door2	75,55				
Right	4,22			Feet	22,14				
Driver	7,09			Roof	62,02				
Passenger	6,21			Tunnel	14,35				

U případu okolní teploty +10 °C byla úspora procentuálně nejvyšší. V základním scénáři dosahovala hodnoty až 35 %. U této venkovní teploty je podle tabulky 8 výkon panelů zhruba stejný k výkonu, který potřebujeme pro ohřátí vzduchu. Výkon soustavy se při zapojení panelů pasažéra zvýšil z 472 W na 567 W a celková úspora tedy klesla na 22 %.

Tabulka 13: Vyhodnocení úspor pro scénář C10_IR40_AC15 se zapojením panelů pasažéra

Vyústka	Objem.tok [l/s]	$\rho_{stř_T}$ [kg/m ³]	Δi [kJ/kg]	Panel	Výkon [W]	Suma panelů [W]	Celkový výkon [W]	Base Case výkon [W]	Úspora [%]
Center	2,54	1,22	20,31	Dash.Legs	7,29	212,20	567,76	728,14	22,03
Defrost	6,83			Door1	30,85				
Left	4,50			Door2	75,55				
Right	4,22			Feet	22,14				
Driver	7,09			Roof	62,02				
Passenger	6,21			Tunnel	14,35				

Při reálném provozu bychom museli počítat s ještě nižšími úsporami, protože v simulaci počítáme s dokonalou izolací panelů na vnější straně, která za normálních podmínek není možná. Automobil také není perfektně těsný a dochází k únikům tepla skrze netěsnosti, kolem dveří a oken. Skrze okna zároveň dochází k největším tepelným ztrátám, které například pro případ -10 °C dosahují vyšších hodnot, jak lze vidět z obrázku 19, než je výkon radiačních panelů, proto by stálo za úvahu vylepšení tepelně izolačních vlastností oken. Automobilka Volkswagen například již experimentuje s vyhřívanou folií v čelním skle automobilu, která by měla sloužit k rozmrazování a zároveň k menšímu pocitu chladu od čelního skla. Toto řešení je jednou z možností, ovšem je otázkou, jakou měrou bude přispívat k úspoře. U vyhřívání oken musíme počítat pouze s maximálně 50 % účinností vzhledem k teplu odvedenému do interiéru. Na druhé straně bychom byli schopni snížit teplotu vzduchu proudícím skrze vyústku směřující na čelní sklo a jak jsme se přesvědčili v našich příkladech i malá změna teploty znamená při ohřívání vzduchu značné úspory.



Obrázek 19: Měrný tepelný tok skrze okna

9. Závěr

Práce je zaměřená na modelování prostředí v interiéru automobilu a zjištění možných úspor při zapojení radiačních panelů k dosažení tepelné pohody. Geometrie byla připravena v programu Rhinoceros a následně přenesena do programu STAR-CCM+, ve kterém jsme provedli i všechny simulace. V modelu jsme uvažovali přítomnost pouze řidiče.

Teploty vzduchu přiváděného jednotlivými výstky do kabiny jsme čerpali z práce [19]. Abychom v základních scénářích dosáhli alespoň přibližně tepelnému komfortu, musela být teplota vzduchu přiváděného výstky u nohou o 10 °C zvýšena oproti vzduchu přiváděnému ostatními výstky.

Simulace byly vytvořeny pro tři vnější podmínky, které vyžadují využití topení. V prvním případě se jednalo o extrémní chlad, který může běžně nastat například při jízdě v noci nebo brzkých ranních hodinách a uvažovali jsme teplotu -10 °C. Ve druhém jsme předpokládali podmínky, se kterými se můžeme setkat v našich podmínkách běžně během zimního dne s teplotou okolí 0 °C. Ve třetím jsme předpokládali mírné podmínky, například vyskytující se během podzimu nebo jara či brzkých ranních hodin v létě s teplotou +10 °C. Pro každý tento případ jsme vytvořili simulaci aktuálního stavu, bez přítomnosti radiačních panelů v interiéru a následně 9 simulací kombinujících teploty vzduchu přibližně od 15-35 °C v závislosti na vnějších podmínkách a teplotě panelů 40-50 °C. Z těchto 27 simulací jsme následně vybrali tři, ve kterých jsme dosahovali nejlepšího tepelného komfortu a pro každou vytvořili další čtyři ve kterých jsme se snažili zapojením dalších panelů nebo úpravou teplot kompenzovat jejich nedostatky (viz kapitola 7). Celkově jsme simulovali 42 scénářů.

Pro hodnocení stavu prostředí a tepelného komfortu jsme zvolili metodu ekvivalentní teploty a diagramů tepelného komfortu dle H.O. Nilssona a popsanou normou ISO ČSN EN 14505. Hlavní úlohou této práce bylo určení úspor, kterých můžeme dosáhnout při použití radiačních panelů v interiéru vozidla. U všech třech případů vnější teploty jsme vyhodnotili jako optimální variantu zapojení všech panelů řidiče s pomocí panelů na dveřích a střeše určených spolujezdci a povrchovou teplotou 40 °C. To nám umožnilo ve všech případech snížit jmenovitou teplotu vzduchu až o 10 °C. S těmito úpravami jsme dosáhli úspory na spotřebované energii 7,6 % pro případ okolní teploty -10 °C, v případě okolní teploty 0 °C úspory 11,7 % a v případě okolní teploty +10 °C úspory až 22,0 %. V případech, ze kterých tyto výsledky vycházejí, se nám však nepodařilo například dosáhnout vyrovnaných výsledků pro levé a pravé končetiny, což může být větším počtem lidí vyhodnoceno jako značný diskomfort, navíc v reálném prostředí by měly panely nižší účinnost, protože teplo by bylo odváděno i směrem do vnějšího prostředí a dveří.

Největší měrné ztráty jsme zaznamenaly skrz skla kabiny. Vyhřívací folie v čelním skle by mohla sloužit jednak k rozmrazování a vysoké teploty a objemového toku by již tedy nebylo třeba. Proud vzduchu z čelní výstky by tak svou vysokou rychlostí při rozmrazování neobtěžoval posádku, a i nižší teplota by stačila pro udržení příjemného prostředí v interiéru (viz. kapitola 8).

- [1] Why Does it Take So Long For My Car Heater To Heat Up? All about your car heater! In: *AutoRepairInstructions.com* [online]. --: --, 2012 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <http://www.autorepairinstructions.com/archives/how-a-car-heater-system-works/>
- [2] Heat-Pump Cabin Heater. In: *Nissan Global* [online]. --: --, -- [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/heat_pump_cabin_heater.html
- [3] QI, Zhaogang. Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, 38, 754-764 [cit. 2018-01-06]. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.038. ISSN 13640321. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114004900>
- [4] REICHL, Jaroslav. Peltiérův jev. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. Praha: --, 2010 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev#>
- [5] GAWLASOVÁ, Žaneta. *Moderní technologie pro úpravu tepelného prostředí automobilů s alternativními pohony*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [6] Peltier modul construction. In: *Kryotherm* [online]. --: --, 2010 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: <http://www.kryothermusa.com/indexc18c.html?tid=87>
- [7] BÄUML, T, D DVORAK, A FROHNER a D SIMIC. *Simulation and Measurement of an Energy Efficient Infrared Radiation Heating of a Full Electric Vehicle* [online]. Wien, 2016 [cit. 2018-01-06]. Dostupné z: http://pubdb.ait.ac.at/files/PubDat_AIT_135899.pdf. Vědecká práce. AIT Austrian Institute of Technology.
- [8] TROJAN, Stanislav. *Lékařská fyziologie*. Vyd. 4., přeprac. a dopl. Praha: Grada, 2003. ISBN 80-247-0512-5.
- [9] FIŠER, Jan. *Optimalizace mikroklimatu v kabinách malých dopravních letadel* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/6189>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Miroslav Jícha.
- [10] FARRINGTON, R. a RUGH, J.: Impact of Vehicle Air-Conditioning on Fuel Economy, Tailpipe Emissions, and Electric Vehicle Range. *Earth Technologies Forum*. 2000, (), 0028960-DOI: N REL/CP-540-28960. Dostupné také z: <http://www.smesfair.com/pdf/airconditioning/28960.pdf>

- [11] HRUBANOVÁ, K. *Databáze tepelných parametrů oblečení pro systém iHVAC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 77 s. Vedoucí diplomové práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.
- [12] ŠEVEČEK, J. *Testování vnitřního prostředí prostřednictvím tepelného manekýna*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.
- [13] NILSSON O. H. *Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models* [Kniha]. Gävle: University of Gävle, 2004.-Doctor thesis.
- [14] ANSI/ASHRAE Standard 55-1992. *Thermal Environment Conditions for Human Occupancy*, 1992
- [15] MARTINÍK K. *Termoregulace* [Online] profmartinik.cz.-2011-01-31.-11.3.2018.-www.profmartinik.cz/wp-content/soubory/termoregulace.pdf
- [16] *Vitalition Omrzliny: příznaky, léčba* [Online] Vitalion.cz. -2011. -18. 3. 2018. -<http://nemoci.vitalion.cz/omrzliny/>.
- [17] POKORNÝ J. *Vývoj nástroje pro predikci tepelného komfortu v kabině automobilu* [Kniha]. -Brno: Vysoké učení technické v Brně, FSI, 2011.-Sv. Pojednání k státní doktorské zkoušce
- [18] BOCHNÍČEK, O. *Skutečná energetická náročnost plug-in hybridů a elektromobilů v závislosti na místě provozu vozidla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 70 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D
- [19] PLANKA, M. *Zmapování distribuce vzduchu klimatizační jednotky v kabině osobního vozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miloš Fojtlín

Seznam použitých symbolů a zkratk

Zkratka	Popis
CFD	z angl. Computational Fluid Dynamics, počítačová výpočetní metoda pro řešení problémů kapalin
Cl ⁻	aniont Chlóru, chemický prvek
HVAC	z angl. Heating, Ventilation and Air Conditioning, zařízení pro úpravu vzduchu uvnitř budov a dopravních prostředků
K ⁺	kationt Draslíku, chemický prvek
Na ⁺	kationt Sodíku, chemický prvek

Symbol	Jednotka	Popis
a	[-]	absorptance
a,b	[W/m ²]	lineárně regresivní konstanty
F ₁₋₂	[-]	úhlový faktor mezi tělesem 1 a 2
h _{cel}	[W/m ² K]	celkový součinitel přenosu tepla
h _{virtual}	[W/m ² K]	součinitel přenosu tepla manekýna
h _{Face,Hand}	[W/m ² K]	součinitel přenosu tepla obličeje a rukou
i	[J/kgK]	entalpie
MTV _{zone}	[-]	tolerance tepelného komfortu
P _{BC}	[W]	výkon pro ohřev v základním scénáři
P _{IR}	[W]	celkový výkon radiačních panelů
q	[W/m ²]	měrný tepelný tok
q _{cal}	[W/m ²]	měrný tepelný tok kalibrace manekýna
Q	[W]	tepelný tok
Q _d	[W]	tepelná ztráta dýcháním
Q _k	[W]	tepelný ztráta kondukcí
Q _{ved}	[W]	tepelná ztráta vedením
Q _r	[W]	tepelná ztráta radiací
r	[-]	reflektivita
R _{cl}	[m ² K/W]	celkový odpor

Symbol	Jednotka	Popis
S_1	$[m^2]$	plocha tělesa 1
t	$[-]$	transmisivita
T	$[K]$	teplota černého tělesa
T_1	$[°C]$	teplota povrchu tělesa 1
T_{amb}	$[°C]$	teplota vnějšího prostředí
T_{eq}	$[°C]$	ekvivalentní teplota
T_o	$[°C]$	teplota okolí
T_s	$[°C]$	teplota povrchu
V	$[m^3/s]$	objemový tok vzduchu
ε	$[-]$	emisivita
ε_1	$[-]$	emisivita tělesa 1
ε_{ch}	$[-]$	chladící faktor
ε_r	$[-]$	topný faktor
λ_{max}	$[m]$	vlnová délka záření s max. intenzitou
ξ	$[%]$	procentuální úspora
ρ	$[kg/m^3]$	hustota
$\rho_{stř_T}$	$[kg/m^3]$	hustota dle střední teploty
σ	$[W/m^2K^4]$	Stefan-Boltzmanova konstanta

Seznam obrázků

Obrázek 1:Diagramy komfortních zón dle Nilssona [7].....	15
Obrázek 2:Schéma vedení vzduchu systémem HVAC [1].....	16
Obrázek 3:Schéma reverzibilního tepelného čerpadla Nissan Leaf [2].....	17
Obrázek 4:Ukázka konstrukce jednořadého Peltierova článku [6].....	18
Obrázek 5:Experimentální radiační panely [7]	19
Obrázek 6:Model virtuálního manekýna v kalibračním boxu	21
Obrázek 7:Tepelný manekýn [11]	21
Obrázek 8:Sjednocený model v programu Rhinoceros.....	22
Obrázek 9: Vyobrazení geometricky významných hran modelu	23
Obrázek 10:Porovnání sítě regionu s použitím Feature Edges (vlevo) a bez použití	23
Obrázek 11:Nastavení generátoru výpočetní sítě.....	24
Obrázek 12:Nastavení fyzikálního modelu.....	27
Obrázek 13: Popis umístění a pojmenování jednotlivých výustek. Výustky pro nohy jsou z části zakryty.....	28
Obrázek 14:Porovnání vlivu směřování proudu z vyústky pro nohy - 0° (obrázek vlevo) a 30° k normále plochy (obrázek vpravo)	29
Obrázek 15:Popis umístění a pojmenování jednotlivých radiačních panelů v modelu	29
Obrázek 16:Zobrazení rovin pro vykreslení řezů jednotlivých polí	30
Obrázek 17:Umístění bodů pro měření bodových hodnot	31
Obrázek 18: Teplotní pole při kalibraci manekýna	34
Obrázek 19: Měrný tepelný tok skrze okna	43

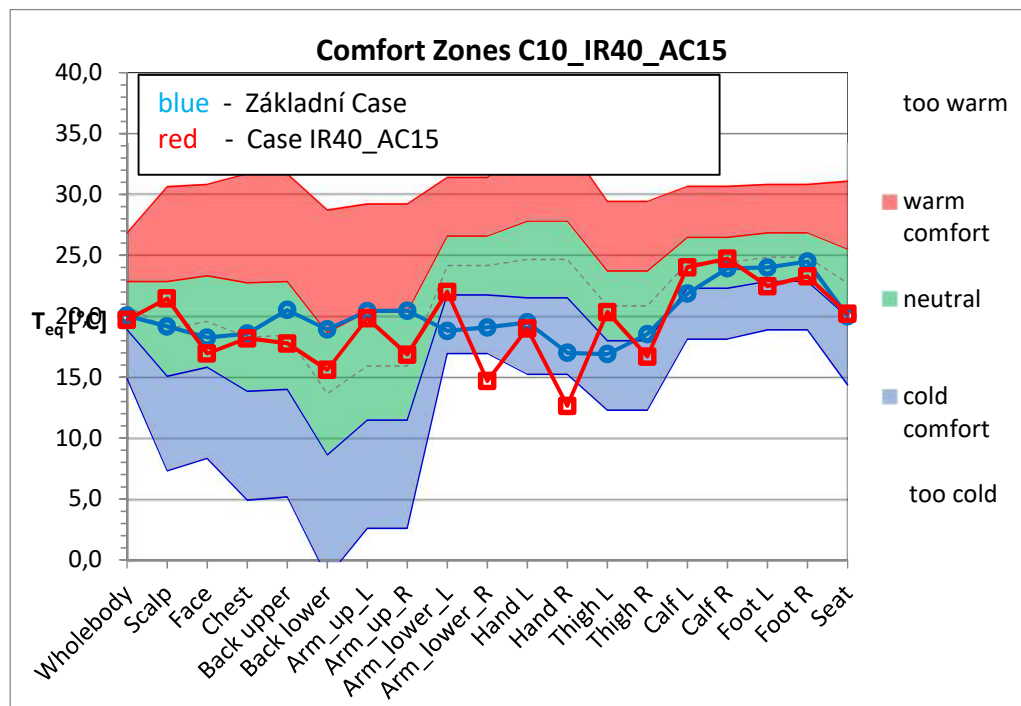
Seznam tabulek

Tabulka 1: Nastavení generování sítě	24
Tabulka 2: Nastavení regionů auta (zkratky Environ.=Environment a Temp.=Temperature) ..	25
Tabulka 3: Nastavení regionů manekýna (zkratky Temp.=Temperature Conv.=Convection) .	26
Tabulka 4: Nastavení regionů vyústek.....	28
Tabulka 5: Tabulka odporů prostupu tepla oblečením pro kalibraci manekýna	32
Tabulka 6: Porovnání výsledků kalibrace manekýna s výsledky měření dle [11].....	33
Tabulka 7: Seznam porovnávacích scénářů (označení scénáře X.Y.Z X-číslo základního scénáře, Y-teplota přiváděného vzduchu, Z-povrchová teplota panelů).....	35
Tabulka 8: Průběžné vyčíslení úspor prvních navrhovaných scénářů	37
Tabulka 9: Seznam doplňkových scénářů	37
Tabulka 10: Přípustné povrchové teploty pevných materiálů	38
Tabulka 11: Vyhodnocení úspory pro scénář C0_IR40_AC20 se zapojením panelů pasažéra	41
Tabulka 12: Vyhodnocení úspor pro scénář minC10_IR40_AC25 se zapojením panelů pasažéra	42
Tabulka 13: Vyhodnocení úspor pro scénář C10_IR40_AC15 se zapojením panelů pasažéra .	42

Seznam příloh

- 1 Tabulka nastavení simulace
- 2 Výsledné diagramy komfortních zón všech scénářů
- 3 Tabulka úspor základních scénářů

Tabulka 1.15.40: Ekvivalentní teploty

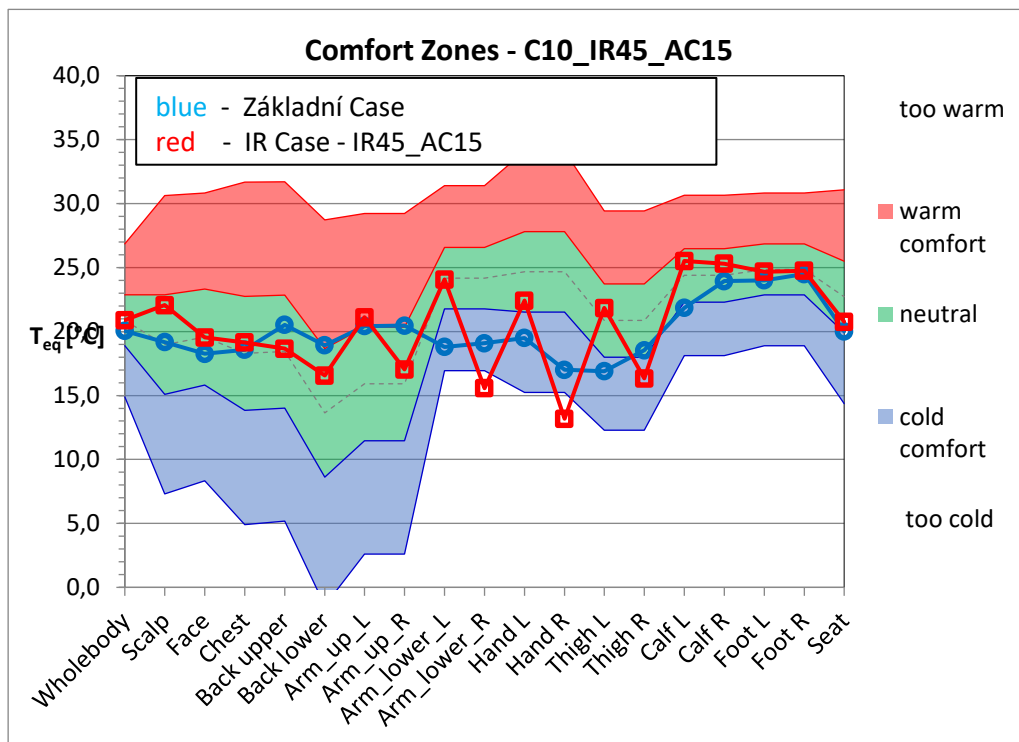


Graf 1.15.40: Case $T_{amb}=10\text{ °C}$ $T_{IR}=40\text{ °C}$ $T_{AC}=15\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	20,06
Scalp	19,18
Face	18,26
Chest	18,58
Back upper	20,52
Back lower	18,92
Arm_up_L	20,43
Arm_up_R	20,46
Arm_lower_L	18,80
Arm_lower_R	19,09
Hand L	19,51
Hand R	17,01
Thigh L	16,89
Thigh R	18,54
Calf L	21,86
Calf R	23,94
Foot L	24,01
Foot R	24,50
Seat	20,01

IR Case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	19,71
Scalp	21,47
Face	16,95
Chest	18,19
Back upper	17,78
Back lower	15,60
Arm_up_L	19,84
Arm_up_R	16,86
Arm_lower_L	22,01
Arm_lower_R	14,69
Hand L	19,00
Hand R	12,65
Thigh L	20,35
Thigh R	16,70
Calf L	24,04
Calf R	24,74
Foot L	22,48
Foot R	23,28
Seat	20,21

Tabulka 1.15.45: Ekvivalentní teploty

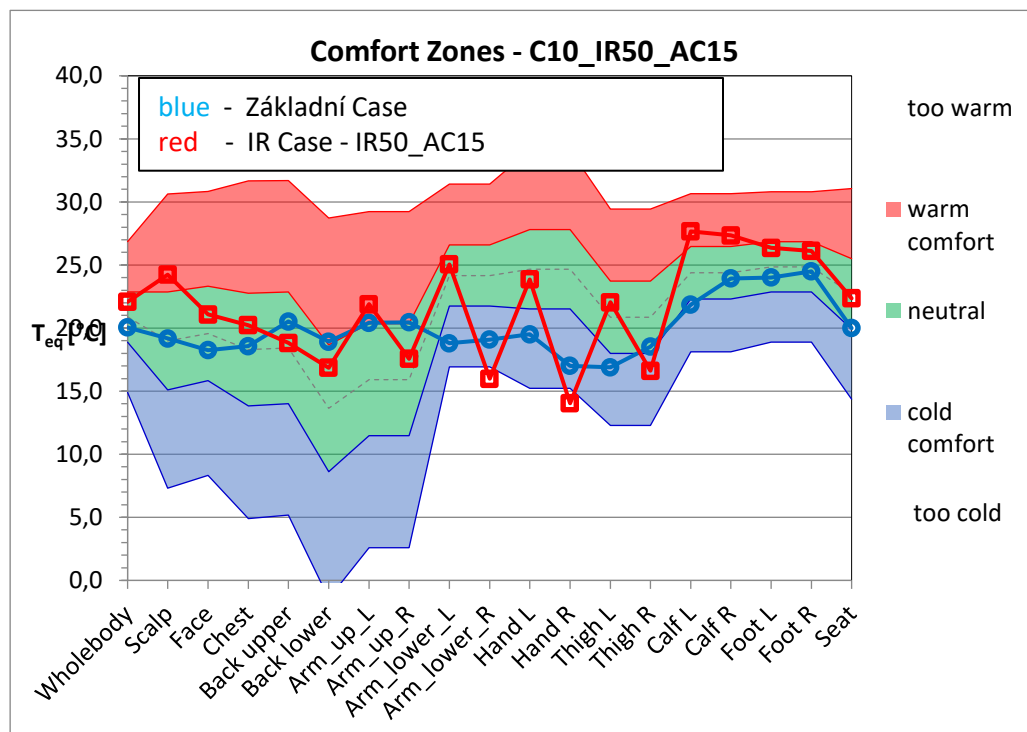


Graf 1.15.45: Case $T_{amb}=10\text{ °C}$ $T_{IR}=45\text{ °C}$ $T_{AC}=15\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	20,06
Scalp	19,18
Face	18,26
Chest	18,58
Back upper	20,52
Back lower	18,92
Arm_up_L	20,43
Arm_up_R	20,46
Arm_lower_L	18,80
Arm_lower_R	19,09
Hand L	19,51
Hand R	17,01
Thigh L	16,89
Thigh R	18,54
Calf L	21,86
Calf R	23,94
Foot L	24,01
Foot R	24,50
Seat	20,01

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	20,89
Scalp	22,06
Face	19,53
Chest	19,15
Back upper	18,67
Back lower	16,56
Arm_up_L	21,11
Arm_up_R	17,03
Arm_lower_L	24,06
Arm_lower_R	15,58
Hand L	22,41
Hand R	13,18
Thigh L	21,84
Thigh R	16,33
Calf L	25,52
Calf R	25,30
Foot L	24,68
Foot R	24,75
Seat	20,76

Tabulka 1.15.50: Ekvivalentní teploty

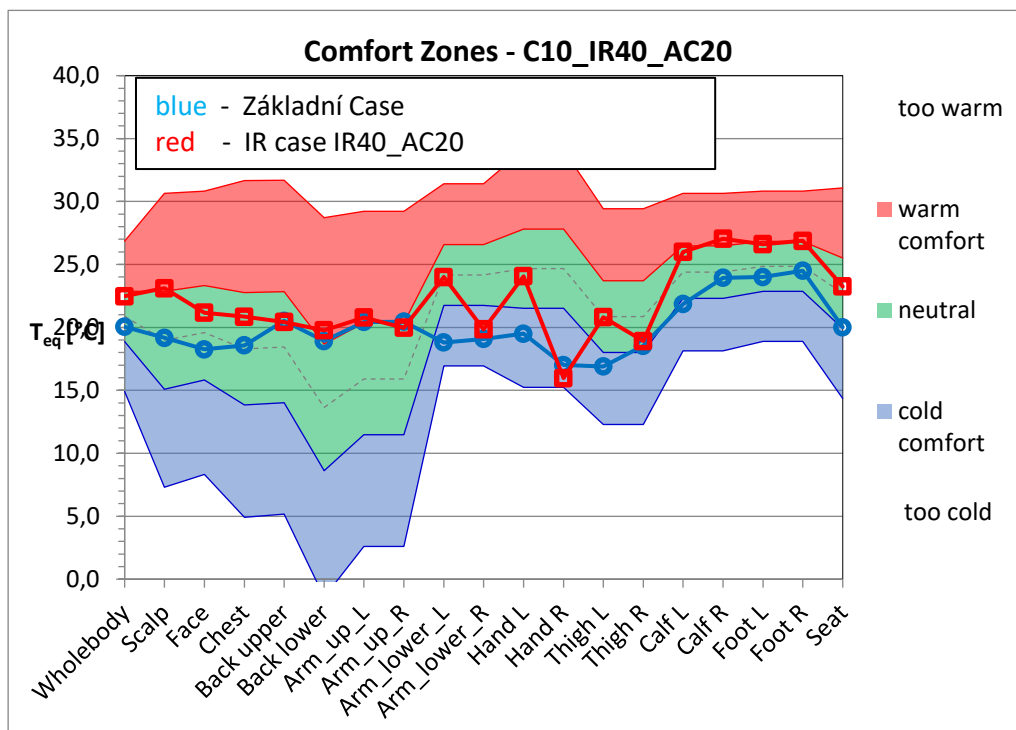


Graf 1.15.50: Case $T_{amb}=10\text{ °C}$ $T_{IR}=50\text{ °C}$ $T_{AC}=15\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	20,06
Scalp	19,18
Face	18,26
Chest	18,58
Back upper	20,52
Back lower	18,92
Arm_up_L	20,43
Arm_up_R	20,46
Arm_lower_L	18,80
Arm_lower_R	19,09
Hand L	19,51
Hand R	17,01
Thigh L	16,89
Thigh R	18,54
Calf L	21,86
Calf R	23,94
Foot L	24,01
Foot R	24,50
Seat	20,01

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	22,08
Scalp	24,24
Face	21,08
Chest	20,24
Back upper	18,82
Back lower	16,86
Arm_up_L	21,90
Arm_up_R	17,57
Arm_lower_L	25,05
Arm_lower_R	15,98
Hand L	23,86
Hand R	14,04
Thigh L	22,05
Thigh R	16,62
Calf L	27,67
Calf R	27,35
Foot L	26,36
Foot R	26,12
Seat	22,36

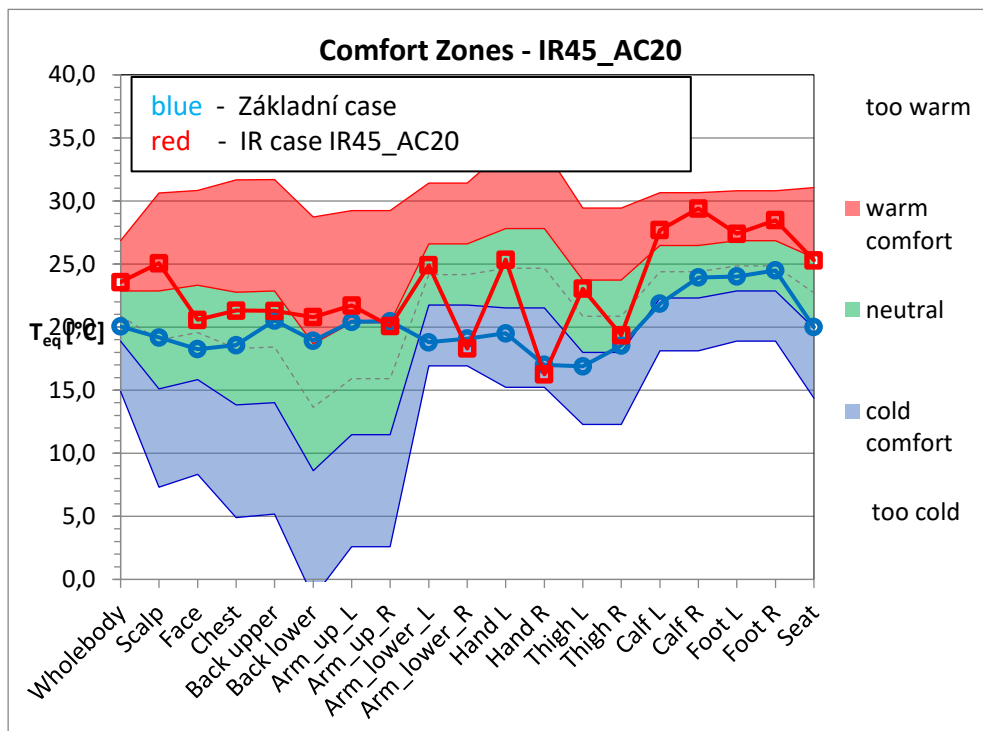
Tabulka 1.20.40: Ekvivalentní teploty



Graf 1.20.40: Case $T_{amb}=10\text{ °C}$ $T_{IR}=40\text{ °C}$ $T_{AC}=20\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	20,06
Scalp	19,18
Face	18,26
Chest	18,58
Back upper	20,52
Back lower	18,92
Arm_up_L	20,43
Arm_up_R	20,46
Arm_lower_L	18,80
Arm_lower_R	19,09
Hand L	19,51
Hand R	17,01
Thigh L	16,89
Thigh R	18,54
Calf L	21,86
Calf R	23,94
Foot L	24,01
Foot R	24,50
Seat	20,01

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	22,48
Scalp	23,11
Face	21,16
Chest	20,85
Back upper	20,44
Back lower	19,77
Arm_up_L	20,78
Arm_up_R	19,97
Arm_lower_L	24,01
Arm_lower_R	19,85
Hand L	24,07
Hand R	15,97
Thigh L	20,82
Thigh R	18,92
Calf L	26,00
Calf R	27,04
Foot L	26,61
Foot R	26,88
Seat	23,25



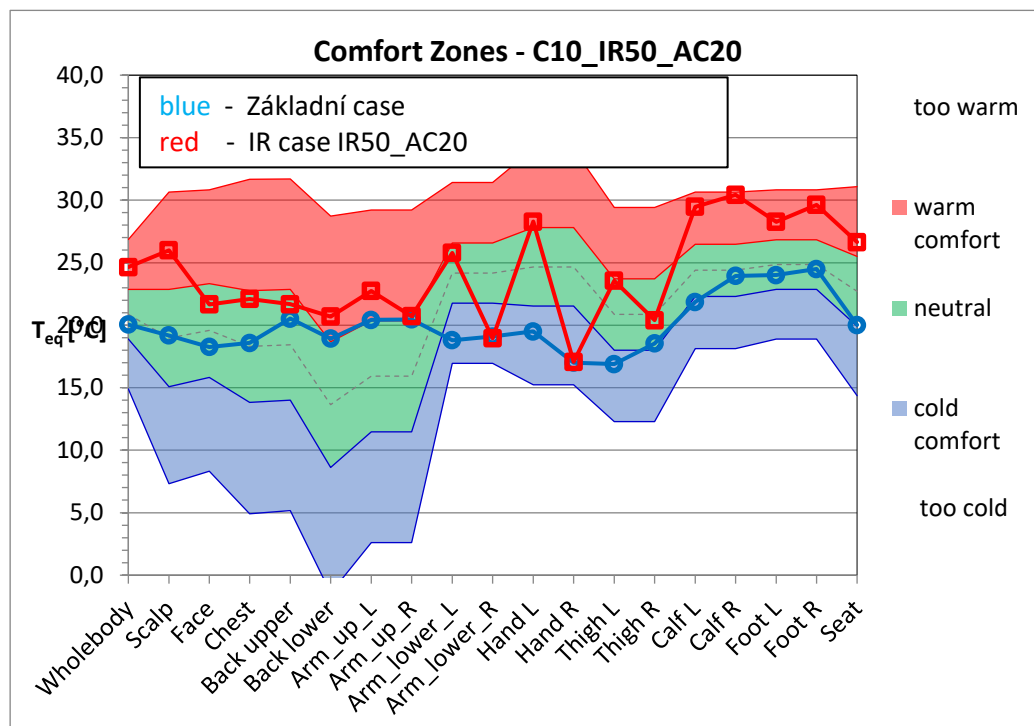
Graf 1.20.45: Case $T_{amb}=10\text{ °C}$ $T_{IR}=45\text{ °C}$ $T_{AC}=20\text{ °C}$

Tabulka 1.20.45: Ekvivalentní teploty

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	20,06
Scalp	19,18
Face	18,26
Chest	18,58
Back upper	20,52
Back lower	18,92
Arm_up_L	20,43
Arm_up_R	20,46
Arm_lower_L	18,80
Arm_lower_R	19,09
Hand L	19,51
Hand R	17,01
Thigh L	16,89
Thigh R	18,54
Calf L	21,86
Calf R	23,94
Foot L	24,01
Foot R	24,50
Seat	20,01

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	23,57
Scalp	25,07
Face	20,57
Chest	21,31
Back upper	21,28
Back lower	20,79
Arm_up_L	21,71
Arm_up_R	20,08
Arm_lower_L	24,90
Arm_lower_R	18,31
Hand L	25,34
Hand R	16,25
Thigh L	23,04
Thigh R	19,35
Calf L	27,69
Calf R	29,41
Foot L	27,39
Foot R	28,48
Seat	25,29

Tabulka 1.20.50: Ekvivalentní teploty

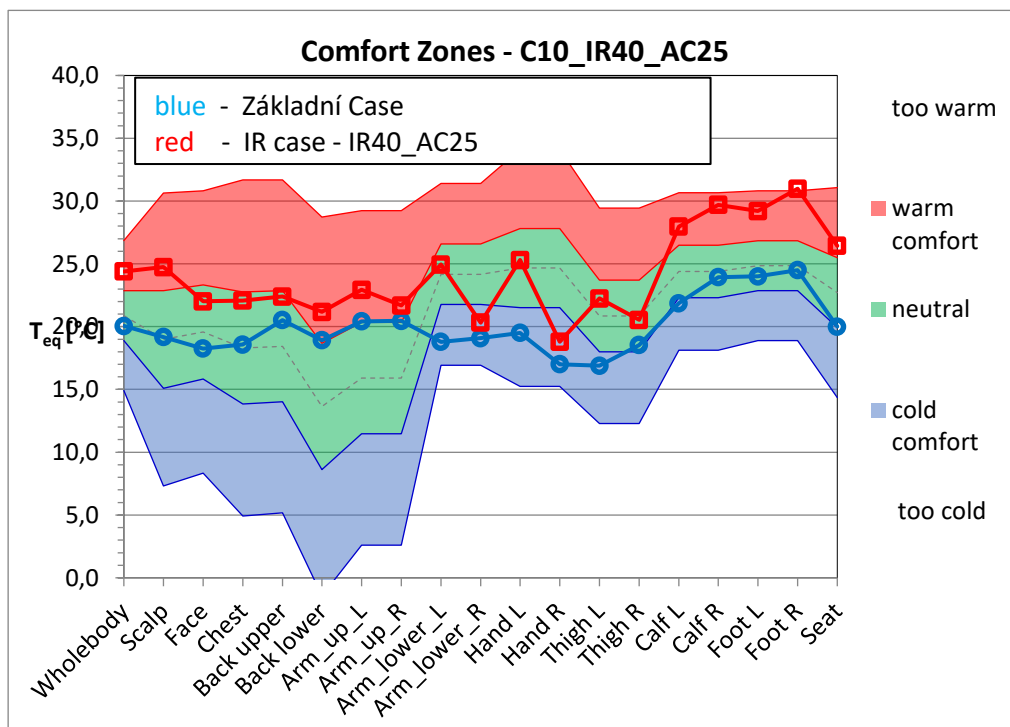


Graf1.20.50: Case $T_{amb}=10\text{ °C}$ $T_{IR}=50\text{ °C}$ $T_{AC}=20\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	20,06
Scalp	19,18
Face	18,26
Chest	18,58
Back upper	20,52
Back lower	18,92
Arm_up_L	20,43
Arm_up_R	20,46
Arm_lower_L	18,80
Arm_lower_R	19,09
Hand L	19,51
Hand R	17,01
Thigh L	16,89
Thigh R	18,54
Calf L	21,86
Calf R	23,94
Foot L	24,01
Foot R	24,50
Seat	20,01

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	24,64
Scalp	25,99
Face	21,67
Chest	22,11
Back upper	21,67
Back lower	20,69
Arm_up_L	22,74
Arm_up_R	20,71
Arm_lower_L	25,78
Arm_lower_R	18,96
Hand L	28,29
Hand R	17,07
Thigh L	23,56
Thigh R	20,40
Calf L	29,48
Calf R	30,43
Foot L	28,27
Foot R	29,63
Seat	26,65

Tabulka 1.25.40: Ekvivalentní teploty

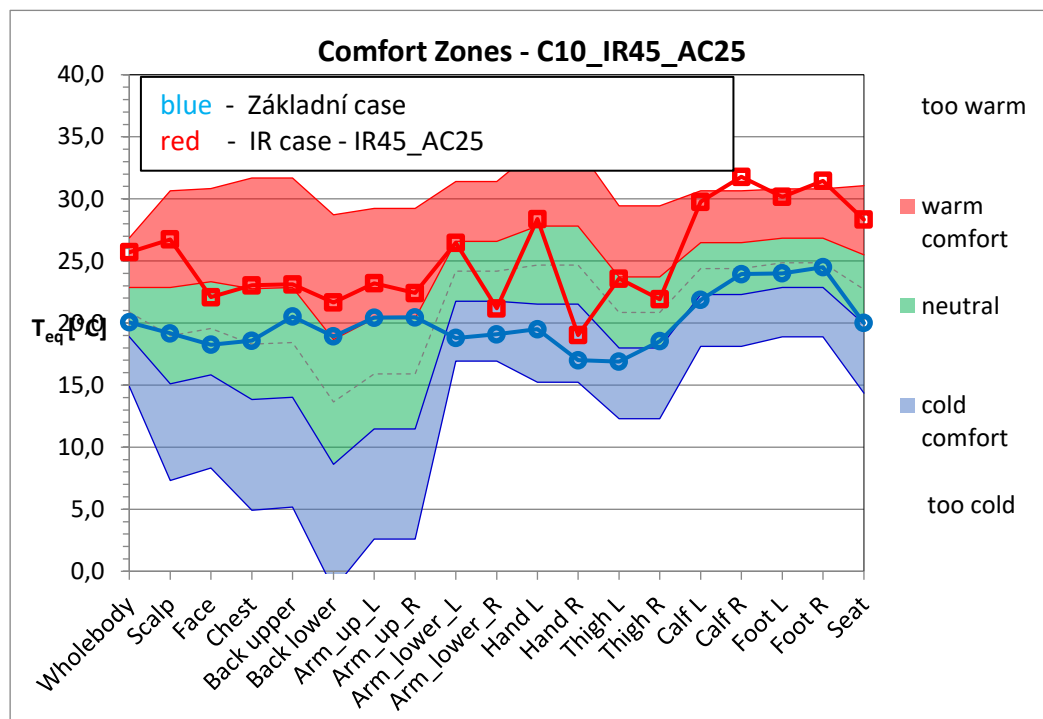


Graf 1.25.40: Case $T_{amb}=10\text{ °C}$ $T_{IR}=40\text{ °C}$ $T_{AC}=25\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	20,06
Scalp	19,18
Face	18,26
Chest	18,58
Back upper	20,52
Back lower	18,92
Arm_up_L	20,43
Arm_up_R	20,46
Arm_lower_L	18,80
Arm_lower_R	19,09
Hand L	19,51
Hand R	17,01
Thigh L	16,89
Thigh R	18,54
Calf L	21,86
Calf R	23,94
Foot L	24,01
Foot R	24,50
Seat	20,01

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	24,40
Scalp	24,74
Face	22,02
Chest	22,08
Back upper	22,40
Back lower	21,17
Arm_up_L	22,93
Arm_up_R	21,69
Arm_lower_L	24,95
Arm_lower_R	20,32
Hand L	25,30
Hand R	18,80
Thigh L	22,25
Thigh R	20,54
Calf L	27,97
Calf R	29,70
Foot L	29,21
Foot R	30,99
Seat	26,44

Tabulka 1.25.45: Ekvivalentní teploty

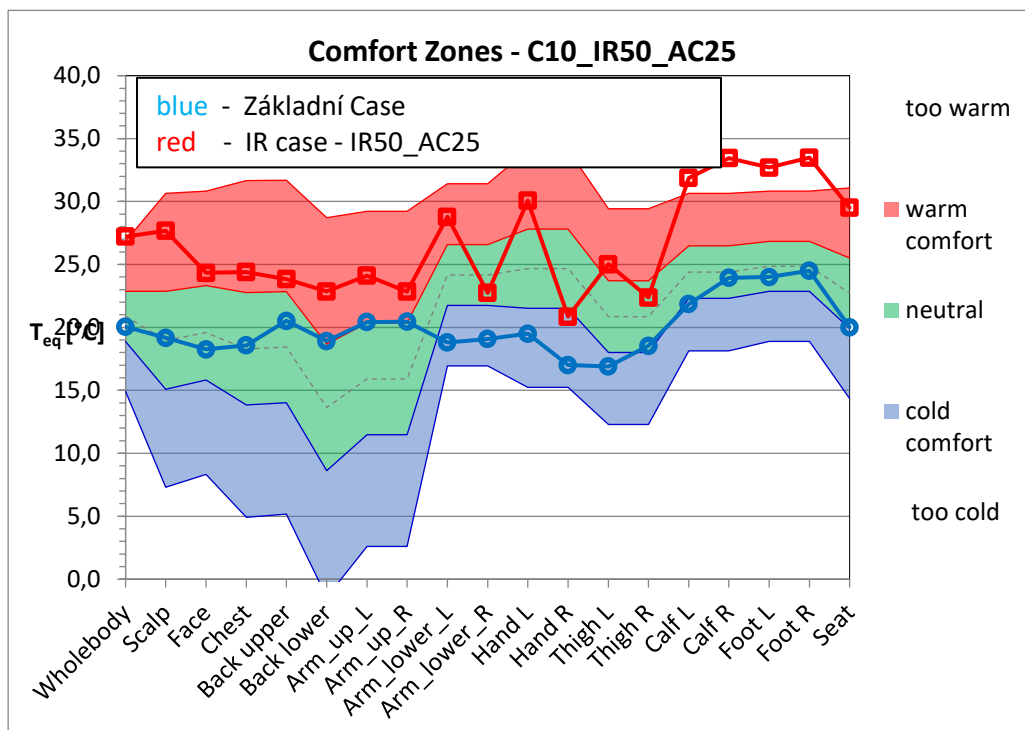


Graf 1.25.45: Case $T_{amb}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{IR}=45\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{AC}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [$^{\circ}\text{C}$]
Wholebody	20,06
Scalp	19,18
Face	18,26
Chest	18,58
Back upper	20,52
Back lower	18,92
Arm_up_L	20,43
Arm_up_R	20,46
Arm_lower_L	18,80
Arm_lower_R	19,09
Hand L	19,51
Hand R	17,01
Thigh L	16,89
Thigh R	18,54
Calf L	21,86
Calf R	23,94
Foot L	24,01
Foot R	24,50
Seat	20,01

IR Case	
Zone	T_{eq} [$^{\circ}\text{C}$]
Wholebody	25,70
Scalp	26,74
Face	22,09
Chest	23,03
Back upper	23,12
Back lower	21,66
Arm_up_L	23,21
Arm_up_R	22,42
Arm_lower_L	26,46
Arm_lower_R	21,18
Hand L	28,37
Hand R	19,03
Thigh L	23,58
Thigh R	21,92
Calf L	29,77
Calf R	31,78
Foot L	30,16
Foot R	31,45
Seat	28,33

Tabulka 1.25.50: Ekvivalentní teploty

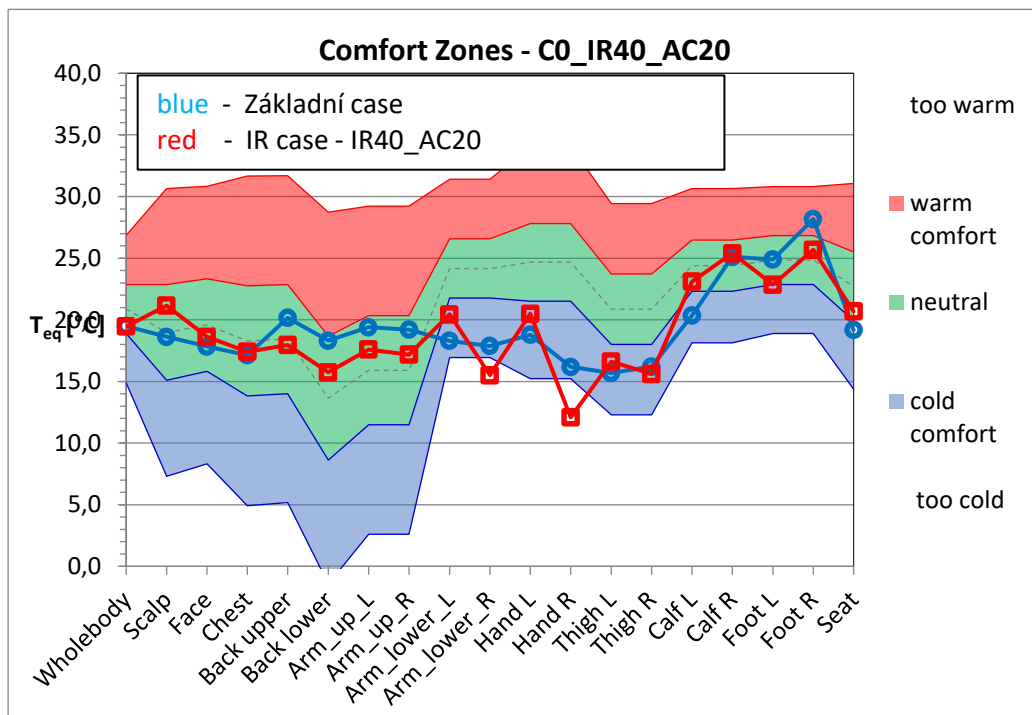


Graf 1.25.50: Case $T_{amb}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{IR}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{AC}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [$^{\circ}\text{C}$]
Wholebody	20,06
Scalp	19,18
Face	18,26
Chest	18,58
Back upper	20,52
Back lower	18,92
Arm_up_L	20,43
Arm_up_R	20,46
Arm_lower_L	18,80
Arm_lower_R	19,09
Hand L	19,51
Hand R	17,01
Thigh L	16,89
Thigh R	18,54
Calf L	21,86
Calf R	23,94
Foot L	24,01
Foot R	24,50
Seat	20,01

IR Case	
Zone	T_{eq} [$^{\circ}\text{C}$]
Wholebody	27,22
Scalp	27,68
Face	24,34
Chest	24,39
Back upper	23,84
Back lower	22,86
Arm_up_L	24,12
Arm_up_R	22,85
Arm_lower_L	28,78
Arm_lower_R	22,75
Hand L	30,06
Hand R	20,86
Thigh L	25,02
Thigh R	22,38
Calf L	31,88
Calf R	33,45
Foot L	32,70
Foot R	33,49
Seat	29,51

Tabulka 2.20.40: Ekvivalentní teploty

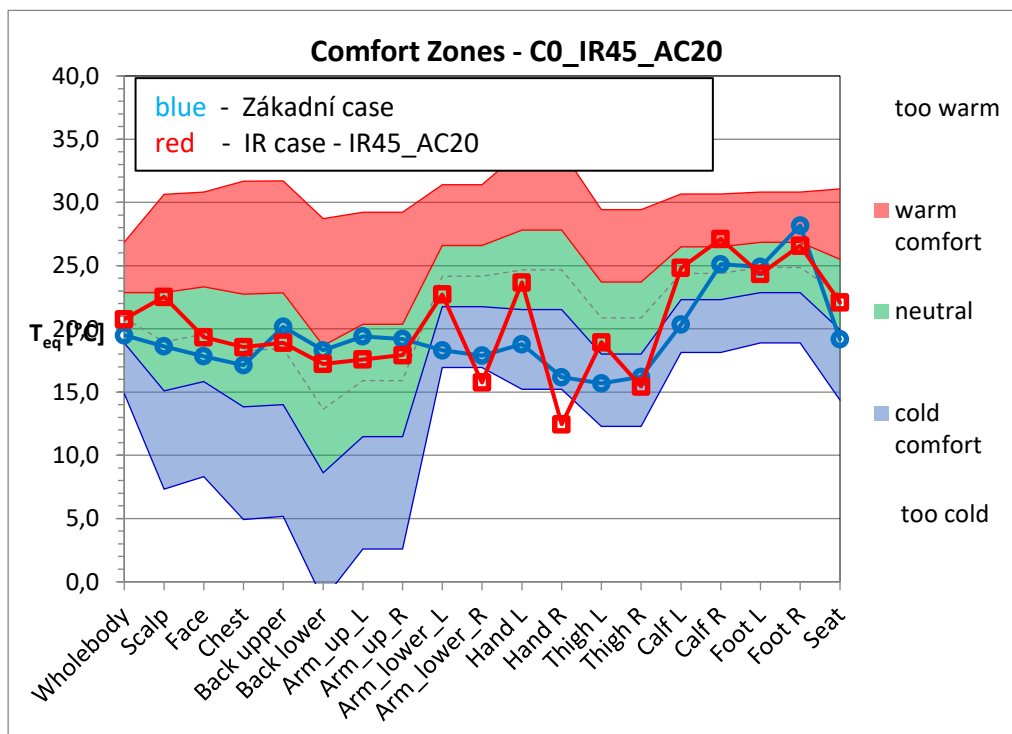


Graf2.20.40: Case $T_{amb}=0\text{ °C}$ $T_{IR}=40\text{ °C}$ $T_{AC}=20\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	19,49
Scalp	18,63
Face	17,84
Chest	17,13
Back upper	20,17
Back lower	18,30
Arm_up_L	19,40
Arm_up_R	19,20
Arm_lower_L	18,30
Arm_lower_R	17,88
Hand L	18,79
Hand R	16,18
Thigh L	15,69
Thigh R	16,21
Calf L	20,35
Calf R	25,11
Foot L	24,90
Foot R	28,18
Seat	19,18

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	19,46
Scalp	21,16
Face	18,61
Chest	17,41
Back upper	17,96
Back lower	15,74
Arm_up_L	17,60
Arm_up_R	17,18
Arm_lower_L	20,44
Arm_lower_R	15,50
Hand L	20,49
Hand R	12,09
Thigh L	16,60
Thigh R	15,61
Calf L	23,10
Calf R	25,40
Foot L	22,86
Foot R	25,68
Seat	20,68

Tabulka 2.20.45: Ekvivalentní teploty

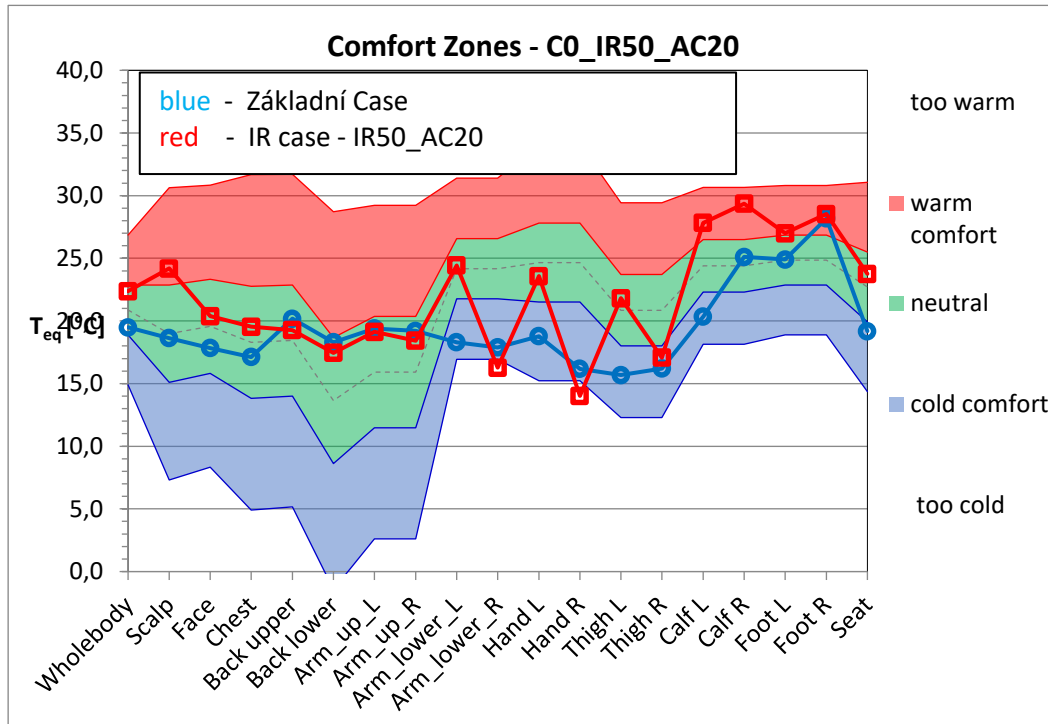


Graf2.20.45: Case $T_{amb}=0\text{ °C}$ $T_{IR}=45\text{ °C}$ $T_{AC}=20\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	19,49
Scalp	18,63
Face	17,84
Chest	17,13
Back upper	20,17
Back lower	18,30
Arm_up_L	19,40
Arm_up_R	19,20
Arm_lower_L	18,30
Arm_lower_R	17,88
Hand L	18,79
Hand R	16,18
Thigh L	15,69
Thigh R	16,21
Calf L	20,35
Calf R	25,11
Foot L	24,90
Foot R	28,18
Seat	19,18

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	20,76
Scalp	22,53
Face	19,34
Chest	18,56
Back upper	18,90
Back lower	17,22
Arm_up_L	17,59
Arm_up_R	17,93
Arm_lower_L	22,73
Arm_lower_R	15,76
Hand L	23,67
Hand R	12,46
Thigh L	18,94
Thigh R	15,45
Calf L	24,82
Calf R	27,11
Foot L	24,34
Foot R	26,58
Seat	22,09

Tabulka 2.20.50: Ekvivalentní teploty

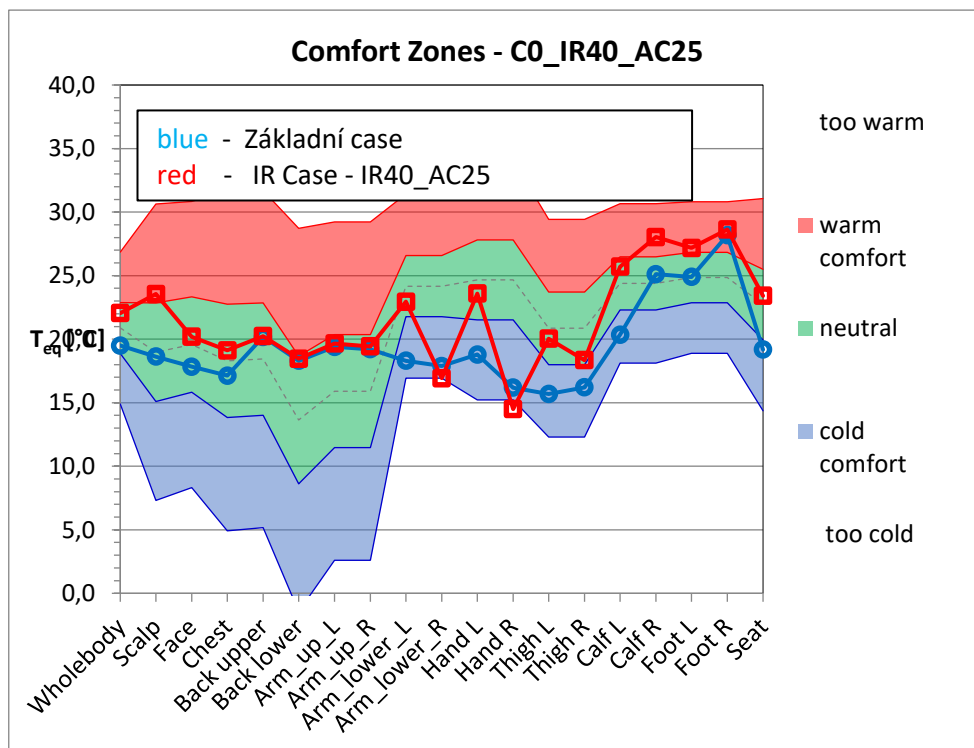


Graf2.20.50: Case $T_{amb}=0\text{ °C}$ $T_{IR}=50\text{ °C}$ $T_{AC}=20\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	19,49
Scalp	18,63
Face	17,84
Chest	17,13
Back upper	20,17
Back lower	18,30
Arm_up_L	19,40
Arm_up_R	19,20
Arm_lower_L	18,30
Arm_lower_R	17,88
Hand L	18,79
Hand R	16,18
Thigh L	15,69
Thigh R	16,21
Calf L	20,35
Calf R	25,11
Foot L	24,90
Foot R	28,18
Seat	19,18

IR Case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	22,38
Scalp	24,19
Face	20,39
Chest	19,53
Back upper	19,26
Back lower	17,46
Arm_up_L	19,13
Arm_up_R	18,43
Arm_lower_L	24,43
Arm_lower_R	16,26
Hand L	23,58
Hand R	14,02
Thigh L	21,81
Thigh R	17,08
Calf L	27,83
Calf R	29,36
Foot L	27,00
Foot R	28,53
Seat	23,75

Tabulka 2.25.40: Ekvivalentní teploty

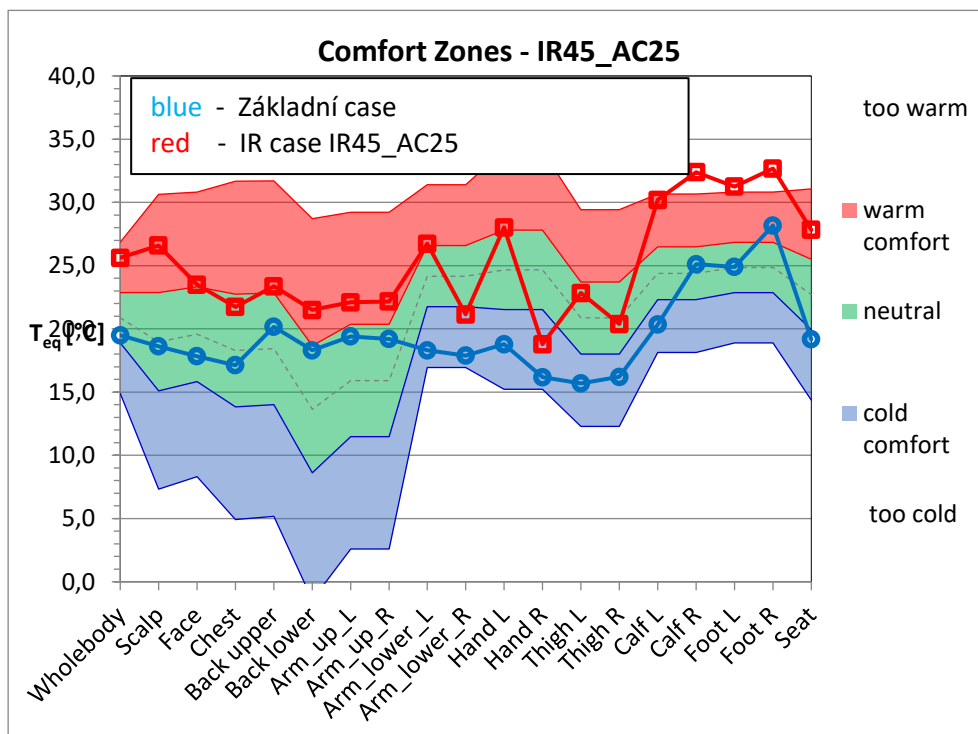


Graf2.25.40: Case $T_{amb}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{IR}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{AC}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Basic Case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	19,49
Scalp	18,63
Face	17,84
Chest	17,13
Back upper	20,17
Back lower	18,30
Arm_up_L	19,40
Arm_up_R	19,20
Arm_lower_L	18,30
Arm_lower_R	17,88
Hand L	18,79
Hand R	16,18
Thigh L	15,69
Thigh R	16,21
Calf L	20,35
Calf R	25,11
Foot L	24,90
Foot R	28,18
Seat	19,18

IR Case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	22,05
Scalp	23,56
Face	20,19
Chest	19,12
Back upper	20,24
Back lower	18,46
Arm_up_L	19,66
Arm_up_R	19,43
Arm_lower_L	22,95
Arm_lower_R	16,93
Hand L	23,59
Hand R	14,50
Thigh L	20,04
Thigh R	18,35
Calf L	25,71
Calf R	28,03
Foot L	27,18
Foot R	28,63
Seat	23,41

Tabulka 2.25.45: Ekvivalentní teploty

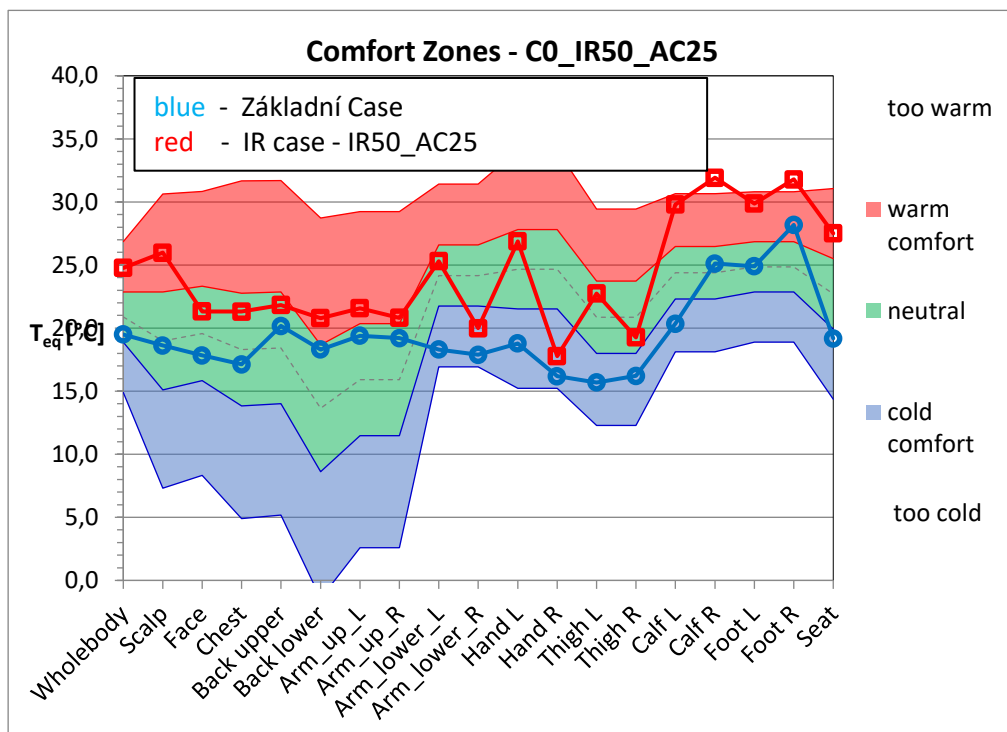


Graf 2.25.45: Case $T_{amb}=0\text{ °C}$ $T_{IR}=45\text{ °C}$ $T_{AC}=25\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	19,49
Scalp	18,63
Face	17,84
Chest	17,13
Back upper	20,17
Back lower	18,30
Arm_up_L	19,40
Arm_up_R	19,20
Arm_lower_L	18,30
Arm_lower_R	17,88
Hand L	18,79
Hand R	16,18
Thigh L	15,69
Thigh R	16,21
Calf L	20,35
Calf R	25,11
Foot L	24,90
Foot R	28,18
Seat	19,18

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	25,62
Scalp	26,59
Face	23,49
Chest	21,74
Back upper	23,37
Back lower	21,49
Arm_up_L	22,10
Arm_up_R	22,16
Arm_lower_L	26,74
Arm_lower_R	21,13
Hand L	28,02
Hand R	18,79
Thigh L	22,84
Thigh R	20,38
Calf L	30,20
Calf R	32,39
Foot L	31,25
Foot R	32,68
Seat	27,84

Tabulka 2.25.50: Ekvivalentní teploty

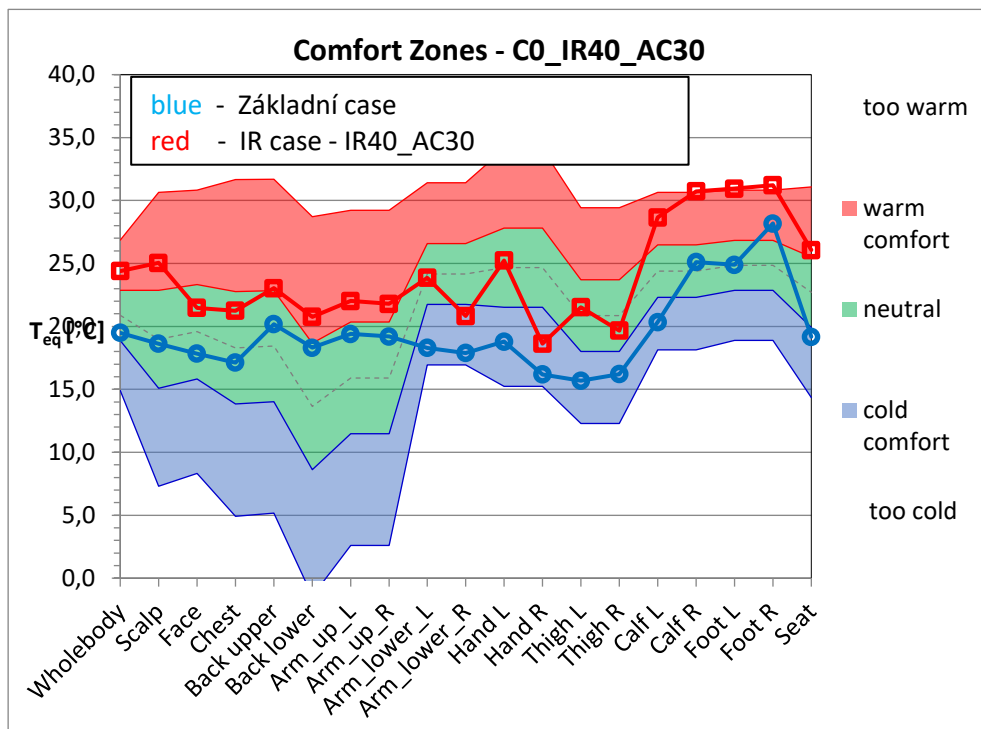


Graf2.25.50: Case $T_{amb}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{IR}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{AC}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	19,49
Scalp	18,63
Face	17,84
Chest	17,13
Back upper	20,17
Back lower	18,30
Arm_up_L	19,40
Arm_up_R	19,20
Arm_lower_L	18,30
Arm_lower_R	17,88
Hand L	18,79
Hand R	16,18
Thigh L	15,69
Thigh R	16,21
Calf L	20,35
Calf R	25,11
Foot L	24,90
Foot R	28,18
Seat	19,18

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	24,77
Scalp	25,98
Face	21,33
Chest	21,31
Back upper	21,83
Back lower	20,79
Arm_up_L	21,58
Arm_up_R	20,81
Arm_lower_L	25,31
Arm_lower_R	19,99
Hand L	26,88
Hand R	17,78
Thigh L	22,74
Thigh R	19,27
Calf L	29,79
Calf R	31,92
Foot L	29,87
Foot R	31,79
Seat	27,51

Tabulka 2.30.40: Ekvivalentní teploty

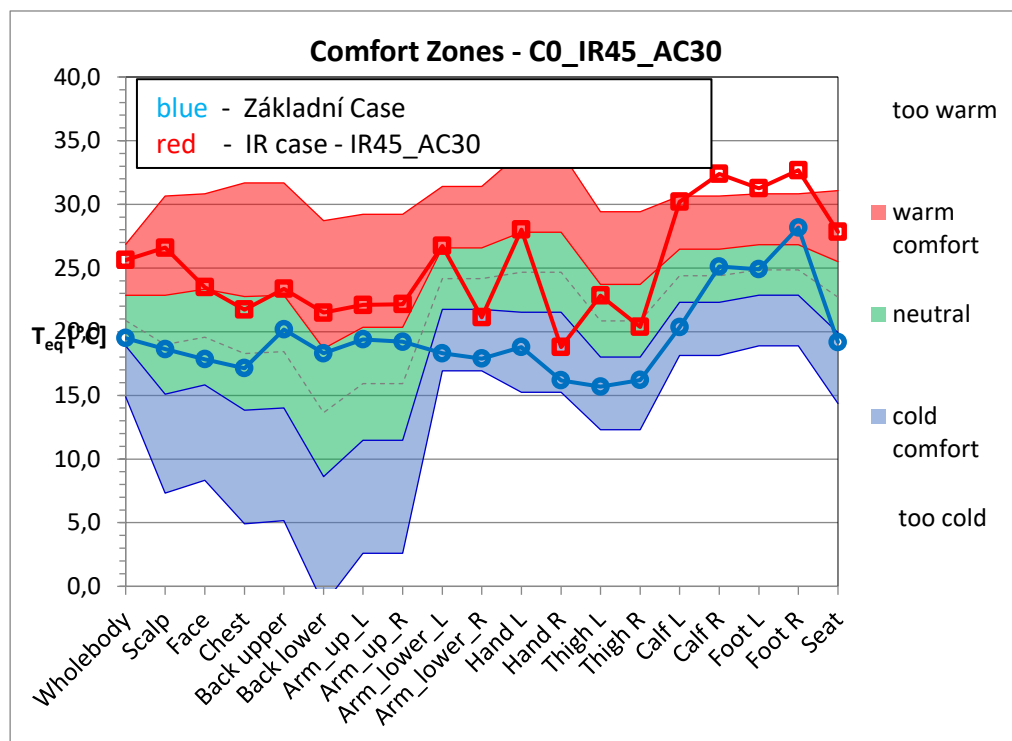


Graf2.30.40: Case $T_{amb}=0\text{ °C}$ $T_{IR}=40\text{ °C}$ $T_{AC}=30\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	19,49
Scalp	18,63
Face	17,84
Chest	17,13
Back upper	20,17
Back lower	18,30
Arm_up_L	19,40
Arm_up_R	19,20
Arm_lower_L	18,30
Arm_lower_R	17,88
Hand L	18,79
Hand R	16,18
Thigh L	15,69
Thigh R	16,21
Calf L	20,35
Calf R	25,11
Foot L	24,90
Foot R	28,18
Seat	19,18

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	24,40
Scalp	25,04
Face	21,47
Chest	21,24
Back upper	23,04
Back lower	20,77
Arm_up_L	22,02
Arm_up_R	21,79
Arm_lower_L	23,87
Arm_lower_R	20,82
Hand L	25,24
Hand R	18,63
Thigh L	21,52
Thigh R	19,67
Calf L	28,66
Calf R	30,73
Foot L	30,95
Foot R	31,21
Seat	26,07

Tabulka 2.30.45: Ekvivalentní teploty

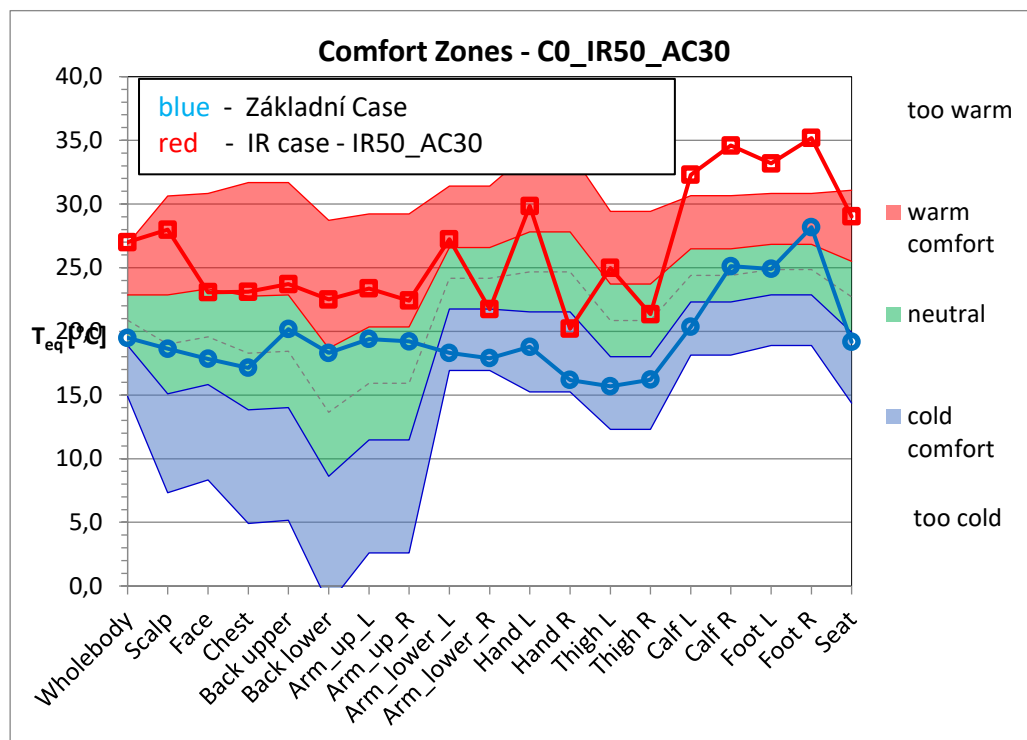


Graf 2.30.45: Case $T_{amb}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{IR}=45\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{AC}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [$^{\circ}\text{C}$]
Wholebody	19,49
Scalp	18,63
Face	17,84
Chest	17,13
Back upper	20,17
Back lower	18,30
Arm_up_L	19,40
Arm_up_R	19,20
Arm_lower_L	18,30
Arm_lower_R	17,88
Hand L	18,79
Hand R	16,18
Thigh L	15,69
Thigh R	16,21
Calf L	20,35
Calf R	25,11
Foot L	24,90
Foot R	28,18
Seat	19,18

IR Case	
Zone	T_{eq} [$^{\circ}\text{C}$]
Wholebody	25,62
Scalp	26,59
Face	23,49
Chest	21,74
Back upper	23,37
Back lower	21,49
Arm_up_L	22,10
Arm_up_R	22,16
Arm_lower_L	26,74
Arm_lower_R	21,13
Hand L	28,02
Hand R	18,79
Thigh L	22,84
Thigh R	20,38
Calf L	30,20
Calf R	32,39
Foot L	31,25
Foot R	32,68
Seat	27,84

Tabulka 2.30.50: Ekvivalentní teploty

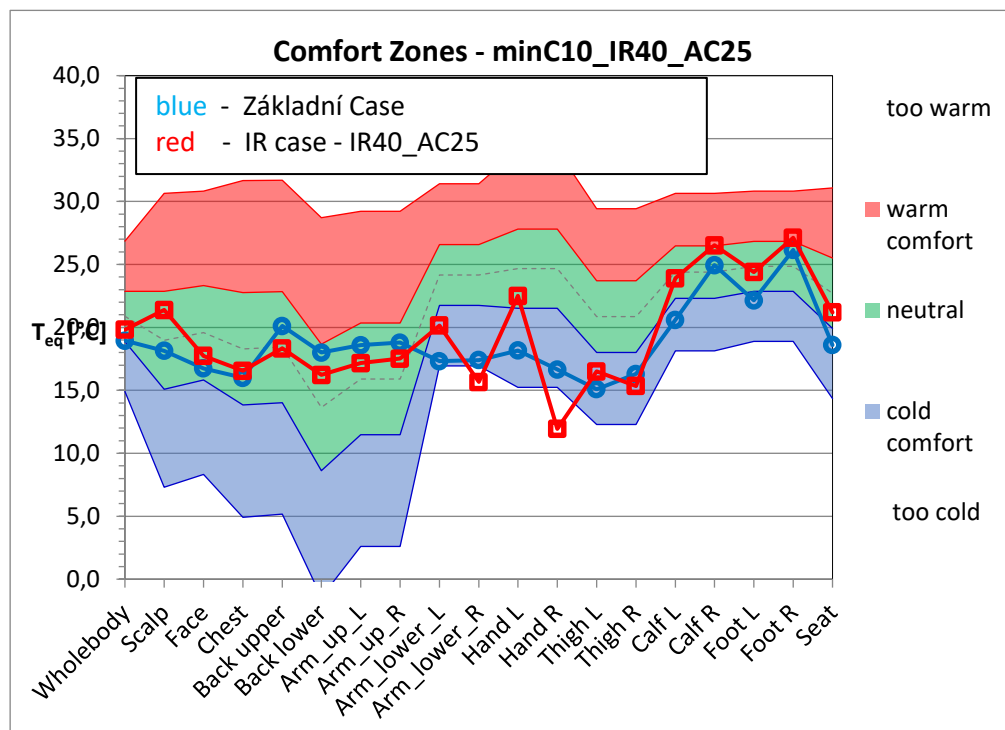


Graf 2.30.50: Case $T_{amb}=0\text{ °C}$ $T_{IR}=50\text{ °C}$ $T_{AC}=30\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	19,49
Scalp	18,63
Face	17,84
Chest	17,13
Back upper	20,17
Back lower	18,30
Arm_up_L	19,40
Arm_up_R	19,20
Arm_lower_L	18,30
Arm_lower_R	17,88
Hand L	18,79
Hand R	16,18
Thigh L	15,69
Thigh R	16,21
Calf L	20,35
Calf R	25,11
Foot L	24,90
Foot R	28,18
Seat	19,18

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	27,00
Scalp	27,98
Face	23,07
Chest	23,10
Back upper	23,71
Back lower	22,50
Arm_up_L	23,37
Arm_up_R	22,42
Arm_lower_L	27,23
Arm_lower_R	21,73
Hand L	29,84
Hand R	20,20
Thigh L	24,98
Thigh R	21,34
Calf L	32,30
Calf R	34,59
Foot L	33,19
Foot R	35,18
Seat	29,02

Tabulka 3.25.40: Ekvivalentní teploty

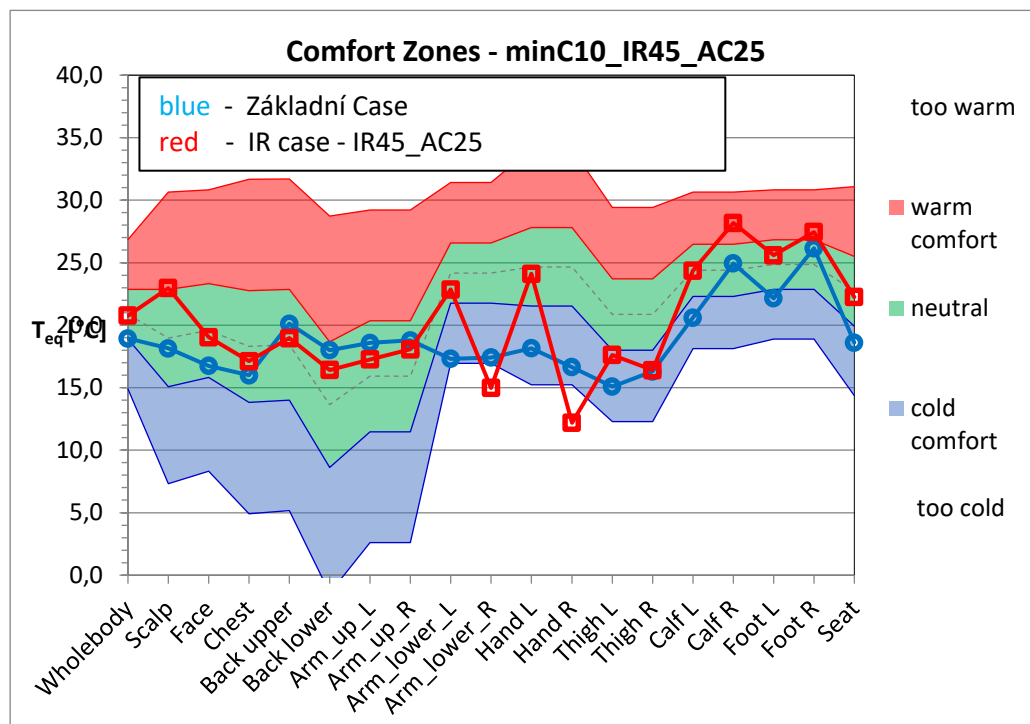


Graf3.25.40: Case $T_{amb}=-10\text{ °C}$ $T_{IR}=40\text{ °C}$ $T_{AC}=25\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	18,94
Scalp	18,14
Face	16,75
Chest	15,99
Back upper	20,12
Back lower	18,00
Arm_up_L	18,58
Arm_up_R	18,79
Arm_lower_L	17,32
Arm_lower_R	17,41
Hand L	18,16
Hand R	16,65
Thigh L	15,09
Thigh R	16,29
Calf L	20,60
Calf R	24,94
Foot L	22,15
Foot R	26,16
Seat	18,60

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	19,82
Scalp	21,38
Face	17,74
Chest	16,55
Back upper	18,33
Back lower	16,23
Arm_up_L	17,17
Arm_up_R	17,51
Arm_lower_L	20,16
Arm_lower_R	15,66
Hand L	22,51
Hand R	11,94
Thigh L	16,50
Thigh R	15,34
Calf L	23,90
Calf R	26,53
Foot L	24,40
Foot R	27,12
Seat	21,20

Tabulka 3.25.45: Ekvivalentní teploty

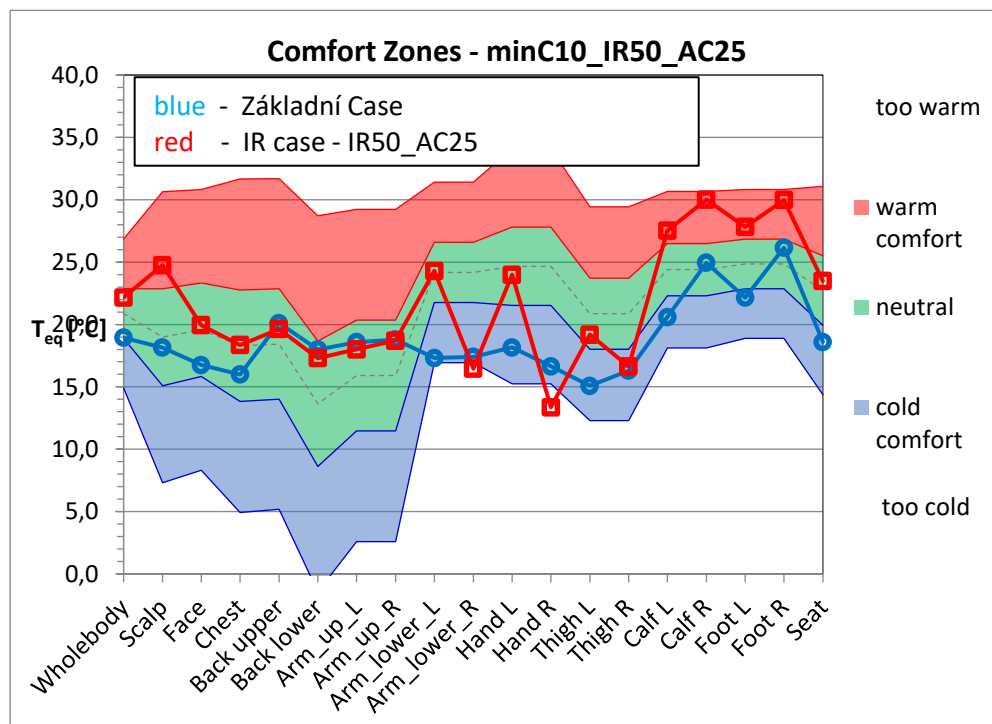


Graf3.25.45: Case $T_{amb}=-10\text{ °C}$ $T_{IR}=45\text{ °C}$ $T_{AC}=25\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	18,94
Scalp	18,14
Face	16,75
Chest	15,99
Back upper	20,12
Back lower	18,00
Arm_up_L	18,58
Arm_up_R	18,79
Arm_lower_L	17,32
Arm_lower_R	17,41
Hand L	18,16
Hand R	16,65
Thigh L	15,09
Thigh R	16,29
Calf L	20,60
Calf R	24,94
Foot L	22,15
Foot R	26,16
Seat	18,60

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	20,77
Scalp	22,97
Face	19,04
Chest	17,11
Back upper	18,96
Back lower	16,42
Arm_up_L	17,26
Arm_up_R	18,07
Arm_lower_L	22,85
Arm_lower_R	14,99
Hand L	24,12
Hand R	12,19
Thigh L	17,62
Thigh R	16,40
Calf L	24,36
Calf R	28,18
Foot L	25,60
Foot R	27,46
Seat	22,26

Tabulka 3.25.50: Ekvivalentní teploty

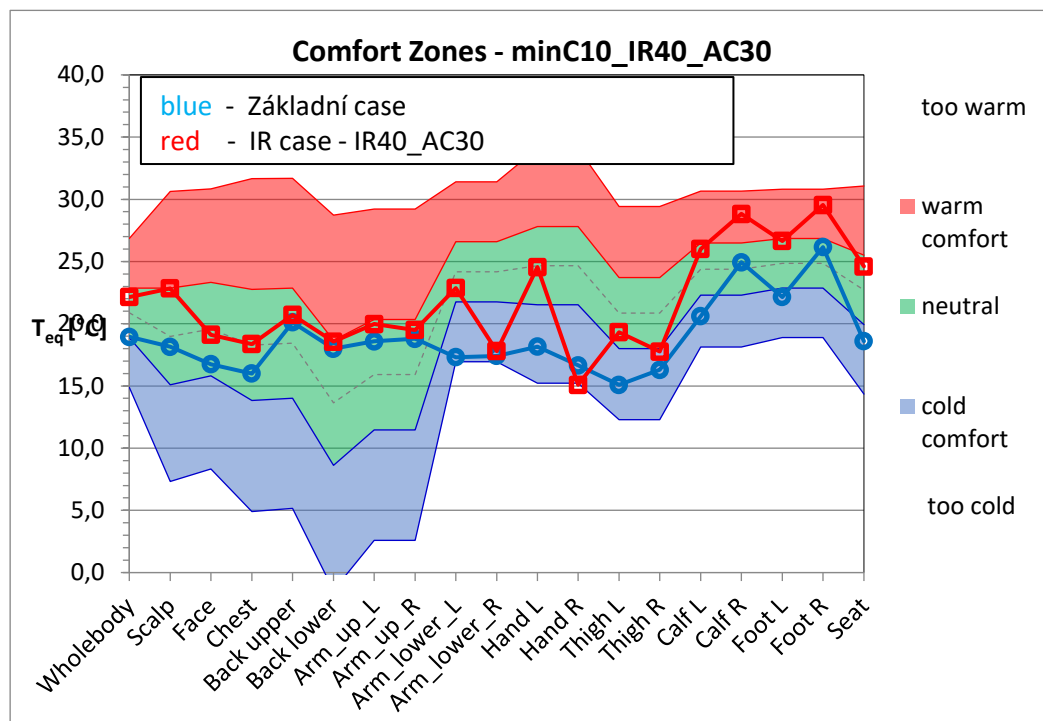


Graf 3.25.50: Case $T_{amb} = -10\text{ °C}$ $T_{IR} = 50\text{ °C}$ $T_{AC} = 25\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	18,94
Scalp	18,14
Face	16,75
Chest	15,99
Back upper	20,12
Back lower	18,00
Arm_up_L	18,58
Arm_up_R	18,79
Arm_lower_L	17,32
Arm_lower_R	17,41
Hand L	18,16
Hand R	16,65
Thigh L	15,09
Thigh R	16,29
Calf L	20,60
Calf R	24,94
Foot L	22,15
Foot R	26,16
Seat	18,60

IR Case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	22,17
Scalp	24,75
Face	19,94
Chest	18,36
Back upper	19,64
Back lower	17,31
Arm_up_L	18,01
Arm_up_R	18,70
Arm_lower_L	24,30
Arm_lower_R	16,45
Hand L	23,99
Hand R	13,37
Thigh L	19,19
Thigh R	16,63
Calf L	27,53
Calf R	30,01
Foot L	27,83
Foot R	29,98
Seat	23,48

Tabulka 3.30.40: Ekvivalentní teploty

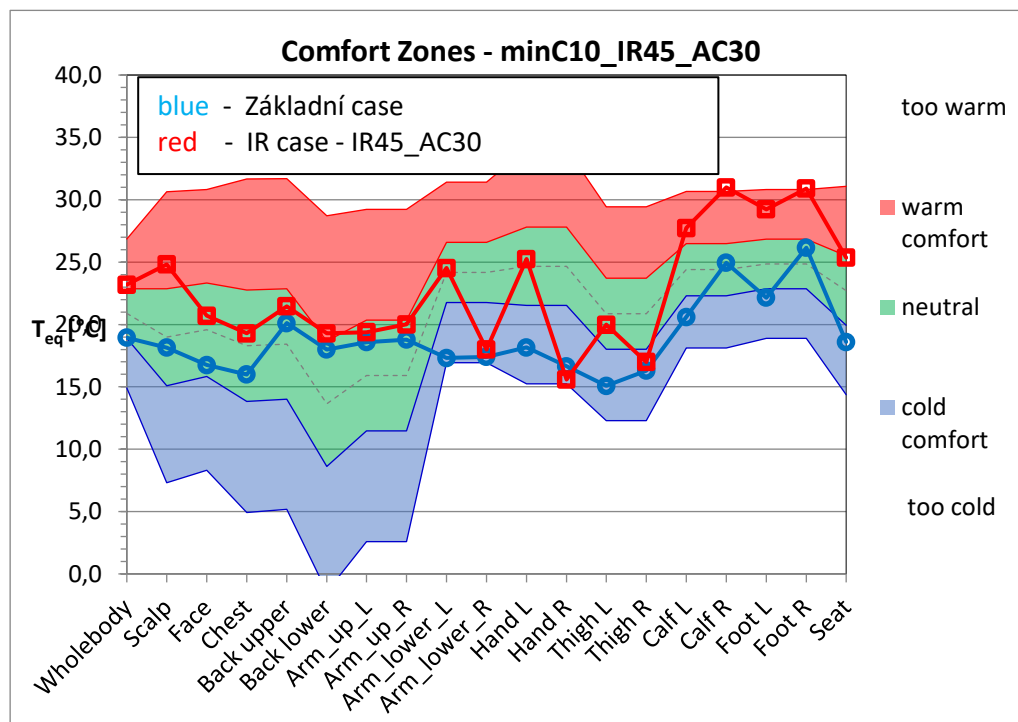


Graf3.30.40: Case $T_{amb}=-10\text{ °C}$ $T_{IR}=40\text{ °C}$ $T_{AC}=30\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	18,94
Scalp	18,14
Face	16,75
Chest	15,99
Back upper	20,12
Back lower	18,00
Arm_up_L	18,58
Arm_up_R	18,79
Arm_lower_L	17,32
Arm_lower_R	17,41
Hand L	18,16
Hand R	16,65
Thigh L	15,09
Thigh R	16,29
Calf L	20,60
Calf R	24,94
Foot L	22,15
Foot R	26,16
Seat	18,60

IR Case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	22,15
Scalp	22,84
Face	19,12
Chest	18,36
Back upper	20,71
Back lower	18,56
Arm_up_L	19,97
Arm_up_R	19,50
Arm_lower_L	22,87
Arm_lower_R	17,80
Hand L	24,56
Hand R	15,09
Thigh L	19,32
Thigh R	17,76
Calf L	26,01
Calf R	28,82
Foot L	26,65
Foot R	29,55
Seat	24,61

Tabulka 3.30.45: Ekvivalentní teploty

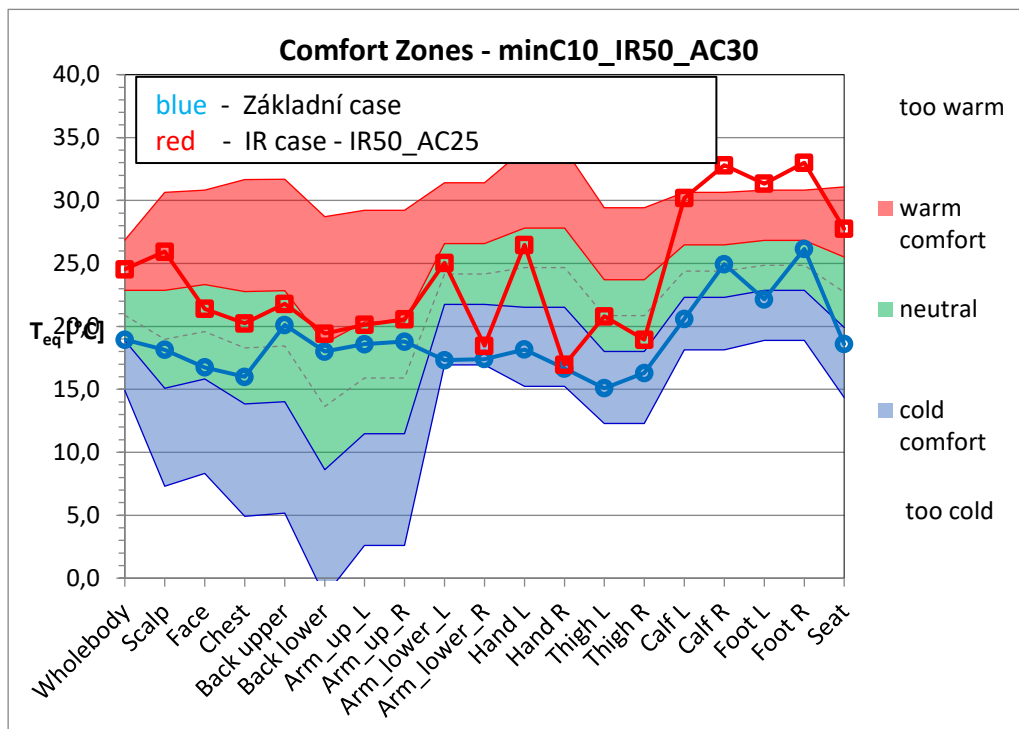


Graf3.30.45: Case $T_{amb}=-10\text{ °C}$ $T_{IR}=45\text{ °C}$ $T_{AC}=30\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	$T_{eq}[\text{°C}]$
Wholebody	18,94
Scalp	18,14
Face	16,75
Chest	15,99
Back upper	20,12
Back lower	18,00
Arm_up_L	18,58
Arm_up_R	18,79
Arm_lower_L	17,32
Arm_lower_R	17,41
Hand L	18,16
Hand R	16,65
Thigh L	15,09
Thigh R	16,29
Calf L	20,60
Calf R	24,94
Foot L	22,15
Foot R	26,16
Seat	18,60

IR Case	
Zone	$T_{eq}[\text{°C}]$
Wholebody	23,19
Scalp	24,82
Face	20,70
Chest	19,29
Back upper	21,45
Back lower	19,29
Arm_up_L	19,38
Arm_up_R	20,01
Arm_lower_L	24,52
Arm_lower_R	18,00
Hand L	25,25
Hand R	15,59
Thigh L	19,99
Thigh R	17,00
Calf L	27,73
Calf R	30,99
Foot L	29,24
Foot R	30,90
Seat	25,36

Tabulka 3.30.50: Ekvivalentní teploty

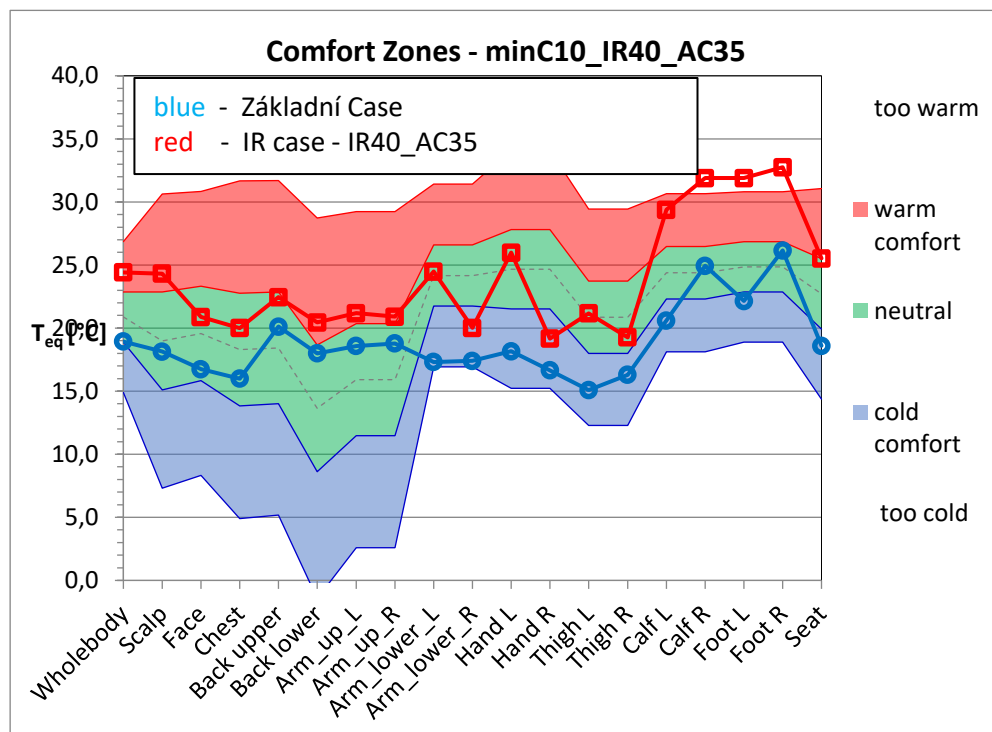


Graf3.30.50: Case $T_{amb}=-10\text{ °C}$ $T_{IR}=50\text{ °C}$ $T_{AC}=30\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	18,94
Scalp	18,14
Face	16,75
Chest	15,99
Back upper	20,12
Back lower	18,00
Arm_up_L	18,58
Arm_up_R	18,79
Arm_lower_L	17,32
Arm_lower_R	17,41
Hand L	18,16
Hand R	16,65
Thigh L	15,09
Thigh R	16,29
Calf L	20,60
Calf R	24,94
Foot L	22,15
Foot R	26,16
Seat	18,60

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	24,54
Scalp	25,94
Face	21,40
Chest	20,24
Back upper	21,79
Back lower	19,42
Arm_up_L	20,13
Arm_up_R	20,56
Arm_lower_L	25,05
Arm_lower_R	18,46
Hand L	26,47
Hand R	16,94
Thigh L	20,80
Thigh R	18,94
Calf L	30,20
Calf R	32,80
Foot L	31,34
Foot R	33,01
Seat	27,76

Tabulka 3.35.40: Ekvivalentní teploty

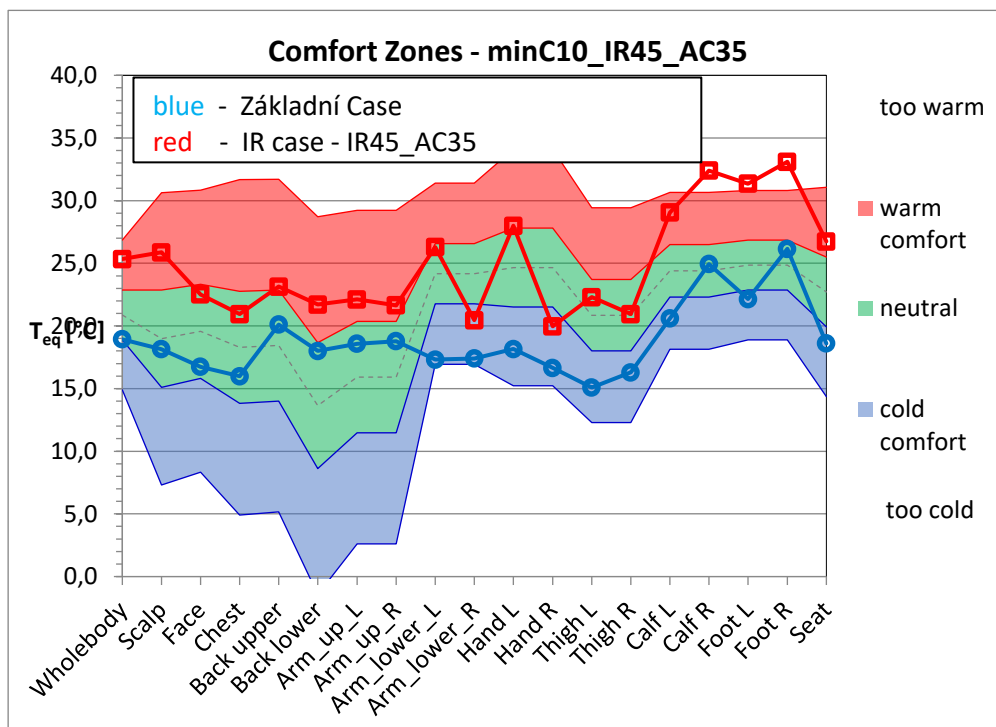


Graf 3.35.40: Case $T_{amb} = -10 \text{ °C}$ $T_{IR} = 40 \text{ °C}$ $T_{AC} = 35 \text{ °C}$

Basic Case	
Zone	$T_{eq} \text{ [°C]}$
Wholebody	18,94
Scalp	18,14
Face	16,75
Chest	15,99
Back upper	20,12
Back lower	18,00
Arm_up_L	18,58
Arm_up_R	18,79
Arm_lower_L	17,32
Arm_lower_R	17,41
Hand L	18,16
Hand R	16,65
Thigh L	15,09
Thigh R	16,29
Calf L	20,60
Calf R	24,94
Foot L	22,15
Foot R	26,16
Seat	18,60

IR Case	
Zone	$T_{eq} \text{ [°C]}$
Wholebody	24,42
Scalp	24,32
Face	20,88
Chest	20,00
Back upper	22,45
Back lower	20,45
Arm_up_L	21,18
Arm_up_R	20,90
Arm_lower_L	24,49
Arm_lower_R	20,02
Hand L	25,98
Hand R	19,16
Thigh L	21,17
Thigh R	19,27
Calf L	29,37
Calf R	31,89
Foot L	31,88
Foot R	32,75
Seat	25,53

Tabulka 3.35.45: Ekvivalentní teploty

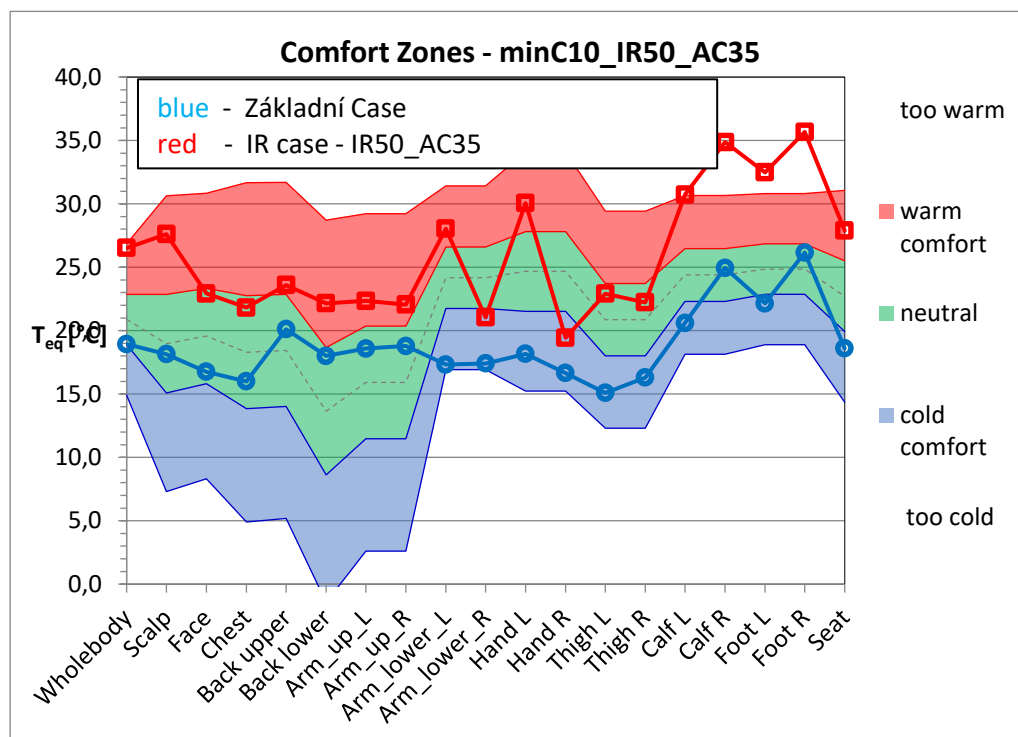


Graf 3.35.45: Case $T_{amb} = -10\text{ °C}$ $T_{IR} = 45\text{ °C}$ $T_{AC} = 35\text{ °C}$

Basic Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	18,94
Scalp	18,14
Face	16,75
Chest	15,99
Back upper	20,12
Back lower	18,00
Arm_up_L	18,58
Arm_up_R	18,79
Arm_lower_L	17,32
Arm_lower_R	17,41
Hand L	18,16
Hand R	16,65
Thigh L	15,09
Thigh R	16,29
Calf L	20,60
Calf R	24,94
Foot L	22,15
Foot R	26,16
Seat	18,60

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	25,34
Scalp	25,88
Face	22,52
Chest	20,94
Back upper	23,14
Back lower	21,71
Arm_up_L	22,12
Arm_up_R	21,64
Arm_lower_L	26,30
Arm_lower_R	20,45
Hand L	27,99
Hand R	19,97
Thigh L	22,30
Thigh R	20,94
Calf L	29,05
Calf R	32,40
Foot L	31,36
Foot R	33,10
Seat	26,75

Tabulka 3.35.50: Ekvivalentní teploty

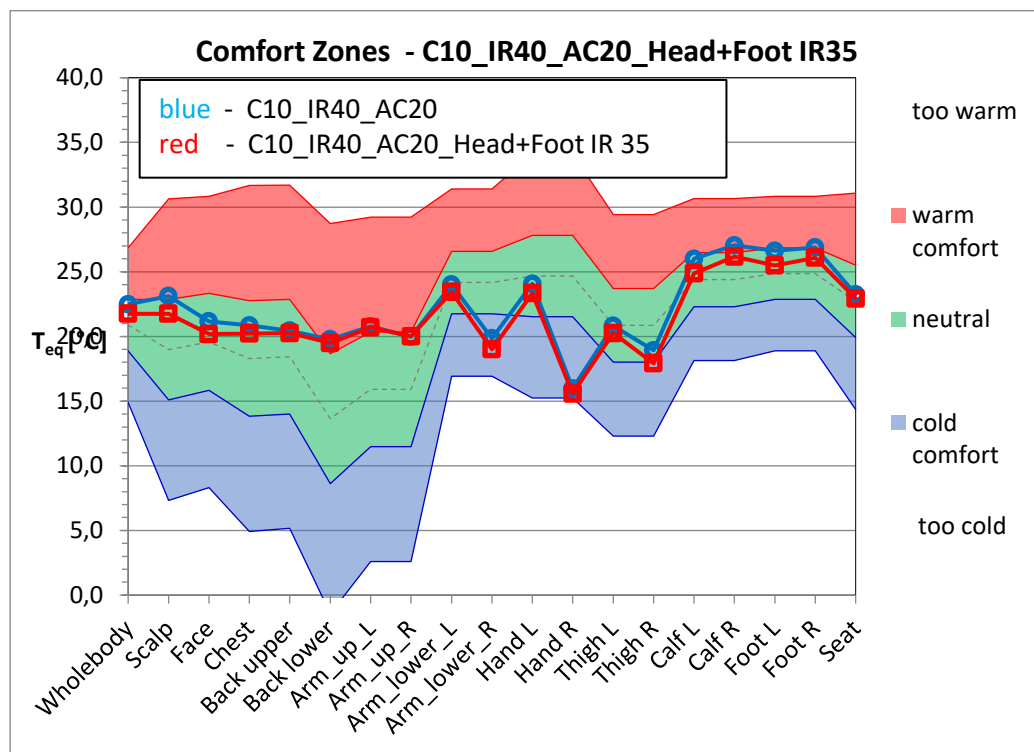


Graf 3.35.50: Case $T_{amb} = -10\text{ °C}$ $T_{IR} = 50\text{ °C}$ $T_{AC} = 35\text{ °C}$

Základní Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	18,94
Scalp	18,14
Face	16,75
Chest	15,99
Back upper	20,12
Back lower	18,00
Arm_up_L	18,58
Arm_up_R	18,79
Arm_lower_L	17,32
Arm_lower_R	17,41
Hand L	18,16
Hand R	16,65
Thigh L	15,09
Thigh R	16,29
Calf L	20,60
Calf R	24,94
Foot L	22,15
Foot R	26,16
Seat	18,60

IR Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	26,52
Scalp	27,61
Face	22,93
Chest	21,81
Back upper	23,60
Back lower	22,16
Arm_up_L	22,35
Arm_up_R	22,06
Arm_lower_L	28,04
Arm_lower_R	21,05
Hand L	30,05
Hand R	19,43
Thigh L	22,91
Thigh R	22,23
Calf L	30,73
Calf R	34,87
Foot L	32,49
Foot R	35,67
Seat	27,89

Tabulka 4.20.40-1: Ekvivalentní teploty

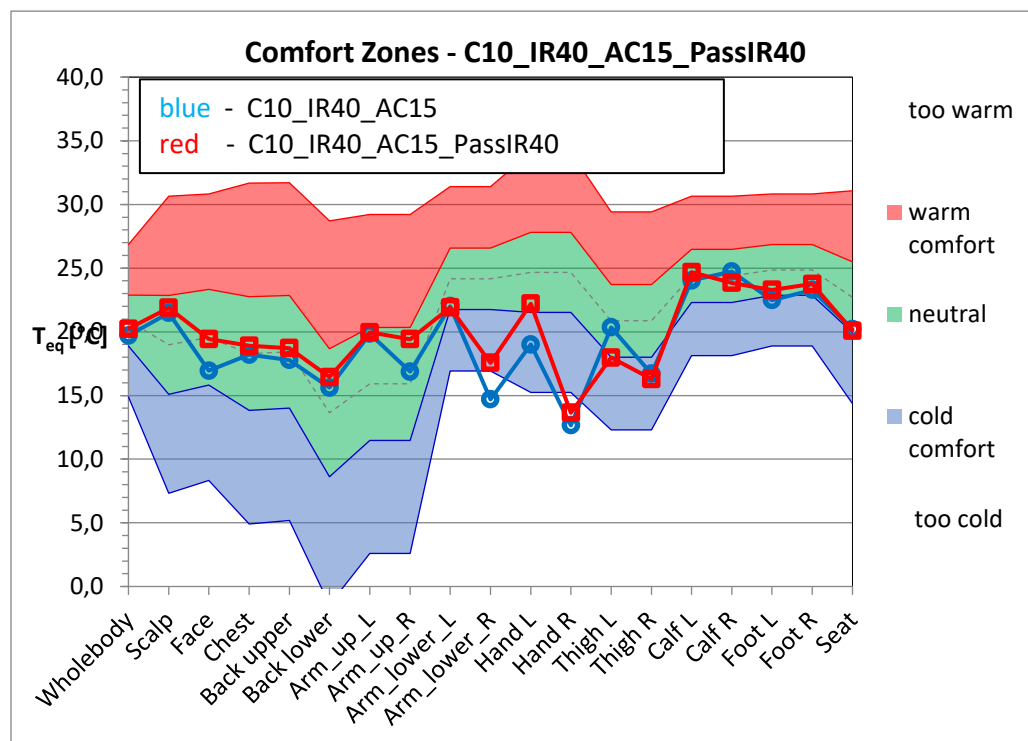


Graf4.20.40-1: Case $T_{amb}=10\text{ °C}$ $T_{IR}=40\text{ °C}$ $T_{AC}=20\text{ °C}$, teplota panelů nohou a střechy $T=35\text{ °C}$

C10_IR40_AC20	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	22,48
Scalp	23,11
Face	21,16
Chest	20,85
Back upper	20,44
Back lower	19,77
Arm_up_L	20,78
Arm_up_R	19,97
Arm_lower_L	24,01
Arm_lower_R	19,85
Hand L	24,07
Hand R	15,97
Thigh L	20,82
Thigh R	18,92
Calf L	26,00
Calf R	27,04
Foot L	26,61
Foot R	26,88
Seat	23,25

Enhanced Case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	21,76
Scalp	21,76
Face	20,18
Chest	20,23
Back upper	20,26
Back lower	19,49
Arm_up_L	20,69
Arm_up_R	20,01
Arm_lower_L	23,44
Arm_lower_R	19,01
Hand L	23,34
Hand R	15,58
Thigh L	20,26
Thigh R	17,92
Calf L	24,87
Calf R	26,17
Foot L	25,50
Foot R	26,09
Seat	22,93

Tabulka 4.15.40-2: Ekvivalentní teploty

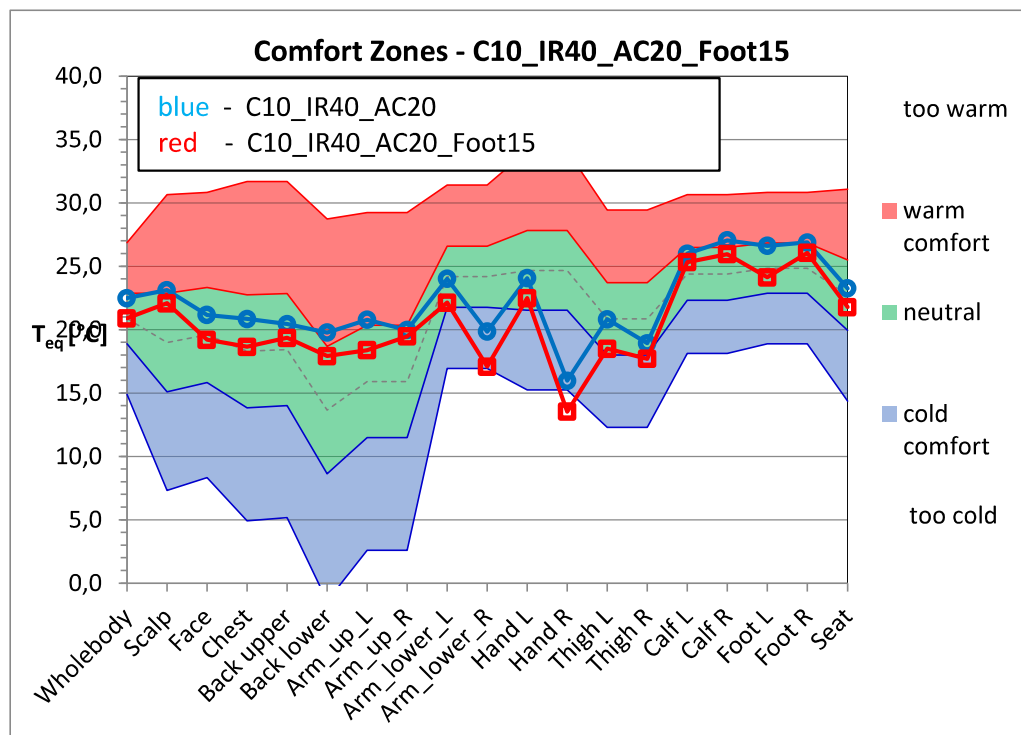


Graf 4.15.40-2: Case $T_{amb}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{IR}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{AC}=15\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota panelů dveří a střežy pasažéra $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

C10_IR40_AC15	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	19,71
Scalp	21,47
Face	16,95
Chest	18,19
Back upper	17,78
Back lower	15,60
Arm_up_L	19,84
Arm_up_R	16,86
Arm_lower_L	22,01
Arm_lower_R	14,69
Hand L	19,00
Hand R	12,65
Thigh L	20,35
Thigh R	16,70
Calf L	24,04
Calf R	24,74
Foot L	22,48
Foot R	23,28
Seat	20,21

Enhanced Case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	20,23
Scalp	21,88
Face	19,43
Chest	18,90
Back upper	18,72
Back lower	16,44
Arm_up_L	19,96
Arm_up_R	19,41
Arm_lower_L	21,90
Arm_lower_R	17,56
Hand L	22,21
Hand R	13,64
Thigh L	17,97
Thigh R	16,29
Calf L	24,69
Calf R	23,84
Foot L	23,29
Foot R	23,76
Seat	20,08

Tabulka 4.20.40-3: Ekvivalentní teploty

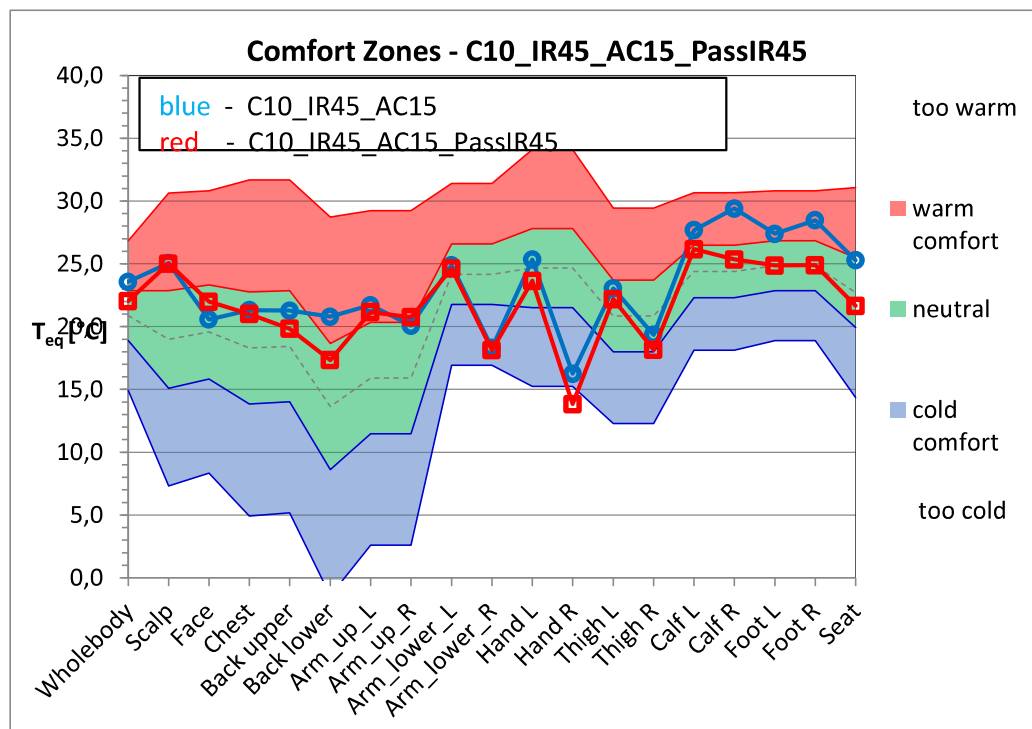


Graf 4.20.40-3: Case $T_{amb}=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{IR}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{Ac}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota vzduchu z výustky nižší o 5 °C k základnímu scénáři

C10_IR40_AC20	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	22,48
Scalp	23,11
Face	21,16
Chest	20,85
Back upper	20,44
Back lower	19,77
Arm_up_L	20,78
Arm_up_R	19,97
Arm_lower_L	24,01
Arm_lower_R	19,85
Hand L	24,07
Hand R	15,97
Thigh L	20,82
Thigh R	18,92
Calf L	26,00
Calf R	27,04
Foot L	26,61
Foot R	26,88
Seat	23,25

Enhanced case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	20,89
Scalp	22,08
Face	19,20
Chest	18,65
Back upper	19,36
Back lower	17,91
Arm_up_L	18,38
Arm_up_R	19,46
Arm_lower_L	22,13
Arm_lower_R	17,08
Hand L	22,48
Hand R	13,53
Thigh L	18,50
Thigh R	17,69
Calf L	25,33
Calf R	25,96
Foot L	24,13
Foot R	26,05
Seat	21,78

Tabulka 4.15.45-4: Ekvivalentní teploty

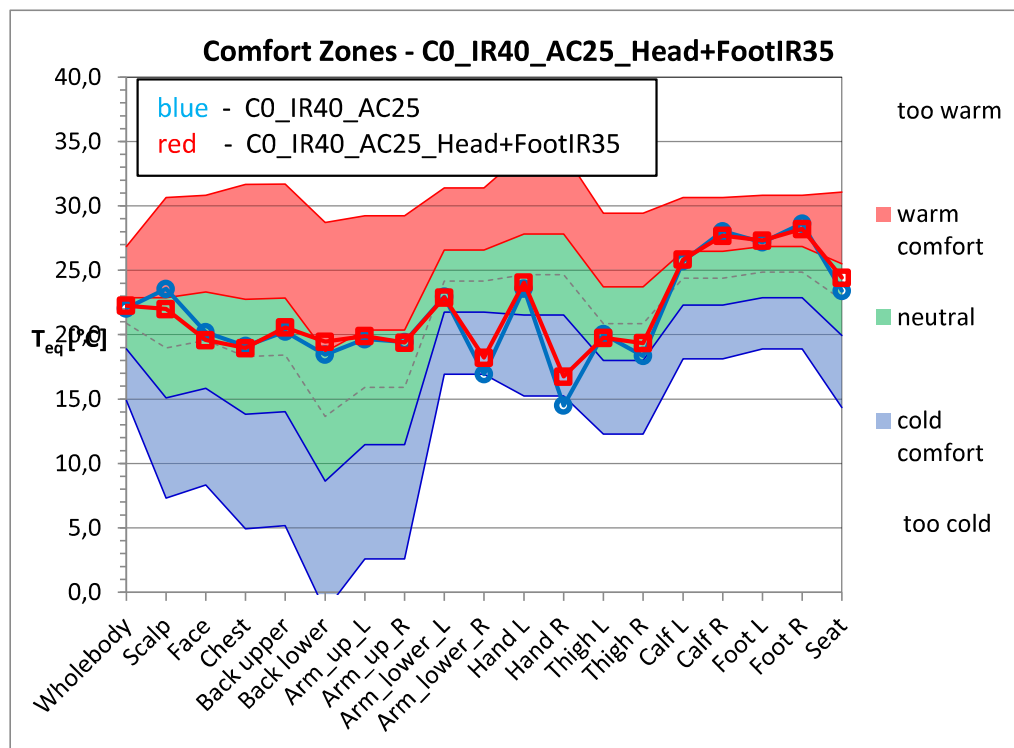


Graf 4.15.45-4: Case $T_{amb}=10\text{ °C}$ $T_{IR}=45\text{ °C}$ $T_{Ac}=15\text{ °C}$, teplota panelů dveří a střechy $T=45\text{ °C}$

C10_IR45_AC15	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	23,57
Scalp	25,07
Face	20,57
Chest	21,31
Back upper	21,28
Back lower	20,79
Arm_up_L	21,71
Arm_up_R	20,08
Arm_lower_L	24,90
Arm_lower_R	18,31
Hand L	25,34
Hand R	16,25
Thigh L	23,04
Thigh R	19,35
Calf L	27,69
Calf R	29,41
Foot L	27,39
Foot R	28,48
Seat	25,29

Enhanced case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	22,04
Scalp	25,03
Face	21,99
Chest	21,01
Back upper	19,84
Back lower	17,34
Arm_up_L	21,16
Arm_up_R	20,76
Arm_lower_L	24,63
Arm_lower_R	18,13
Hand L	23,64
Hand R	13,84
Thigh L	22,19
Thigh R	18,16
Calf L	26,17
Calf R	25,36
Foot L	24,87
Foot R	24,90
Seat	21,65

Tabulka 5.25.40-1: Ekvivalentní teploty

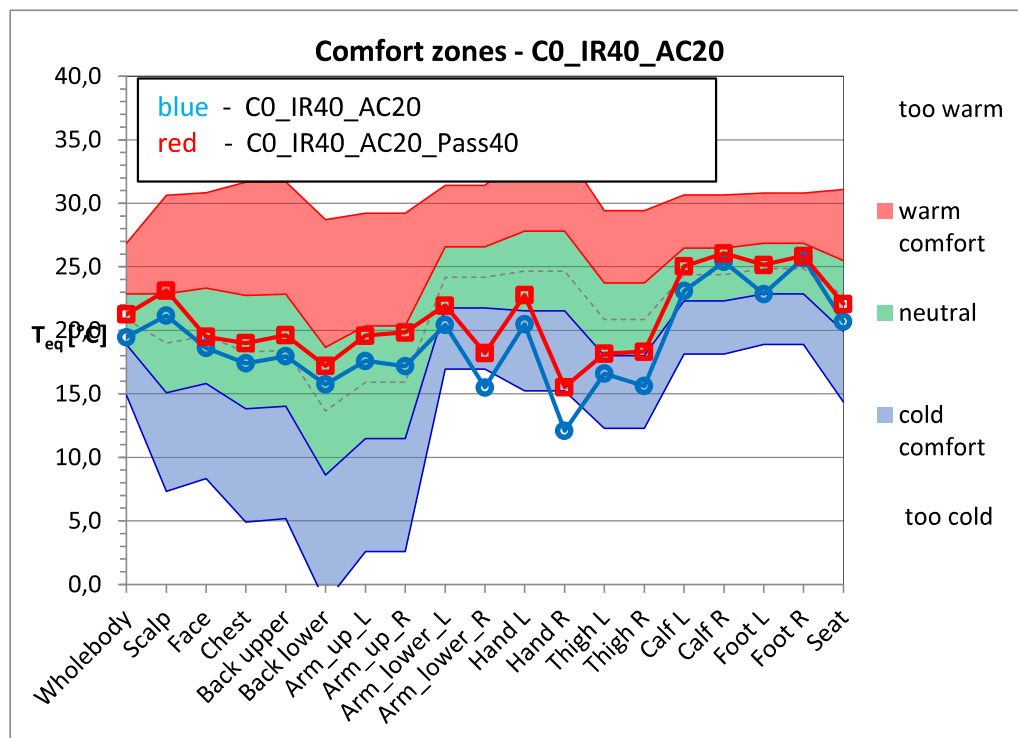


Graf 5.25.40-1: Case $T_{amb}=0\text{ °C}$ $T_{IR}=40\text{ °C}$ $T_{AC}=25\text{ °C}$, teplota panelů dveří a střechy $T=35\text{ °C}$

CO_IR40_AC25	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	22,05
Scalp	23,56
Face	20,19
Chest	19,12
Back upper	20,24
Back lower	18,46
Arm_up_L	19,66
Arm_up_R	19,43
Arm_lower_L	22,95
Arm_lower_R	16,93
Hand L	23,59
Hand R	14,50
Thigh L	20,04
Thigh R	18,35
Calf L	25,71
Calf R	28,03
Foot L	27,18
Foot R	28,63
Seat	23,41

Enhanced case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	22,26
Scalp	22,00
Face	19,58
Chest	18,97
Back upper	20,57
Back lower	19,46
Arm_up_L	19,90
Arm_up_R	19,39
Arm_lower_L	22,89
Arm_lower_R	18,22
Hand L	24,04
Hand R	16,75
Thigh L	19,76
Thigh R	19,34
Calf L	25,83
Calf R	27,68
Foot L	27,32
Foot R	28,21
Seat	24,43

Tabulka 5.20.40-2: Ekvivalentní teploty

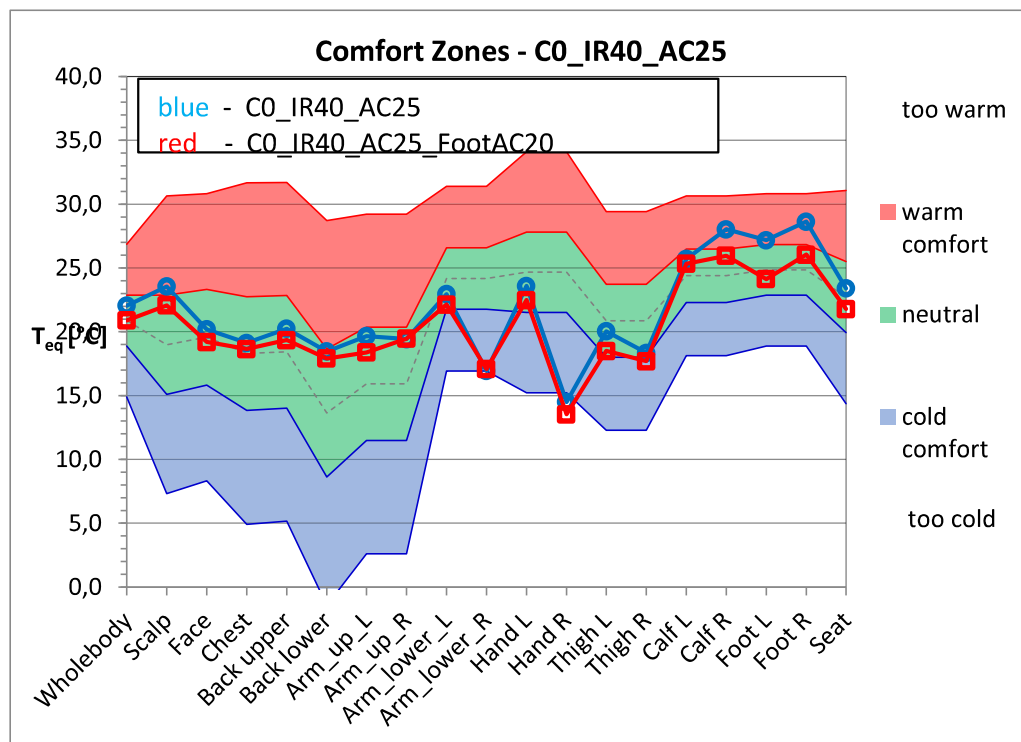


Graf 5.20.40-2: Case $T_{amb}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{IR}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{Ac}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota panelů dveří a střechy pasażera $T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

CO_IR40_AC20	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	19,46
Scalp	21,16
Face	18,61
Chest	17,41
Back upper	17,96
Back lower	15,74
Arm_up_L	17,60
Arm_up_R	17,18
Arm_lower_L	20,44
Arm_lower_R	15,50
Hand L	20,49
Hand R	12,09
Thigh L	16,60
Thigh R	15,61
Calf L	23,10
Calf R	25,40
Foot L	22,86
Foot R	25,68
Seat	20,68

Enhanced case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	21,27
Scalp	23,14
Face	19,50
Chest	18,99
Back upper	19,62
Back lower	17,20
Arm_up_L	19,59
Arm_up_R	19,84
Arm_lower_L	21,95
Arm_lower_R	18,21
Hand L	22,78
Hand R	15,53
Thigh L	18,17
Thigh R	18,33
Calf L	25,05
Calf R	26,06
Foot L	25,16
Foot R	25,86
Seat	22,08

Tabulka 5.25.40-3: Ekvivalentní teploty

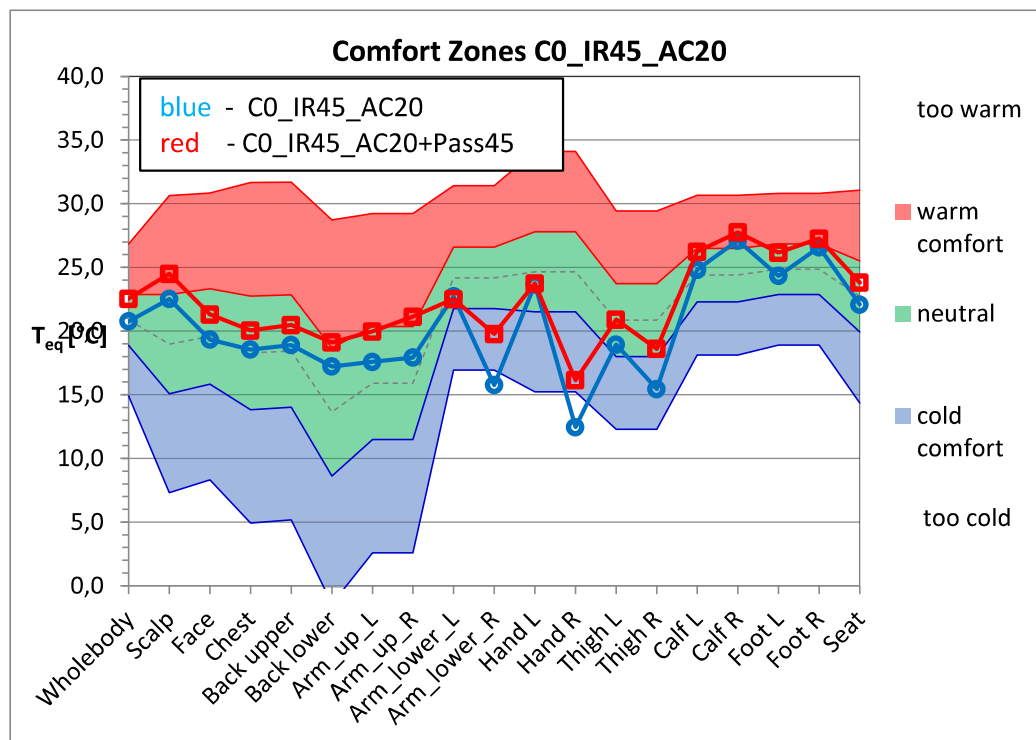


Graf 5.25.40-2: Case $T_{amb}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{IR}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{AC}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota vzduchu z výustek u nohou nižší o 5 °C

CO_IR40_AC25	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	22,05
Scalp	23,56
Face	20,19
Chest	19,12
Back upper	20,24
Back lower	18,46
Arm_up_L	19,66
Arm_up_R	19,43
Arm_lower_L	22,95
Arm_lower_R	16,93
Hand L	23,59
Hand R	14,50
Thigh L	20,04
Thigh R	18,35
Calf L	25,71
Calf R	28,03
Foot L	27,18
Foot R	28,63
Seat	23,41

Enhanced case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	20,89
Scalp	22,08
Face	19,20
Chest	18,65
Back upper	19,36
Back lower	17,91
Arm_up_L	18,38
Arm_up_R	19,46
Arm_lower_L	22,13
Arm_lower_R	17,08
Hand L	22,48
Hand R	13,53
Thigh L	18,50
Thigh R	17,69
Calf L	25,33
Calf R	25,96
Foot L	24,13
Foot R	26,05
Seat	21,78

Tabulka 5.20.45-4: Ekvivalentní teploty

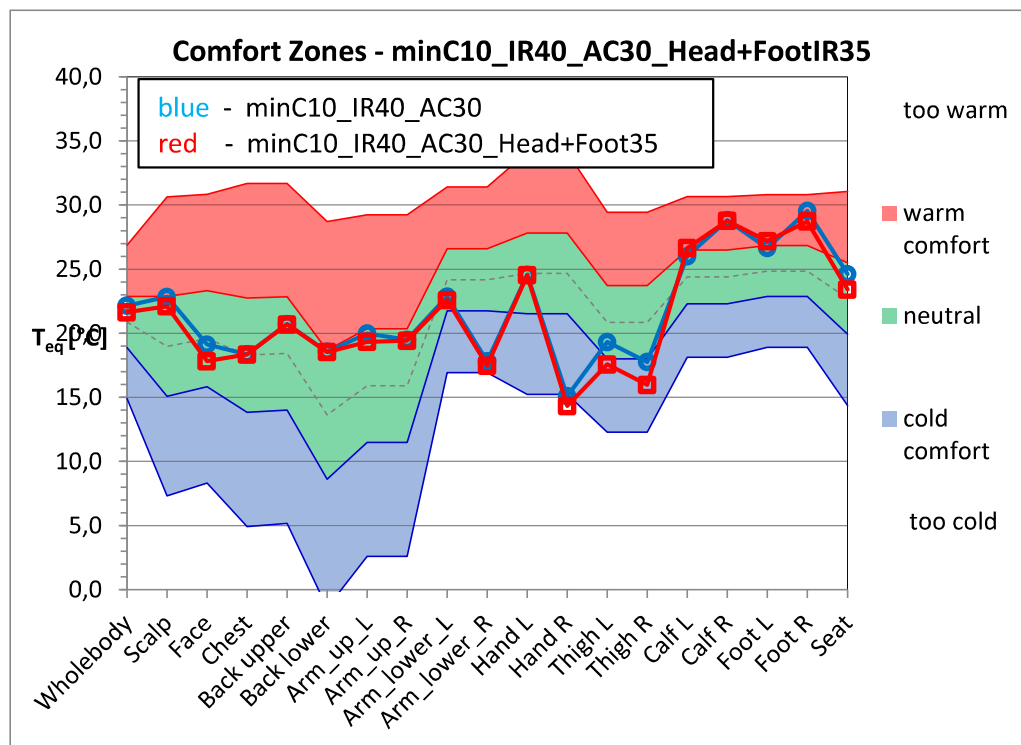


Graf 5.20.45-4: Case $T_{amb}=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{IR}=45\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{AC}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplota panelů dveří a pasažéra $T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$

CO_IR45_AC20	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	20,76
Scalp	22,53
Face	19,34
Chest	18,56
Back upper	18,90
Back lower	17,22
Arm_up_L	17,59
Arm_up_R	17,93
Arm_lower_L	22,73
Arm_lower_R	15,76
Hand L	23,67
Hand R	12,46
Thigh L	18,94
Thigh R	15,45
Calf L	24,82
Calf R	27,11
Foot L	24,34
Foot R	26,58
Seat	22,09

Enhanced case	
Zone	Teq [°C]
Wholebody	22,54
Scalp	24,49
Face	21,31
Chest	20,05
Back upper	20,47
Back lower	19,10
Arm_up_L	19,97
Arm_up_R	21,13
Arm_lower_L	22,52
Arm_lower_R	19,77
Hand L	23,74
Hand R	16,14
Thigh L	20,90
Thigh R	18,60
Calf L	26,24
Calf R	27,75
Foot L	26,16
Foot R	27,26
Seat	23,80

Tabulka 6.30.40-1: Ekvivalentní teploty

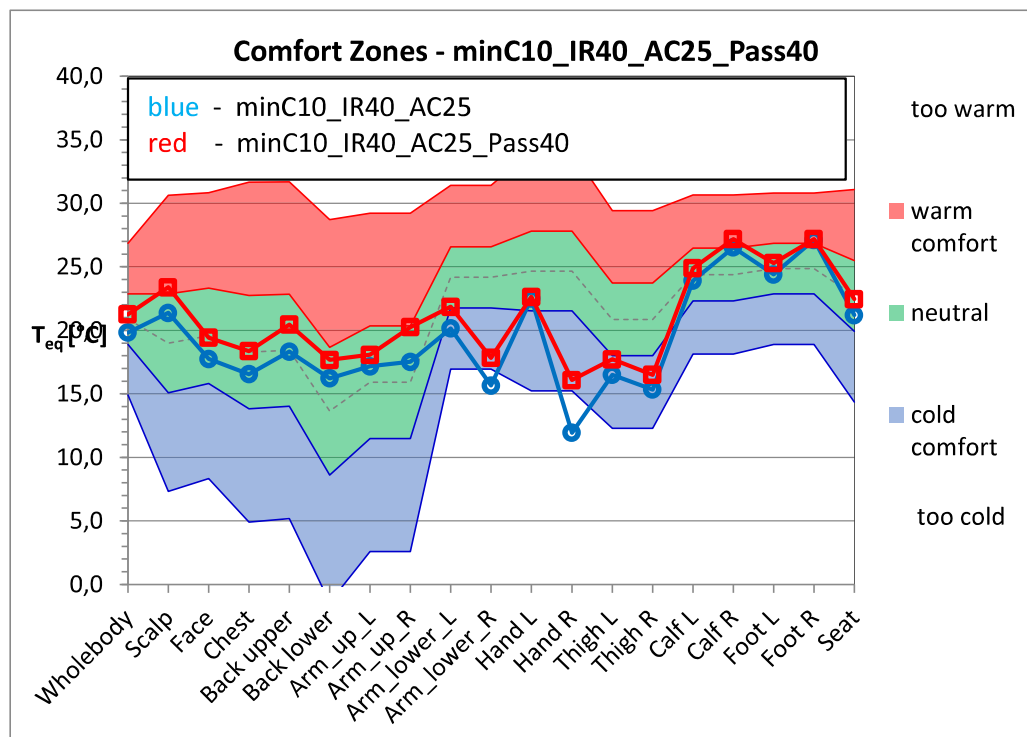


Graf 6.30.40-1: Case $T_{amb}=-10\text{ °C}$ $T_{IR}=40\text{ °C}$ $T_{AC}=30\text{ °C}$, teplota panelů u nohou a střechy $T=35\text{ °C}$

minC10_IR40_AC30	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	22,15
Scalp	22,84
Face	19,12
Chest	18,36
Back upper	20,71
Back lower	18,56
Arm_up_L	19,97
Arm_up_R	19,50
Arm_lower_L	22,87
Arm_lower_R	17,80
Hand L	24,56
Hand R	15,09
Thigh L	19,32
Thigh R	17,76
Calf L	26,01
Calf R	28,82
Foot L	26,65
Foot R	29,55
Seat	24,61

Enhanced case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	21,64
Scalp	22,11
Face	17,81
Chest	18,35
Back upper	20,69
Back lower	18,53
Arm_up_L	19,34
Arm_up_R	19,42
Arm_lower_L	22,59
Arm_lower_R	17,47
Hand L	24,52
Hand R	14,32
Thigh L	17,57
Thigh R	15,98
Calf L	26,65
Calf R	28,77
Foot L	27,18
Foot R	28,72
Seat	23,41

Tabulka 6.25.40-2: Ekvivalentní teploty

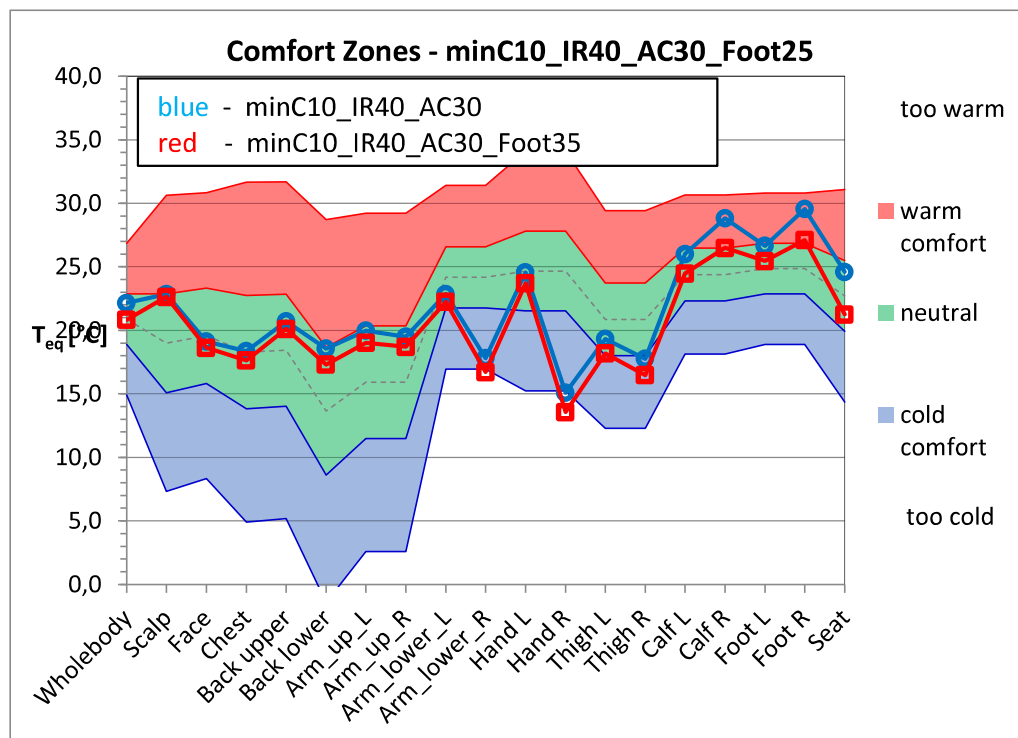


Graf 6.25.40-2: Case $T_{amb} = -10\text{ °C}$ $T_{IR} = 40\text{ °C}$ $T_{AC} = 25\text{ °C}$, teplota panelů dveří a střeby pasažéra $T = 40\text{ °C}$

minC10_IR40_AC25	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	19,82
Scalp	21,38
Face	17,74
Chest	16,55
Back upper	18,33
Back lower	16,23
Arm_up_L	17,17
Arm_up_R	17,51
Arm_lower_L	20,16
Arm_lower_R	15,66
Hand L	22,51
Hand R	11,94
Thigh L	16,50
Thigh R	15,34
Calf L	23,90
Calf R	26,53
Foot L	24,40
Foot R	27,12
Seat	21,20

Enhanced case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	21,26
Scalp	23,39
Face	19,42
Chest	18,37
Back upper	20,46
Back lower	17,67
Arm_up_L	18,07
Arm_up_R	20,25
Arm_lower_L	21,86
Arm_lower_R	17,84
Hand L	22,63
Hand R	16,08
Thigh L	17,72
Thigh R	16,50
Calf L	24,89
Calf R	27,18
Foot L	25,30
Foot R	27,18
Seat	22,46

Tabulka 6.30.40-3: Ekvivalentní teploty

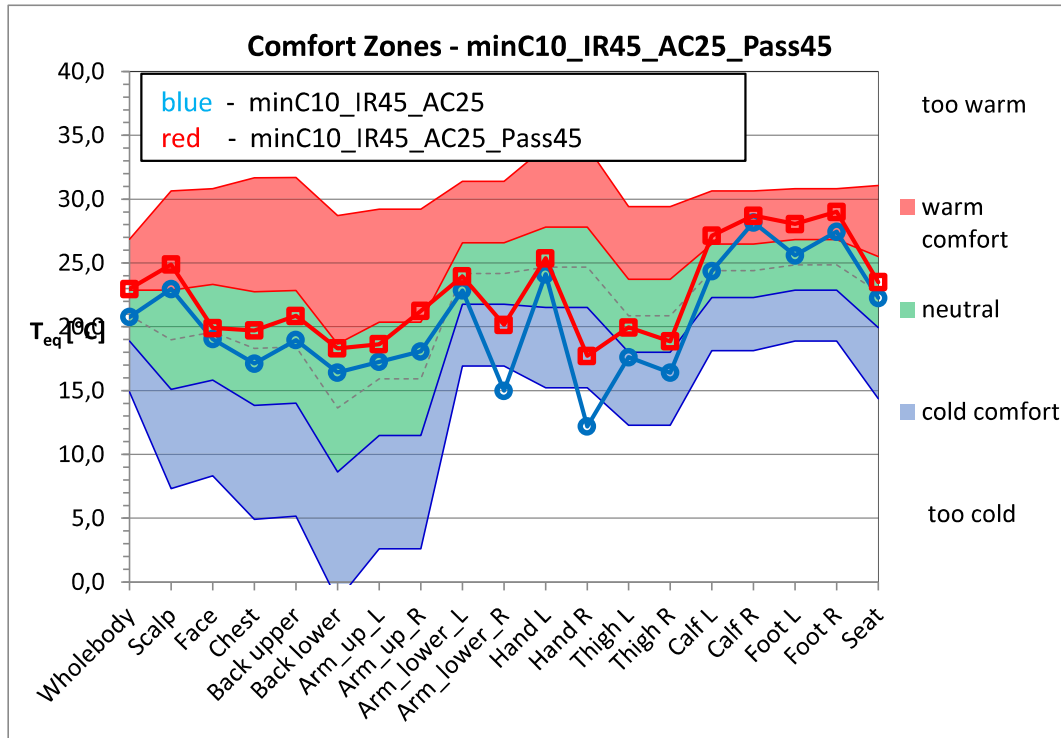


Graf 6.30.40-3: Case $T_{amb} = -10\text{ °C}$ $T_{IR} = 40\text{ °C}$ $T_{AC} = 30\text{ °C}$, teplota vzduchu z výustek u nohou nižší o 5 °C

minC10_IR40_AC30	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	22,15
Scalp	22,84
Face	19,12
Chest	18,36
Back upper	20,71
Back lower	18,56
Arm_up_L	19,97
Arm_up_R	19,50
Arm_lower_L	22,87
Arm_lower_R	17,80
Hand L	24,56
Hand R	15,09
Thigh L	19,32
Thigh R	17,76
Calf L	26,01
Calf R	28,82
Foot L	26,65
Foot R	29,55
Seat	24,61

Enhanced case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	20,83
Scalp	22,64
Face	18,63
Chest	17,63
Back upper	20,12
Back lower	17,31
Arm_up_L	19,02
Arm_up_R	18,70
Arm_lower_L	22,24
Arm_lower_R	16,72
Hand L	23,70
Hand R	13,57
Thigh L	18,18
Thigh R	16,47
Calf L	24,48
Calf R	26,50
Foot L	25,46
Foot R	27,11
Seat	21,25

Tabulka 6.25.45-4: Ekvivalentní teploty



Graf 6.25.45-4: Case $T_{amb} = -10\text{ °C}$ $T_{IR} = 45\text{ °C}$ $T_{AC} = 25\text{ °C}$, teplota panelů dveří a střechy u pasažéra $T = 45\text{ °C}$

minC10_IR45_AC25	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	20,77
Scalp	22,97
Face	19,04
Chest	17,11
Back upper	18,96
Back lower	16,42
Arm_up_L	17,26
Arm_up_R	18,07
Arm_lower_L	22,85
Arm_lower_R	14,99
Hand L	24,12
Hand R	12,19
Thigh L	17,62
Thigh R	16,40
Calf L	24,36
Calf R	28,18
Foot L	25,60
Foot R	27,46
Seat	22,26

Enhanced case	
Zone	T_{eq} [°C]
Wholebody	22,96
Scalp	24,88
Face	19,90
Chest	19,71
Back upper	20,85
Back lower	18,31
Arm_up_L	18,64
Arm_up_R	21,25
Arm_lower_L	23,95
Arm_lower_R	20,16
Hand L	25,38
Hand R	17,72
Thigh L	19,95
Thigh R	18,87
Calf L	27,14
Calf R	28,71
Foot L	28,06
Foot R	29,01
Seat	23,50

		minC10 (phi=90 %)			C0 (phi=80 %)			C10 (phi=70 %)		
T_case [°C]		25	30	35	20	25	30	15	20	25
Δi [J/kg]		35,442	40,512	45,572	20,311	25,391	30,471	5,1	10,2	15,3
ρ t stř [kgm-3]		1,227	1,216	1,205	1,215	1,204	1,194	1,202	1,192	1,182
Center [l/s]	2,54	110,3	125,0	139,3	62,6	77,5	92,3	15,6	30,8	45,9
Defrost [l/s]	6,83	296,8	336,2	374,8	168,4	208,7	248,3	41,8	83,0	123,4
Left [l/s]	4,50	195,9	221,9	247,4	111,2	137,7	163,9	27,6	54,8	81,5
Right [l/s]	4,22	183,7	208,1	232,0	104,2	129,1	153,7	25,9	51,4	76,4
Dr.Feet [l/s]	7,09	396,4	436,5	475,9	262,5	303,5	343,9	130,4	144,6	213,7
Pass.Feet [l/s]	6,21	347,4	382,6	417,1	230,0	266,0	301,4	114,3	151,1	187,3
Σ [W]		1530,6	1710,3	1886,4	939,0	1122,5	1303,4	355,6	515,7	728,1
IR 45 [W]	159,00	1689,6	1869,3		1098,0	1281,5		514,6	674,7	
IR 40 [W]	116,54	1647,1	1826,8		1055,5	1239,0		472,1	632,2	
Úspora 45 [%]		10,4	0,9		15,8	1,7		29,3	7,3	
Úspora 40 [%]		12,7	3,2		19,0	4,9		35,2	13,2	

*Červeně označeny teploty základních scénářů, ke kterým se vztahuje výpočet úspory podle rovnice 12 na str.41