VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV
ENERGY INSTITUTE

CFD SIMULACE PROUDĚNÍ VZDUCHU V KABINĚ AUTOMOBILU
CFD SIMULATION OF AIR FLOW INSIDE A CAR CABIN

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. Cyril Kučera
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Jan Pokorný, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	**Bc. Cyril Kučera**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Technika prostředí
Vedoucí práce:	**Ing. Jan Pokorný, 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:

CFD simulace proudění vzduchu v kabině automobilu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Prostředí v kabinách automobilů je ve značné míře závislé na nastavení ventilace, která dodává upravený vzduch do kabiny. Správně nastavení vytápění, ventilace a klimatizování poskytuje nejen tepelný komfort, ale souvisí i s bezpečností jízdy (např. odmlžování skel). Předpokladem pro dosažení optimálních podmínek prostředí je vhodný návrh ventilačního systému vozidla. Pro detailní návrhy ventilace se jako podpůrný prostředek využívá CFD metod, pomocí nich lze simulovat proudění uvnitř kabiny. Cílem této práce je vytvořit 3D realistický model kabiny vozu, a pomocí CFD metody simulovat teplotní rozložení a rychlosti proudění uvnitř kabiny vozu. Pro nastavení okrajových podmínek budou použita naměřená data v klimatické komoře získaná v rámci projektu Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka.

Cíle diplomové práce:

Příprava 3D geometrie skutečného vozu.
Příprava okrajových podmínek včetně materiálových vlastností skutečného vozu.
Simulace proudění vzduchu v kabině automobilu při daném nastavení výustek a podmínek okolí.
Vyhodnocení rychlostního a teplotního pole kabiny vozu.

Seznam doporučené literatury:

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2nd edition, Prentice Hall, 2007.

CD-ADAPCO. STAR-CCM+® Documentation Version 10.04, 2015.

DALY, S. Automotive Air-Conditioning and Climate Control Systems. Oxford: Elsevier Ltd., 2006. 432 s.

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

V Brně, dne 27. 10. 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
L. S.
DĚKANÁT

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
ředitel ústavu	děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá CFD simulováním proudění vzduchu uvnitř automobilu pomocí numerického výpočtového programu Star-CCM+. Cílem práce je připravit 3D geometrii, resp. realistický model skutečného vozu, připravit okrajové podmínky včetně materiálových vlastností, simulování ustáleného stavu prostředí v kabině vozu a vyhodnocení rychlostního a teplotního pole kabiny automobilu. V práci jsou uvedeny výsledky teplotního rozložení a rychlostí proudění vzduchu v kabině vozu během zimních, jarních a letních podmínek v režimech HVAC on a HVAC off. Sledované teploty vzduchu a povrchové teploty částí vozu jsou porovnávány s naměřenými daty. Průměrný rozdíl mezi simulací a měřením je u teplot vzduchu 2,3 °C a u povrchových teplot 3,4 °C.

Klíčová slova

CFD simulace, proudění vzduchu, Star-CCM+, rychlostní a teplotní pole, teplota vzduchu, povrchová teplota, systém HVAC, porovnání s naměřenými daty, kabina automobilu.

Abstract

The diploma thesis deals with CFD simulating the air flow inside the car using the numerical calculation program Star-CCM+. The aim of the thesis was to prepare 3D geometry, resp. realistic model of the real car, preparing boundary conditions including material properties, simulating the steady state of the environment and evaluating the speed and temperature of the car cabin. The paper presents the results of the temperature distribution and air velocities in the cabin during the winter, spring and summer conditions in HVAC on and HVAC off modes. The monitored air temperatures and surface temperatures of the car parts are compared with the measured data. The average difference between simulation and measurement was at air temperatures of 2.3 °C and surface temperatures of 3.4 °C.

Keywords

CFD simulations, airflow, Star-CCM+, speed and temperature fields, air temperature, surface temperature, HVAC system, comparison with measured data, car cabin.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „CFD simulace proudění vzduchu uvnitř kabiny automobilu“ vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Jana Pokorného, Ph.D. a s použitím citovaných zdrojů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 25. května 2018 Bc. Cyril Kučera

Bibliografická citace

KUČERA, C. *CFD simulace proudění vzduchu v kabině automobilu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pokorný, Ph.D.

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval svým rodičům za jejich nezměrnou trpělivost, obrovskou vstřícnost a neobyčejnou podporu během celého studia. Velké poděkování náleží také mému vedoucímu Ing. Janu Pokornému, Ph.D. za skvělou spolupráci a cenné rady při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Fišerovi, Ph.D., Ing. Jakubovi Elcnerovi, Ph.D. a Ing. Jaroslavu Volavému, Ph.D. za velmi přínosné praktické a technické rady spojené s výpočetním programem Star-CCM+.

OBSAH

1 ÚVOD 10

2 VYMEZENÍ CÍLŮ A LIMITŮ PRÁCE 11

3 UVEDENÍ DO HVAC A CFD PROBLEMATIKY 12

3.1. Systém HVAC 12
3.2. CFD simulace 13

4 PŘÍPRAVA 3D GEOMETRIE VOZU 17

4.1. Využití programu Rhinoceros 17
4.2. Využití programu Star-CCM+ 18

5 IDENTIFIKACE MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ VOZU 20

6 PŘÍPRAVA OKRAJOVÝCH PODMÍNEK 21

6.1. OP v klimatické komoře 21
6.2. OP součinitele přestupu tepla a teploty okolí 23
6.3. Teplota a rychlost přiváděného vzduchu 24
6.4. Umístění sledovaných míst v automobilu 26

7 NASTAVENÍ SIMULACE 28

7.1. Nastavení modelů sítě 28
7.2. Povrchová a objemová síť 28
7.3. Použité typy okrajových podmínek 29
7.4. Nastavení fyzikálních modelů 29
7.5. Test nezávislosti sítě 29

8 VÝSLEDKY SIMULACÍ 31

8.1. Zima HVAC on 32
8.2. Jaro HVAC on 34
8.3. Léto HVAC on 35
8.4. Zima HVAC off 36
8.5. Jaro HVAC off 37
8.6. Léto HVAC off 38

9 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ 39

9.1. Porovnání teplot mezi simulacemi 39
9.1.1. Teploty vzduchu 39
9.1.2. Povrchové teploty 40
9.2. Porovnání teplot mezi simulacemi a naměřenými hodnotami 41
9.2.1. Teploty vzduchu v režimu HVAC on 41
9.2.2. Povrchové teploty v režimu HVAC on 42
9.2.3. Teploty vzduchu v režimu HVAC off 43
9.2.4. Povrchové teploty v režimu HVAC off 44
9.2.5. Shrnutí rozdílů teplot mezi simulacemi a měřením 44
9.3. Zjednodušený výpočet prostupu tepla kabinou vozu 46

10 DISKUZE 48

10.1. Diskuze k výsledkům simulace 48
10.1.1. Hodnota Wall y+ 48
10.1.2. Streamline 49
10.1.3. Courantovo číslo 50
10.1.4. Porovnání Steady a Unsteady simulace 50
10.2. Zjednodušení modelu oproti realitě 52
10.2.1. Vliv úhlu přiváděného vzduchu 53
10.2.2. Omezení modelu – palubní deska 54
11 ZÁVĚR 55
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 56
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 58
SEZNAM PŘÍLOH 59

1 ÚVOD

Jedním z důležitých parametrů sledovaných při návrhu nového vozu je dobře navržený systém HVAC (vytápění, větrání, klimatizace), který poskytuje vhodné prostředí pro řidiče a posádku, jak z hlediska tepelného komfortu, tak množství čerstvého vzduchu. Kromě toho je účelem HVAC zajistit bezpečný výhled z vozu (tj. zajistit odmlžování skel). V praxi se při testech sledují zejména teploty, náběhy teplot v kabině při vytápění a chlazení, a také směrování vzduchu na člověka. Sledují se teploty, rychlosti proudění vzduchu v kabině, ale i další veličiny (relativní vlhkost vzduchu apod.). Obvykle tyto testy probíhají v klimatických komorách a jsou časově i finančně náročné. Řešením snižujícím náklady na vývoj a testování vozu jsou a budou počítačové simulace. Ty jsou vhodné zejména pro dílčí změny a optimalizaci v návrhu HVAC, konkrétně dokáží řešit problematiku snižování tepelných ztrát, odmlžování skel, výměny vzduchu, rekuperace tepla, vlastnosti emisivity skel a mnohé další.

Tato diplomová práce se zabývá CFD simulováním proudění vzduchu uvnitř automobilu pomocí numerického výpočtového programu Star-CCM+. K samotnému simulování byla vytvořena zjednodušená geometrie vozu Škoda Octavia Combi III. Ve stejném typu vozu byly naměřeny povrchové teploty interiéru, rychlosti vzduchu v blízkosti vyústek a teploty vzduchu v úrovních nohou, pasu a hlavy u spolujezdce a pasažéra za řidičem. Měření proběhlo v klimatické komoře spadající pod NETME centrum na VUT FSI v rámci projektu Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka. Vybraná naměřená data byla použita k vyhodnocení výsledků typizovaných letních, jarních a zimních podmínek v režimech zapnutého a vypnutého HVAC systému. Cílem práce bylo identifikovat chování proudění vzduchu pomocí numerického výpočtového modelu a vyhodnotit tak obraz proudění vzduchu v kabině, které by nebylo možné získat přímo z bodového měření ve voze.

Samotná práce, tj. její praktická část se zabývá kompletní přípravou 3D geometrie vozu, přípravou okrajových podmínek vč. materiálových vlastností, nastavením modelu, simulováním ustáleného stavu prostředí, vyhodnocením výsledků simulace a jejich porovnáním s naměřenými hodnotami. V práci jsou uvedeny výsledky teplotního rozložení a rychlostí proudění vzduchu v kabině vozu během zimních, jarních a letních podmínek v režimech HVAC on a HVAC off. Sledované teploty vzduchu a povrchové teploty částí vozu jsou porovnávány s naměřenými daty. Porovnávána byla teplota vzduchu v úrovních obličeje, pasu a nohou u spolujezdce a u pasažéra za řidičem a povrchové teploty skel, sedadel, střechy, dveří, podlahy, krytu kufru a palubní desky.

2 VYMEZENÍ CÍLŮ A LIMITŮ PRÁCE

Cílem této práce je vytvořit zjednodušený 3D model kabiny vycházející z reálné geometrie vozu a pomocí CFD metod vypočítat teplotní rozložení a rychlosti proudění vzduchu uvnitř kabiny automobilu.

Cíle diplomové práce:

1. Příprava zjednodušené 3D geometrie skutečného vozu:
   - Sběr podkladů pro tvorbu geometrie.
   - Zjednodušení reálné geometrie (snížení množství detailů jako např. řadící páka).
   - Export/Import z CAD programu do CFD programu.
   - Tvorba a optimalizace výpočetní sítě.
2. Příprava okrajových podmínek včetně materiálových vlastností skutečného vozu:
   - Definice zimních, jarních a letních scénářů v režimech HVAC on a HVAC off.
3. Simulace ustáleného stavu proudění vzduchu v kabině vozu při daném nastavení vyústek a podmínek okolí:
   - Volba fyzikálního a matematického modelu.
4. Vyhodnocení rychlostního a teplotního pole kabiny vozu:
   - Vyhodnocení dat simulace.
   - Zpracování naměřených dat.
   - Porovnání povrchových teplot a teplot vzduchu v kabině automobilu.

Limity diplomové práce:

Pouze simulace ustáleného stavu v kabině:

- Práce nemá za cíl simulovat dynamické změny v prostředí kabiny.

Práce si neklade za cíl vyhodnocovat vlhkost vzduchu:

- Práce vyhodnocuje pouze rychlost proudění a teplotu vzduchu.

Simulace proudění vzduchu se zaměřuje zejména na prostor kabiny:

- Proudění ve vzduchovodech a vyústkami je provedeno na zjednodušené geometrii tak, aby byla dostatečně zachována hybnost a entalpie přiváděného vzduchu do kabiny.
- Není simulován vliv lamel a usměrňovacích prvků v kanálech.

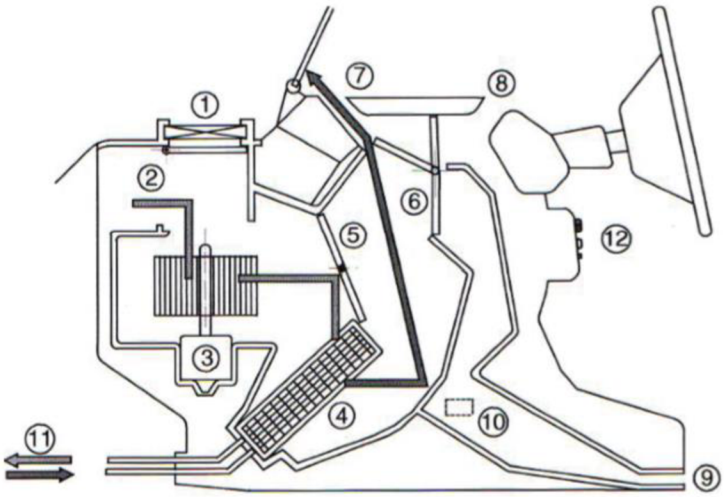
Vliv posádky na proudění vzduchu ve voze není uvažován.

3 UVEDENÍ DO HVAC A CFD PROBLEMATIKY

Tato kapitola uvádí základní princip funkčnosti systému HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) a uvádí základy funkcionality CFD metod a jejich využití k numerickým simulacím v praxi.

3.1. Systém HVAC

HVAC systém zajišťuje vytápění, větrání a chlazení, slouží k vytváření tepelného komfortu uvnitř vozu a také udržuje požadované vlastnosti částí auta v ideálním stavu tak, aby bylo dosaženo bezpečnosti během jízdy. Systém Climatronic, který je umístěn ve voze Škoda Octavia Combi III, umožňuje automatizované dvouzónové klimatizování, znamená to, že je možné nastavit jednotlivě teploty pro řidiče a spolujezdce zvlášť. Systém Climatronic disponuje kromě omezovací klapky na čerstvý vzduch i samostatnou klapkou na recirkulaci vzduchu (viz obrázek 3.1). Podle zvolené teploty a informací z čidel indukujících teplotu uvnitř a vně automobilu dokáže systém vyhodnotit jaké množství vzduchu a o jakých parametrech dodávat do prostoru kabiny tak, aby byl splněn požadavek nastavené teploty. Automatický režim musí být navržen a otestován tak, aby během různých klimatických podmínek uspokojil požadavky posádky vzhledem k tepelnému komfortu. V zimních podmínkách jsou klapky v kanálech přivádějících vzduch o patřičných parametrech otevřeny zejména na vyústky směřující na čelní sklo, nohy a boční skla v přední části vozu, tak aby bylo zajištěno odmlžování skel (LÍZAL, F., 2006). Naopak v letních podmínkách přes vyústky směřující na nohy neproudí žádný vzduch a hlavní proud vzduchu směřuje na pasažéry z centrálních středových vyústek a hlavních bočních vyústek (SCHWARZ, 2010; DALY, 2006).



1. Vzduchový filtr
2. Klapka recirkulace
3. Ventilátor
4. Tepelný výměník
5. Teplotní směšovací klapka
6. Klapka distribuce vzduchu
7. Ofukovač čelního skla
8. Vyústky na palubní desce
9. Ofukovače nohou
10. Potrubí
11. Oběhový systém chladící kapaliny
12. Ovládací panel

Obrázek 3.1 Zjednodušené schéma distribuce vzduchu (DALY, 2006).

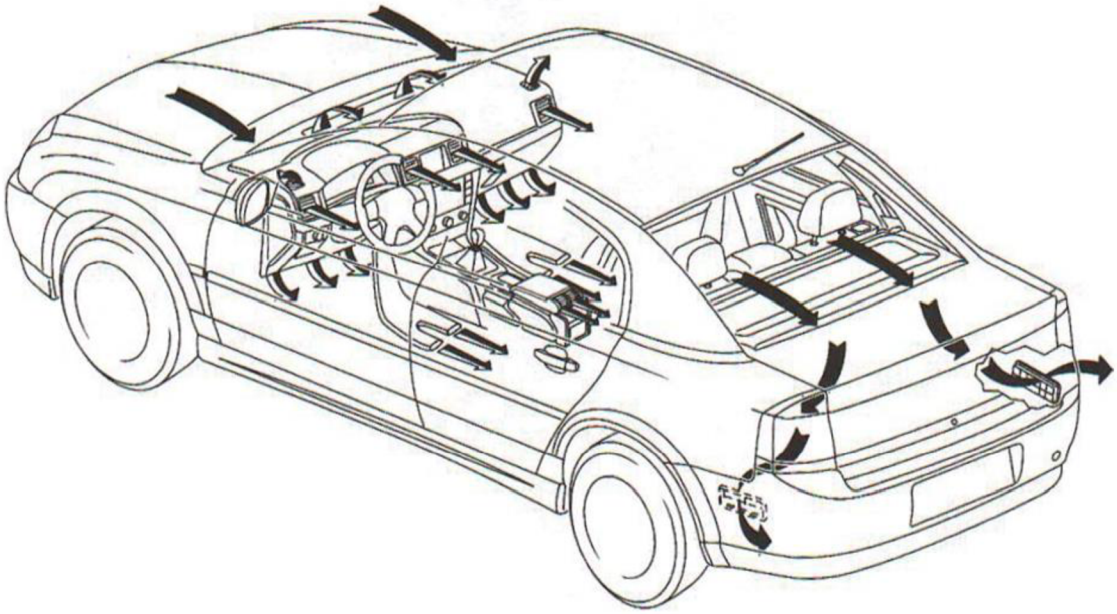
K zajištění požadovaných parametrů vzduchu a vůbec tepelného komfortu obecně uvnitř vozu hrají pro automobilní oblast zásadní roli tato specifika:

- Velké prosklené plochy tvořené jednoduchým zasklením.
- Vysoké solární zisky v létě, velké tepelné ztráty v zimě.
- Nízká, resp. vysoká střední radiační teplota.
- Nízká vlhkost vzduchu v zimě.
- Riziko obtěžování průvanem.

V dnešní době jsou běžně dostupné vícezónové automatické klimatizace, vyhřívání zadního skla a vyhřívání sedaček, což v 80.-90. letech platilo pouze pro vozy vyšších tříd. V 80. letech bylo ve výbavě větrání a vytápění kabiny vozu a vyhřívání zadního skla. Ve srovnání se Škodou Superb (r. 2015) a Škodou 120 (r. 1980) vzrostl počet vyústek z 5 na cca. 30 (FIŠER, 2018). Další změny s sebou přináší technický rozvoj a to např. v oblasti materiálových vlastností skel.

Jedním z mnoha činitelů, který poměrně výrazně ovlivňuje stav prostředí ve vnitřních prostorech, je proudění větracího vzduchu ve větraném prostoru. Na proudění vzduchu ve větraných prostorech má především vliv druh, počet, umístění a velikost přiváděcích vyústek, dále rychlost a teplota přiváděného vzduchu a nezanedbatelný vliv má i rozmístění zdrojů tepla a chladu, které vytvářejí konvekční proudy. Pro účely komplexního hodnocení stavu vnitřních větraných prostor je možné výše uvedené parametry větracího systému sjednotit do souhrnného názvu distribuce vzduchu ve větraném prostoru (CHÝSKÝ, a kol., 1993).

Obrázek 3.2 zobrazuje proudění vzduchu uvnitř automobilu. Vzduch vchází vyústkami v přední části vozu tzv. Inlet a vychází z vozu v zadní části vozu tzv. Outlet, který zabraňuje vzniku přetlaku uvnitř vozu.



Obrázek 3.2 Schéma proudění vzduchu uvnitř automobilu (DALY, 2006).

3.2. CFD simulace

O zajištění optimálního stavu vnitřního prostředí dopravních prostředků se stará HVAC systém. Pro zrychlení jeho vývoje se v oblasti automobilového průmyslu starají mimo jiné CFD simulace. CFD simulace jsou v dnešní době standartní procedurou v inženýrských aplikacích pro vyladění designu z hlediska větrání a proudění vzduchu obecně. V této kapitole je uveden pouze základní popis principů a modelů použitých v rámci práce, více lze dohledat v odborné literatuře zaměřené na CFD (VERSTEEG, a kol., 2007; BLEJCHÁŘ, 2010; TU, a kol., 2007; WILCOX, 2006).

Práce se nezabývá přímo vytvářením vlastních numerických řešičů či programových kódů, ale využívá komerční CFD software pouze jako výpočetní nástroj k dosažení výsledků zkoumaných částí.

K počítačovému modelování jsou uzpůsobeny mnohé CFD programy, např. Star-CCM+. Program funguje na bázi výpočtové mechaniky kontinua neboli také Computational Fluid Dynamics (CFD). která je založena na numerickém řešení Navier-Stokesových rovnic. Tato soustava parciálních diferenciálních rovnic popisuje pohyb tekutin zahrnujících zákony zachování hmoty, hybnosti a energie. V případě programu Star-CCM+ jsou řešeny numericky metodou konečných objemů. Star-CCM+ je komerční software umožňující řešení širokého spektra jevů spojených s mechanikou tekutin jako např. přenos tepla, turbulence, chemické reakce, aeroakustika a mnohé další (ELCNER, 2015). CFD metoda poskytuje detailní data o proudových a teplotních polích.

V CFD modelování je výpočetní oblast rozdělena na kontrolní objemy, které tvoří výpočetní síť buněk. Každá buňka je definována diskretizačními rovnicemi základních zákonů zachování hmoty, hybnosti a energie (VERSTEEG, a kol., 2007; PATANKAR, 1980). V kombinaci s okrajovými podmínkami je řešením informace o časovém a prostorovém rozložení jednotlivých veličin teplot a rychlosti proudění (JAROŠ, a kol., 2002).

CFD kód řeší pomocí numerických algoritmů problémy spojené s mechanikou tekutin. Většina komerčních softwarů se skládá ze 3 částí: Preprocesor, řešič a postprocesor (VERSTEEG, a kol., 2007):

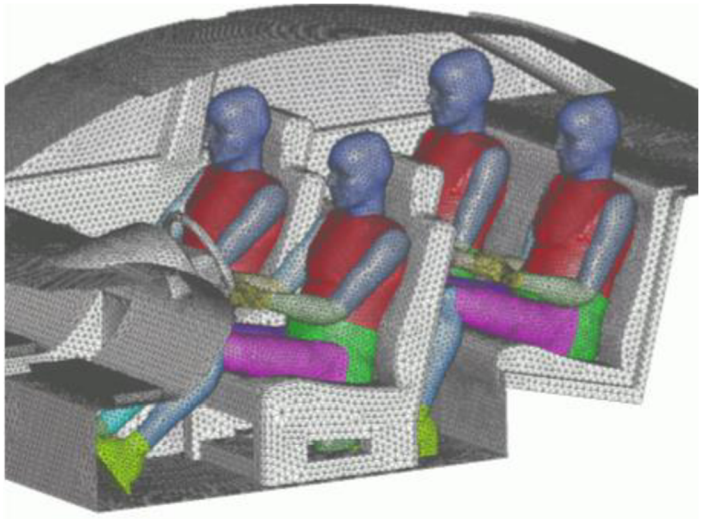
- Preprocesor – Účelem je definování domény vytvořením výpočetní sítě a definování počátečních a okrajových podmínek.
- Řešič – Jeho prací je na základě nastavených okrajových a počátečních podmínek řešit zadanou soustavu diferenciálních rovnic.
- Postprocesor – Jedná se o vizualizaci výsledných dat zpracovaných řešičem pomocí grafů a tabulek.

Ačkoliv je příčina a vznik turbulence stále částečně nevyřešenou otázkou, existuje celá řada modelů, které se její vznik a účinky na pohyb tekutiny snaží modelovat. Postupy se především liší přístupy k popisu turbulence a výpočtovou náročností. Pro využití v úlohách spojených s technikou prostředí je zatím nejvíce používanou metoda RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes), která je založena na řešení průměrovaných Navier–Stokesových rovnic a při správné volbě modelu dovede predikovat vliv turbulence s dostatečnou přesností (NILSSON, 2004). Obecně metody RANS nevyžadují až tak jemnou síť jako LES (Large Eddy Simulation) a DNS (Direct Numerical Simulation) a jsou tudíž méně časově náročné na výpočet. Z těchto důvodů byl v této práci využit RANS model označovaný jako k-ω SST (MENTER, a kol., 2003).

U modelování kabin dopravních prostředků a úloh techniky prostředí je především nezbytné zvolit vhodnou úroveň simulovaných detailů, tak aby povrchová síť a následná výpočetní objemová síť byla schopna zachytit všechny podstatné fenomény odehrávající se uvnitř kabiny vozu. Zásadní je také správně rozdělit geometrii modelu podle materiálů tvořících stěny, korektně poté definovat jejich vlastnosti a okrajové podmínky. Obrázek 3.3 zobrazuje povrchovou síť definující hranici modelu s barevně zvýrazněnými okrajovými podmínkami

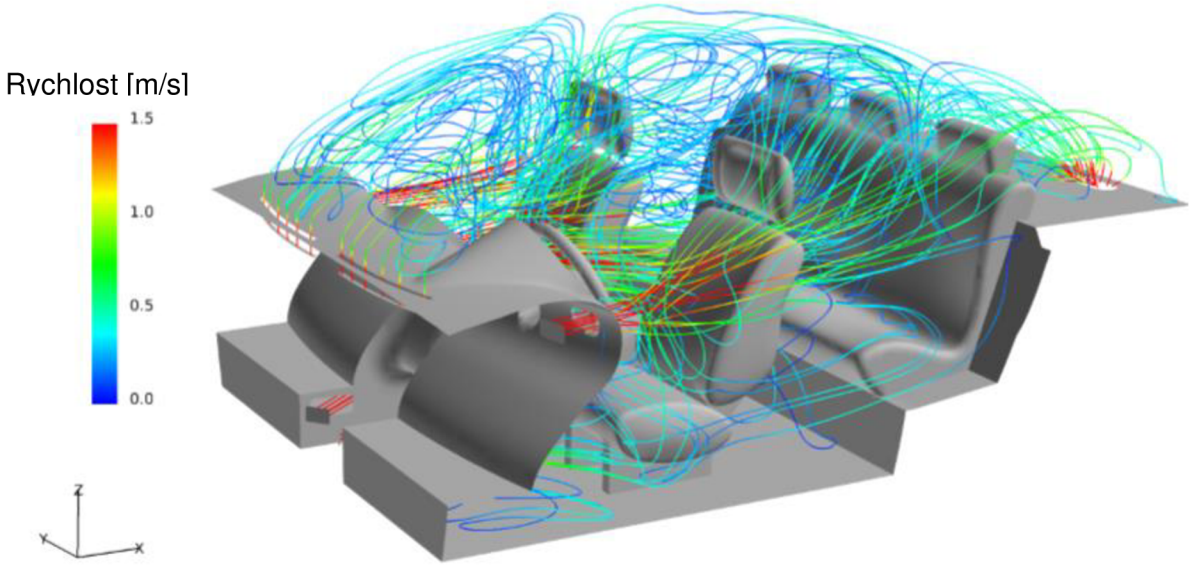
předepsanými pro posádku vozu. Nutná data pro popis okrajových podmínek lze rozlišit do následujících oblastí (FIŠER, 2011):

- Vlastnosti materiálů tvořících stěny či hranice modelu.
- Parametry proudů (rychlosti, teploty).
- Okolní a počáteční podmínky.



Obrázek 3.3 Povrchová síť zobrazující hranice modelu (AMBS, 2011).

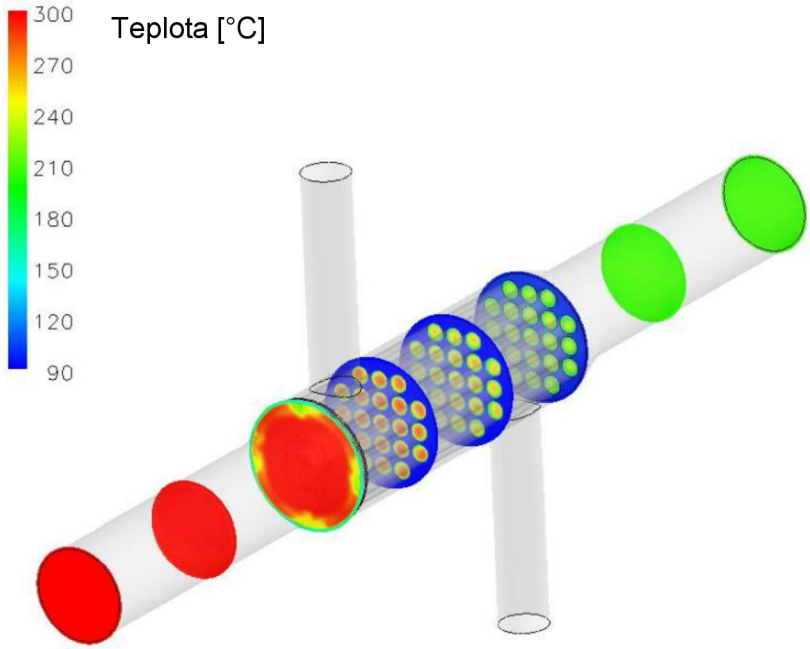
Důležitost role CFD metod v automobilovém průmyslu roste se zvyšováním rychlosti vývoje a požadavků zákazníka na kvalitu vnitřního prostředí, více testů musí být uskutečněno v kratším časovém horizontu (GIELDA, 1996). Aplikace CFD metod na vyhodnocení tepelného komfortu v kabinách je možné najít např. v odborných zdrojích: (AMBS, 2011; ALTAIR ENGINEERING, 2012). Zde autoři prezentovali výsledky simulace proudění vzduchu uvnitř vozu s přihlédnutím na vliv vlhkosti, solární radiace a vnitřní radiace. V této studii, vzhledem k tepelnému komfortu, využívali poznatků ze zdroje (AMBS, 2002).



Obrázek 3.4 Zobrazení velikosti rychlosti proudění vzduchu uvnitř vozu pomocí Streamline (ALTAIR ENGINEERING, 2012).

Obrázek 3.4 zobrazuje velikost rychlosti proudění vzduchu uvnitř vozu pomocí proudnic (Streamlines). Jedná se o zobrazení trajektorie částic vzduchu proudících uvnitř vozu kde červená barva zobrazuje vyšší rychlost kolem 1,5 m/s a světle zelená a modrá barva zobrazuje nižší rychlost vzduchu pod 0,5 m/s. Pomocí této simulace, lze následně vyhodnotit např. index obtěžování průvanem (Draught risk) na jednotlivých místech v kabině.

Kromě samotné simulace vnitřního prostředí kabiny automobilu lze pomocí CFD metod řešit i další oblasti engineeringu týkajícího se aerodynamiky vozu či tepelného managementu vozidel, např. samotný klimatizační okruh (kompresory, výměníky tepla, ventily atd.), případně chlazení pohonné jednotky (power-train cooling system). Obrázek 3.5. zobrazuje výměník tepla výfukových plynů, který slouží ke snižování NO_x emisí, kdy se využívá recirkulace částí výfukových plynů zpět do válců motoru (VISTEON, 2011). V této aplikaci bylo využito CFD metody k předvídání tlakových ztrát a výpočtu přeneseného tepelného výkonu na výměníku.



Obrázek 3.5 Výměník tepla výfukových plynů (VISTEON, 2011).

Ilustrace uvedené v této podkapitole pouze poukázaly na dvě vybrané aplikace CFD metod v automobilovém průmyslu z mnoha jiných. Další text této práce se bude věnovat právě simulaci vnitřního prostředí kabiny automobilů.

4 PŘÍPRAVA 3D GEOMETRIE VOZU

Pro CFD modelování je vždy zapotřebí vytvořit kvalitní objemovou síť buněk vyplňujících prostor, ve kterém simulace dějů probíhá. V prvopočátku práce obnášela zjednodušení velmi podrobné vstupní 3D geometrie vozu. Bylo zapotřebí vytvořit geometrii vnitřního interiéru a odmazat nepotřebné detaily pro CFD jako např. vnitřní výplně a výztuhy dveří apod. Dále bylo nutné uzavřít vzniklé mezery po umazání nepotřebných detailů a také spojit jednotlivé části kabiny do uzavřené obálky. Veškerá tato práce byla provedena v programu Rhinoceros. Po vytvoření geometrie bez závažnějších chyb byl soubor ve formátu „igs“ nahrán do simulačního programu Star-CCM+. Zde byla geometrie dále upravována editačními nástroji pro tvorbu povrchu. Výhoda formátu „igs“ oproti např. „stl“ spočívala hlavně v zachování rozdělení kabiny na jednotlivé části tak, aby bylo možné snadno předepsat okrajové podmínky do modelu.

Tato podkapitola shrnuje základní příkazy úprav geometrie vedoucí k jejímu zjednodušení. Více informací lze vždy nalézt v manuálu daného programu. Zde jsou uvedeny pouze ty příkazy, které byly použity při tvorbě zjednodušené geometrie za účelem následné CFD simulace.

4.1. Využití programu Rhinoceros

Program Rhinoceros 5 bylo možné stáhnout zdarma z oficiálních internetových stránek (www.rhino3d.com) jako zkušební 90ti denní verzi. Pro práci na úpravách geometrie v programu Rhinoceros byly použity příkazy uvedené v tabulce 4.1. Více informaci lze získat v manuálu: (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, RHINOCEROS 5, 2016).

Tabulka 4.1 Základní příkazy na úpravu geometrie v programu Rhinoceros.

Příkaz	Funkčnost příkazu
EdgeSrf	Vytvoří plochu mezi 2 až 4 křivkami v rovině, částečně i v prostoru.
Loft	Vytvoří plochu mezi 2 křivkami.
Patch	Vytvoří vyhlazenou plochu mezi libovolným počtem hran.
Split	Rozdělí uzavřené křivky ležící na ploše na 2 plochy z původní 1.
SplitEdge	Rozdělí jakoukoli hranu na více úseků dle volby.
Trim	Stříhá objekty vůči sobě samým.
Pause	Protáhne křivku po ose.
Undo	Krok zpět.
Project	Promítne např. křivku do zvolené plochy.
ExtrudeCrvAlongCrv	Protáhne křivku podél zvolené křivky.
Join	Spojí libovolný počet jakýchkoliv objektů do jednoho.
JoinEdges	Spojí a vytvoří jednu křivku z mnoha.
SplitMeshEdge	Rozdělí hranu sítě dle výběru.
ExtractMeshEdges	Rozdělí nesvařené křivky a části sítě od původní sítě.
PatchSingleFace	Spojí 2 hrany sítě dle výběru.
DupMeshEdge	Vytvoří křivku po výběru hrany sítě.
NetworkSrf	Vytvoří velmi podrobnou plochu ze sítě křivek.

Pozn.: Seřazení příkazů v tabulce bylo zvoleno od nejpoužívanějších po méně často používané.

4.2. Využití programu Star-CCM+

Přístup k programu Star-CCM+ byl získán díky licenčnímu číslu, které bylo vygenerováno odborem Termomechaniky a techniky prostředí na VUT v Brně. Základní příkazy k úpravě geometrie v programu Star-CCM+ byly uvedeny níže. Více informací lze nalézt v manuálu: (CD-ADAPCO. STAR-CCM+®, 2015).

Zrcadlení

Pro zrcadlení objektů (částí importované geometrie) se zachováním okrajových podmínek (dále OP) je zapotřebí zkopírovat objekty, které budou zrcadleny a vytvořit z nich duplikát. Po kliknutí pravým tlačítkem myši (dále PTM) na zvolený objekt a příkazu „copy“ vložíme zkopírovaný objekt příkazem „paste“ PTM na složku „Regions“. Tím se duplikuje vybraný objekt, který je zapotřebí zrcadlit PTM a příkazy „transform“ a „reflect“. Takto zrcadlený objekt je zapotřebí vložit do původního „Regionu“. A to z důvodu následné práce na geometrii, např. pro příkaz vyplňování děr geometrie. Pokud by tak nebylo učiněno, nebyla by operace uskutečnitelná. Označením prvního regionu zaručíte jeho nepřejmenování a označením druhého regionu a funkcí „combine“ PTM tyto regiony sloučíte do jednoho. Druhý označený objekt je tedy sloučen s prvním označeným a jeho OP zanikají.

Ještě před sloučením objektů, resp. regionů, doporučuji použít funkci „zip selected edges“ ke svaření přilehlých objektů v geometrii. Tento krok usnadňuje další práci. Svaření objektů po sloučení je mnohdy obtížnější. K vymazání regionů je zapotřebí nejdříve vymazat veškerou generovanou sít a to tlačítkem „clear generated mesches“.

Hraniční křivky (Features curves)

K vytvoření kvalitní sítě je zapotřebí definovat hraniční křivky tzv. „features curves“ (dále FC). FC zachovávají ostrou hranu po celé délce křivky, tím je ovlivněna kvalita povrchové sítě. Lze je generovat automaticky podle předem definovaných vlastností jako např. úhel sklonu geometrie. Pro definovaný úhel 50° se vytvoří FC tam, kde v importované geometrii na sebe přiléhají plochy s úhlem 50° a ostřejší úhly.

Lokální zjemnění sítě

Pro lokální zjemnění sítě lze použít libovolný blok, kterým definujete jeho okraje a jeho vnitřní podmínky ke generování buněk. Blok vložíte následovně: Tools – Volume shapes – New shape – Blok. Poté je zapotřebí vložit blok do síťovacího procesu: Continua – Mesh – Volumetric controls – New – Edit. Následným vybráním a vložením již vytvořených bloků lze změnit tyto oblasti vůči základní velikosti buňky.

Vytvoření povrchové a objemové sítě

Kvalita objemové sítě závisí i na kvalitě povrchové sítě. Pro kontrolu kvality povrchové sítě vložené geometrie je příhodné vytvořit povrchovou síť funkcí „Generate surface mesh“. Objemová síť se vytváří funkcí „Generate volume mesh“.

Vytvoření roviny

Kvalita objemové sítě se nejčastěji pozoruje na rovinách. Rovinu lze vytvořit cestou: Derived parts – New part – Section – Plane. Po otevření nové scény „Mesh“ je zapotřebí v záložce „Scene/Plot“ zobrazit nově vytvořené roviny a to cestou: Displayers – Geometry – Parts – Edit.

Export

Pro exportování geometrie do typu „.nas“ nebo „.stl“ je zapotřebí označit objekty ve složce Reprezentations – Import – Regions. Exportování objektů přímo z hlavní složky Regions neumožňuje zachovávat okrajové podmínky.

Dodatek

Po dokončeném procesu úpravy modelu, a to zejména uzavření ploch modelu, je zapotřebí vygenerovat nejdříve povrchovou a poté objemovou síť. Nastavují se zejména základní velikosti buněk. Následně je možné spustit numerickou simulaci. Podrobné nastavení je uvedeno v kapitole 7 Nastavení simulace.

5 IDENTIFIKACE MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ VOZU

V následující tabulce 5.1 byly uvedeny všechny potřebné materiálové vlastnosti vozu k definování numerického výpočtového programu.

Emisivita byla definována vnější i vnitřní a společně i s transmisivitou byly definovány zvlášť pro krátkovlnné a dlouhovlnné záření. Celé spektrum simulovaného slunečního záření bylo zapotřebí rozdělit z důvodu velmi rozdílných materiálových vlastností emisivit a transmisivit u skel pro níže uvedené vlnové délky. Tento důvod rozdělení byl vzhledem ke skleníkovému efektu důležitý z hlediska akumulace energie uvnitř vozu a přiblížení se k reálnému stavu. Vlnová délka krátkovlnného záření byla definována pro rozmezí 0,02–2,5 µm a dlouhovlnné záření 2,5–1000 µm (STOFFER, 2016). Transmisivita pro okna byla stanovena na hodnotu 0,5 pro krátkovlnné záření a pro dlouhovlnné záření na hodnotu 0 (PILKINGTON GLASS HANDBOOK, 2010). Znamená to, že krátkovlnné záření projde zvenčí oknem dovnitř a narazí na plochu interiéru vozu, tím se změní charakter vlnění na dlouhovlnný a po té dlouhovlnné záření neprojde zpět oknem ven z kabiny, ale odrazí se zpět od okna do kabiny a zůstává uvnitř. Krátkovlnná emisivita skel byla definována ze zdroje (PILKINGTON GLASS HANDBOOK, 2010) a ostatní emisivity byly definovány ze zdroje (POKORNÝ, 2015).

Tepelný odpor byl definován ze znalosti všech materiálů nacházejících se ve vrstvách vozu mezi interiérem a exteriérem. Známy byly všechny součinitele tepelné vodivosti a tloušťky jednotlivých vrstev. Např. tepelný odpor střechy byl 0,674 $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$. Bylo využito i znalosti tepelného odporu vzduchové kavity z nomy ČSN 73 0540-3 v tabulce E1 (ČSN 73 0540-3, 2005). Bližší výpočet tepelného odporu nebyl uveden z důvodu citlivosti dat.

Tabulka 5.1 Materiálové vlastnosti vozu.

<table>
<tr><th rowspan="3">Hranice okrajových podmínek</th><th rowspan="3">Tepelný odpor</th><th colspan="4">Emisivita</th><th colspan="2" rowspan="2">Transmisivita</th></tr>
<tr><th colspan="2">Vnější</th><th colspan="2">Vnitřní</th></tr>
<tr><th>K</th><th>D</th><th>K</th><th>D</th><th>K</th><th>D</th></tr>
<tr><th>[m²·K·W⁻¹]</th><th colspan="6">[-]</th></tr>
<tr><td>Okna boční</td><td>0,004</td><td rowspan="3">0,45</td><td rowspan="3">0,87</td><td rowspan="3">0,45</td><td rowspan="3">0,87</td><td rowspan="3">0,50</td><td rowspan="3">0,00</td></tr>
<tr><td>Okno zadní</td><td>0,004</td></tr>
<tr><td>Okno čelní</td><td>0,008</td></tr>
<tr><td>Palubní deska</td><td>0,299</td><td colspan="2">0,97</td><td colspan="2" rowspan="9">0,97</td><td colspan="2" rowspan="9">0,00</td></tr>
<tr><td>Dveře</td><td>0,351</td><td colspan="2">0,80</td></tr>
<tr><td>Podlaha</td><td>0,813</td><td colspan="2">0,90</td></tr>
<tr><td>Sloupky</td><td>0,346</td><td colspan="2">0,80</td></tr>
<tr><td>Střecha</td><td>0,674</td><td colspan="2">0,80</td></tr>
<tr><td>Sedadla zadní</td><td>1,014</td><td colspan="2">0,90</td></tr>
<tr><td>Středový tunel</td><td>0,824</td><td colspan="2">0,90</td></tr>
<tr><td>Kryt kufru</td><td>0,045</td><td colspan="2">0,97</td></tr>
<tr><td>Přívodní kanály
Sedadla přední</td><td colspan="6">*</td></tr>
</table>

Pozn.: K – krátkovlnné záření (0,02–2,5 µm), D – dlouhovlnné záření (2,5–1000 µm),
** – adiabatická stěna*

6 PŘÍPRAVA OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

V této kapitole byly definovány okrajové podmínky (dále OP). V případě CFD modelování proudění vzduchu uvnitř vozu jsou OP zejména rychlost a teplota přiváděného vzduchu, teplota okolí a intenzita solárního záření. OP mají zásadní vliv na výsledky simulace.

K definování teplot přiváděného vzduchu, teploty okolí a solárního záření byla použita data z měření, které probíhalo v klimatické komoře NETME centra na VUT FSI na reálném voze Škoda Octavia Combi III v letech 2014/2015. Data byla naměřena v rámci projektu „Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka“ (dále CKAP). Zpráva „Databáze dat okrajových podmínek pro validaci simulačního nástroje kabiny“ obsahuje výsledky různých měření, ze kterých bylo v této práci čerpáno, viz zdroj: (POKORNÝ, 2015). Cílem provedených testů bylo sledovat co se děje s rozložením povrchových teplot a teplot vzduchu ve voze. Byly testovány zimní, jarní, resp. podzimní, a letní podmínky v rozsahu teplot klimatické komory od −20 °C do +40 °C.

Ve výše zmíněných měřeních v daných podmínkách nebyly měřeny rychlosti vzduchu na jednotivých vyústkách, nepřímo byl měřen pouze celkový hmotnostní tok vstupujícího vzduchu do vnitřního prostoru automobilu. Z práce (PLANKA, 2015) bylo zjištěno procentuální zastoupení hmotnostního toku jednotlivými vyústkami a přepočtem uvedeným tabulkovou formou v podkapitole 6.3 Teplota a rychlost přiváděného vzduchu byly definovány rychlosti na jednotlivých vyústkách. Měření v obou výše uvedencýh pracích probíhala za velmi podobných podmínek (viz tabulky 6.1 a 6.2).

V následujících podkapitolách byly uvedeny další informace OP podrobně pro zimní, jarní a letní případy.

6.1. OP v klimatické komoře

V klimatické komoře lze dosáhnout takových vlastností vzduchu, které odpovídají zvolenému testovanému období. V možnostech klimakomory je i zdroj solárního záření, který nahrazuje sluneční svit (viz obrázek 6.1). V této práci bylo počítáno s intenzitou solární radiace do 800 W/m^2, směr záření byl přímo kolmý na střechu (90° elevační úhel).

Obrázek 6.1 Testovaný vůz v klimatické komoře v NETME Centru na VUT FSI v Brně (NETME CENTRUM, 2018).

Pro tuto diplomovou práci byly vybrány zimní, jarní a letní podmínky. Tyto případy byly proměřeny, ve zdroji: (POKORNÝ, 2015). Pouze zimní případ HVAC off, tzv. parkovací mód, nebyl proměřen. V práci byl uveden z důvodu zajímavosti a porovnání teplotních polí vůči jarnímu a letnímu případu.

Teplota okolí byla průměrná teplota obklopující celý vůz v prostoru klimatické komory. Solární intenzita byla uváděna jako celková, tedy součet přímého a difuzního záření. Difuzní záření bylo vždy staveno na 50 W, tzn. např. pro letní případ 750 W přímého záření a 50 W difuzního záření. Sloupec v tabulce s označením „Teplota HVAC“ znázorňuje teplotu, která byla nastavena na klimatizaci ve voze na přístrojové desce. Vždy se jednalo o automatický režim klimatizace. Pro zimní případ byla teplota okolí −20 °C a aby byla splněna požadovaná teplota uvnitř vozu 22 °C, musel systém HVAC přivádět vzduch do prostoru kabiny o takových parametrech, aby bylo dosaženo teploty 22 °C. V případech HVAC off byla klimatizace vypnuta, do vnitřního prostoru vozu nebyl přiváděn žádný vzduch, jednalo se o tzv. parkovací stav.

Tabulka 6.1 zobrazuje podmínky v klimatické komoře během měření CKAP (vyjma 2. případu – ten měřen nebyl), teplotu okolí, intenzitu solárního záření, nastavení teploty systému HVAC a celkový hmotnostní tok proudící vyústkami do prostoru kabiny automobilu. Tyto zvolené případy, které byly simulovány ve výpočetním programu Star-CCM+ byly podrobněji popsány v následujících kapitolách.

Tabulka 6.1 Podmínky při realizaci experimentu v projektu CKAP.

Př.	Období	Teplota okolí [°C]	Intenzita solárního záření [W/m^2]	Teplota HVAC [°C]	Celkový hmotnostní tok [g/s]
1	Zima	−20	0	22	62,8
2	Zima	−20	300	HVAC off	0,0
3	Jaro	10	500	18	49,9
4	Jaro	10	500	HVAC off	0,0
5	Léto	30	800	24	56,7
6	Léto	30	800	HVAC off	0,0

Následující tabulka zobrazuje podmínky v klimakomoře a nastavení teploty systému HVAC při měření v práci (PLANKA, 2015). Podmínky jsou velmi podobné s podmínkami, při kterých byly měřeny teploty v rámci projektu CKAP, resp. ze zdroje (POKORNÝ, 2015), ze kterého bylo vycházeno pro OP, a proto lze naměřená data z obou měření sloučit. Důvod sloučení dat byl uveden v 3. odstavci kapitoly 6 Příprava okrajových podmínek. Do vstupních hodnot pro simulování ve výpočetním programu byla tato sloučená data více než dostačující.

Tabulka 6.2 Podmínky při realizaci experimentu v BP Plánky.

Období	Teplota okolí [°C]	Intenzita solárního záření [W/m^2]	Teplota HVAC [°C]	Celkový hmotnostní tok [g/s]
Zima	-2	0	18	43,2
Jaro	16	400	22	44,5
Léto	30	800	23	55,5

Pozn.: Uváděný hmotnostní tok je bez zastoupení středových vyústek v zadní části vozu G1 a G2. V letním období navíc není uvažováno se zastoupením hmotnostního toku na nohy, tedy vyústek E až H (důvod zmíněn v odstavci nad tabulkou 6.6), označení vyústek viz obr. 6.2.

6.2. OP součinitele přestupu tepla a teploty okolí

Následující tabulka 6.3 zobrazuje součinitele přestupu tepla na vnější straně modelu a teploty okolí jednotlivých okrajových podmínek tak, jak byly v autorem vytvořeném modelu rozděleny. Pouze zadní sedadlo je specifické v tom, že bylo rozděleno na část spodní a část horní. Horní část byla spojena s prostorem kufru. V zimním případě HVAC on, resp. se spuštěným vytápěním, byla teplota okolí vozu a teplota v kufru velmi rozdílná. Rozdělením zadní sedačky na dvě části a předepsáním přijatelnějších teplot okolí bylo dosaženo korektnějšího výsledku simulace. Pro oblast kufru v zimním případu bylo uvažováno s teplotou 20 °C. Pro letní případ HVAC off bylo uvažováno s teplotou 42 °C v oblasti kufru. Obě teploty byly stanoveny z měření ze zdroje (POKORNÝ, 2015). Tyto teploty okolí byly tedy zadány pro kryt kufru a horní část zadních sedadel sousedících s prostorem kufru. Pak na řádku Sedadla zadní ve sloupci Zima HVAC on značila hodnota −20/20 teplotu okolí −20 °C zadávané pro spodní část zadních sedadel a 20 °C zadávaných pro horní část zadních sedadel. Pro ostatní případy nebyla hranice OP zadních sedadel rozdělena z důvodu nízkého teplotního rozdílu.

Součinitel přestupu tepla na vnější straně geometrie byl vzhledem k rychlosti vzduchu kolem vnější karoserie od 0,5 do 3,5 m/s v rozmezí 7,0–18,5 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Pro přední část vozu, čelní skla, platila hodnota součinitele přestupu tepla 18,5 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, v těchto místech byla změřena rychlost 3,5 m/s. V zadní části vozu byla rychlost vzduchu během měření podstatně nižší než v přední části. Pro zadní skla byla hodnota součinitele přestupu tepla stanovena na hodnotu 7,0 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$, této hodnotě odpovídala rychlost vzduchu 0,5 m/s. Stejná hodnota součinitele přestupu tepla 7,0 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ byla přiřazena i hranicím OP krytu kufru a palubní desce. Hodnoty součinitele přestupu tepla byly získány ze zdroje: (POKORNÝ, 2015).

Všechny hodnoty okrajových podmínek uvedených v následující tabulce 6.3 byly nastaveny do modelu pro numerické simulování do výpočetního programu Star-CCM+.

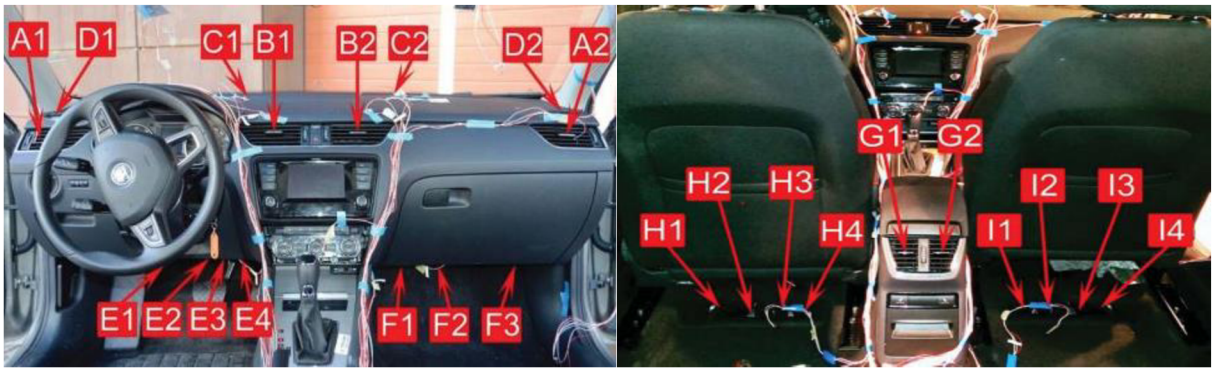
Tabulka 6.3 Okrajové podmínky součinitele přestupu tepla a teploty okolí.

<table>
<tr><th rowspan="3">Hranice OP</th><th rowspan="3">Součinitel přestupu tepla</th><th colspan="6">Teplota okolí</th></tr>
<tr><th colspan="2">Zima</th><th colspan="2">Jaro</th><th colspan="2">Léto</th></tr>
<tr><th>HVACon</th><th>HVACoff</th><th>HVACon</th><th>HVACoff</th><th>HVACon</th><th>HVACoff</th></tr>
<tr><td></td><td>[$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]</td><td colspan="6">[°C]</td></tr>
<tr><td>Okna boční</td><td>12,2</td><td rowspan="8">−20</td><td rowspan="13">-20</td><td rowspan="10">10</td><td rowspan="13">10</td><td rowspan="13">30</td><td rowspan="8">30</td></tr>
<tr><td>Okno zadní</td><td>7,0</td></tr>
<tr><td>Okno čelní</td><td>18,5</td></tr>
<tr><td>Dveře</td><td>12,2</td></tr>
<tr><td>Podlaha</td><td>11,2</td></tr>
<tr><td>Sloupky</td><td>12,2</td></tr>
<tr><td>Střecha</td><td>13,5</td></tr>
<tr><td>Středový tunel</td><td>11,2</td></tr>
<tr><td>Sedadla zadní</td><td>9,1</td><td>−20/20</td><td>30/42</td></tr>
<tr><td>Kryt kufru</td><td>7,0</td><td>20</td><td>42</td></tr>
<tr><td>Palubní deska</td><td>7,0</td><td>31</td><td>30</td><td>30</td></tr>
</table>

Pozn.: Sedadla zadní jsou rozdělena na horní část sousedící s prostorem kufru a spodní část.

6.3. Teplota a rychlost přiváděného vzduchu

Tato kapitola prezentuje postup dosažení rychlosti přiváděného vzduchu do kabiny automobilu vyústkami pro zimní, jarní a letní podmínky v režimu HVAC on. Tabulky byly uspořádány prioritně podle teploty přiváděného vzduchu, která byla změřena ve zdroji (POKORNÝ, 2015). Následující obrázek 6.2 zobrazuje označení vyústek, které pomohou v orientaci.



Obrázek 6.2 Označení vyústek, převzato ze zdroje: (PLANKA, 2015).

Procentuální zastoupení hmotnostního toku jednotlivými vyústkami byl zjištěn ze zdroje (PLANKA, 2015). Přepočet úsťové rychlosti z vyústek proběhl tak, aby byl zachován celkový hmotnostní tok zjištěný ve zdroji (POKORNÝ, 2015).

Tabulka 6.4 Přepočet rychlosti, ***zimní případ HVAC on.***

Popis vyústek zima HVAC on			Procentuální zastoupení hmot. toku	Hmotnostní tok	Teplota přiváděn. vzduchu	Hustota	Objem. tok	Plocha vyústek	Rychlost
Popis		Ozn.	[%]	[g/s]	[°C]	[kg/m³]	[l/s]	[cm²]	[m/s]
Horní část	Levá	A1	13,3	8,32	43,1	1,116	7,46	30,2	**2,47**
		D1	1,6	1,04			0,93	20,2	**0,46**
	Pravá	A2	12,4	7,81	43,0	1,117	6,99	30,2	**2,31**
		D2	1,4	0,87			0,78	20,2	**0,38**
	Střed	B1	4,4	2,73	42,6	1,118	2,44	41,9	**0,58**
		B2	3,0	1,86			1,66	41,9	**0,40**
	Defr.	C1	11,7	7,34	53,0	1,082	6,78	54,2	**1,25**
		C2	8,2	5,15			4,76	54,1	**0,88**
Spodní část	Přední část	E1	2,8	1,79	56,6	1,071	1,67	13,4	**1,24**
		E2	1,3	0,83			0,78	8,5	**0,92**
		E3	1,7	1,07			0,99	9,3	**1,06**
		E4	1,3	0,81			0,75	6,2	**1,22**
		F1	2,9	1,80	51,9	1,086	1,66	14,5	**1,14**
		F2	4,0	2,49			2,29	13,6	**1,68**
		F3	2,3	1,47			1,35	12,0	**1,13**
	Zadn.	H1-4	14,2	8,93	48,5	1,098	8,13	42,5	**1,91**
		I1-4	13,6	8,52	43,7	1,114	7,64	42,4	**1,80**
Celková suma			100,0	62,80	-	-	57,06	455,3	-
Vážený průměr			-	-	47,7	1,101	-	-	1,61

Následující odstavec popisuje způsob, jakým bylo dosaženo hodnot v uváděných tabulkách 6.4, 6.5 a 6.6.

Z kombinace měřeného celkového hmotnostního toku a procentuálního zastoupení hmotnostního toku byl zjištěn hmotnostní tok jednotlivými vyústkami uváděný v jednotkách g/s. Hustota byla spočítána ze stavové rovnice při uvažovaném tlaku 101 325 Pa. Objemový tok byl dopočítán z hmotnostního toku a hustoty. Plocha Inlet vyústek byla zjištěna ve vytvořeném modelu automobilu v programu Star-CCM+ na vygenerované objemové síti. Rychlost byla dopočítána ze znalosti objemového toku a plochy vyústky.

Tabulka 6.5 Přepočet rychlosti, ***jarní případ HVAC on.***

Popis vyústek jaro HVAC on			Procentuální zastoupení hmot. toku	Hmotnostní tok	Teplota přiváděn. vzduchu	Hustota	Objem. tok	Plocha vyústek	Rychlost
Popis		Ozn.	[%]	[g/s]	[°C]	[kg/m³]	[l/s]	[cm²]	[m/s]
Horní část	Levá	A1	13,3	6,64	17,4	1,215	5,46	30,2	**1,81**
		D1	1,9	0,95			0,78	20,2	**0,39**
	Pravá	A2	11,8	5,91	17,4	1,215	4,86	30,2	**1,61**
		D2	1,5	0,76			0,62	20,2	**0,31**
	Střed	B1	2,5	1,25	18,1	1,212	1,03	41,9	**0,25**
		B2	1,2	0,60			0,49	41,9	**0,12**
	Defr.	C1	11,3	5,62	22,5	1,194	4,71	54,2	**0,87**
		C2	10,6	5,31			4,45	54,1	**0,82**
Spodní část	Přední část	E1	3,2	1,59	24,2	1,187	1,34	13,4	**1,00**
		E2	1,4	0,71			0,60	8,5	**0,71**
		E3	1,6	0,81			0,68	9,3	**0,73**
		E4	1,7	0,86			0,73	6,2	**1,18**
		F1	5,3	2,63	22,4	1,195	2,20	14,5	**1,51**
		F2	4,3	2,17			1,82	13,6	**1,34**
		F3	3,1	1,57			1,31	12,0	**1,09**
	Zadn.	H1-4	12,8	6,38	24,7	1,185	5,38	42,5	**1,27**
		I1-4	12,4	6,19	28,8	1,169	5,30	42,4	**1,25**
Celková suma			100,0	49,94	-	-	41,76	455,3	-
Vážený průměr			-	-	22,1	1,196	-	-	1,20

Velmi podobným způsobem byla zjištěna rychlost Inletů pro letní podmínky. Znatelný rozdíl nastal ve vyústkách, které směřují na nohy, a to jak v přední, tak i v zadní části vozu (E až H). Procentuální zastoupení hmotnostního toku těchto vyústek tvořilo méně než 5 % z celkového hmotnostního toku, a proto nebylo s těmito vyústkami v simulaci vůbec uvažováno. Navíc měřené teploty ve vyústkách na nohy v přední i zadní části vozu byly srovnatelné s teplotou okolí. Tento fakt byl dán zapnutým automatickým režimem klimatizace, ten dokáže uzavírat klapky různých přívodních kanálu dle potřeby.

*Tabulka 6.6 Přepočet rychlosti, **letní případ HVAC on**.*

Popis vyústek léto HVAC on			Procentuální zastoupení hmot. toku	Hmotnostní tok	Teplota přiváděn. vzduchu	Hustota	Objem. tok	Plocha vyústek	Rychlost
Popis		Ozn.	[%]	[g/s]	[°C]	[kg/m^3]	[l/s]	[cm^2]	[m/s]
Horní část	Levá	A1	18,3	10,37	13,0	1,234	8,40	30,2	**2,78**
		D1	0,8	0,47			0,38	20,2	**0,19**
	Pravá	A2	17,8	10,09	12,5	1,236	8,16	30,2	**2,70**
		D2	0,8	0,45			0,36	20,2	**0,18**
	Střed	B1	18,9	10,71	11,5	1,240	8,63	41,9	**2,06**
		B2	20,5	11,62			9,37	41,9	**2,24**
	Defr.	C1	15,1	8,56	18,8	1,209	7,08	54,2	**1,31**
		C2	7,8	4,44			3,67	54,1	**0,68**
Celková suma			100,0	56,69	-	-	46,05	292,8	-
Vážený průměr			-	-	13,6	1,231	-	-	2,09

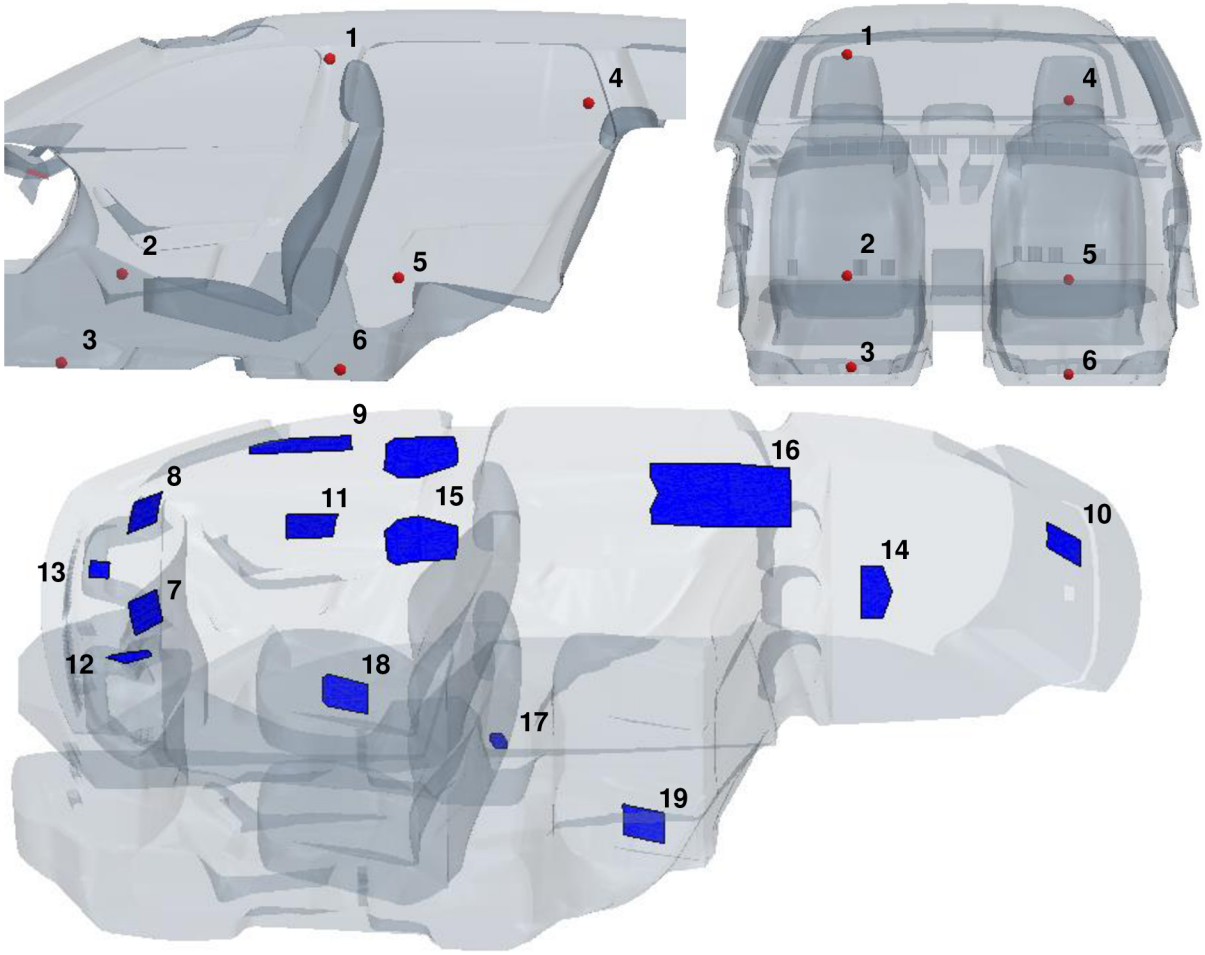
6.4. Umístění sledovaných míst v automobilu

Pro měření teplot v blízkosti povrchů byly použity plošné (typ P – viz obrázek 6.3) a proudové (typ B – viz obrázek 6.4) odporové teploměry Pt100. V oblasti hlavy a trupu byly teploty měřeny bezdrátovými sondami od firmy Testo (typ 435 – viz obrázek 6.3 vpravo). K měření rychlosti proudění vzduchu na vnější straně vozu byla použita kombinovaná sonda od firmy Testo. Znalost umístění měřících sond v kabině byla nutná pro zvolení polohy monitorovacích bodů v modelu pro simulování. Více podrobností lze nalézt ve výše uvedeném projektu CKAP, resp. ze zdroje: (POKORNÝ, 2015).

Obrázek 6.3 Ukázka měření teploty sondou Pt100 typu P na povrchu předního sedadla (vlevo) a měření vzduchu v úrovni sedadla sondou Testo (vpravo), převzato ze zdroje: (POKORNÝ, 2015).

Obrázek 6.4 Ukázka měření teploty přiváděného vzduchu sondou Pt100 typu B na nohy v zadní části vozu, převzato ze zdroje: (POKORNÝ, 2015).

Následující obrázek 6.5 zobrazuje umístění sledovaných míst v modelu vozu. Místa byla navržena v podobnosti s měřenými místy v projektu CKAP. Teploty vzduchu byly měřeny v úrovních nohou, sedadla a hlavy v přední části na straně spolujezdce a v zadní části na straně řidiče. Sledovaná místa povrchových teplot byla zejména čelní sklo, sklo přední u spolujezdce, sklo zadní, střecha v přední i zadní části, sedadla, dveře u spolujezdce, podlaha v zadní části, kryt kufru a palubní deska. Popis očíslovaných míst byl uveden v tabulce 6.7.



Obrázek 6.5 Schéma umístění sledovaných míst ve voze.

Tabulka 6.7 Popis očíslovaných sledovaných míst.

1	Spolujezdec úroveň hlavy	7	Čelní sklo levé	14	Kryt kufru
2	Spolujezdec úroveň sedadla	8	Čelní sklo pravé	15	Střecha přední průměr
3	Spolujezdec úroveň nohou	9	Okno pravé přední	16	Střecha zadní ve středu
4	Pasažér ZL úroveň hlavy	10	Okno zadní	17	Podlaha zadní vpravo
5	Pasažér ZL úroveň sedadla	11	Dveře pravé přední	18	Sedadlo přední vpravo
6	Pasažér ZL úroveň nohou	12	Palubní deska vlevo	19	Sedadlo zadní vlevo
		13	Palubní deska vpravo		

Pozn.: ZL – zadní část vozu vlevo (místo za řidičem).

7 NASTAVENÍ SIMULACE

V této kapitole byla definována základní nastavení simulace. Již importovaná geometrie vozu byla editačními nástroji programu Star-CCM+ upravena a objemově uzavřena. Dalším krokem bylo zapotřebí nastavit simulaci tak, aby byly získány korektní výsledky. Tzn. vhodná volba modelů generujících síť, základní velikost (Base Size) povrchové a objemové buňky, prizmatické vrstvy, definování OP a vhodné nastavení reportů sledujících požadované veličiny.

7.1. Nastavení modelů sítě

Geometrie vozu se mezi simulacemi se zapnutým a vypnutým systémem HVAC mírně lišila. V případech s vypnutým HVAC systémem byly z geometrie vozu odebrány přívodní kanály, protože nebyl vzduchu do kabiny přiváděn. Extrudéry nahrazující přívodní kanály byly také zrušeny. Pro případy s přívodem vzduchu byly vybrány následující modely:

- Extruder
- Polyhedral Mesher
- Prism Layer Mesher
- Surface Remesher

U modelu Polyhedral Mesher byly změněny optimalizační cykly na hodnotu 3 a Quality Threshold na hodnotu 0,8. Změny zvyšují kvalitu generované sítě a zajišťují nezáporné buňky sítě (CD-ADAPCO. STAR-CCM+®, 2015). Ostatní nastavení zůstalo v defaultním nastavení.

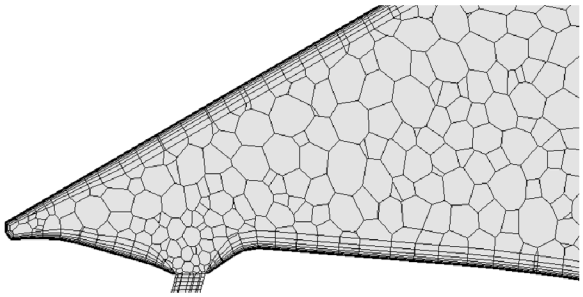
7.2. Povrchová a objemová síť

Následující řádky obsahují základní informace o velikosti povrchové a objemové sítě. Takto vygenerovaná objemová síť obsahovala 3,6 milionu buněk. Obrázek 7.1 zobrazuje povrch. síť.

- Base Size: 12 mm
- Prism Layer Thickness: 8 mm
- Number of Prism Layers: 10
- Prism Layer Stretching: 1,5
- Surface Target Size: 12 mm
- Surface Minimum Size: 9,6 mm
- Surface Growth Rate: 1,25

Obrázek 7.1 Povrchová síť, pohled do kabiny automobilu.

Povrchová oblast v okolí INLET části geometrie byla zjemněna na povrchovou velikost buňky 6 mm, a to z důvodů zachování přesnosti plochy vyústky (viz obrázek P5 v tištěné příloze). Obrázek 7.2 zobrazuje objemovou síť v podélném řezu palubní deskou, extruderem defrostu a čelním sklem. Podél okrajů definované geometrie byla vygenerována mezní vrstva. Podélné buňky u okraje přecházejí do tvaru vícestranných buněk uprostřed objemu geometrie.



Obrázek 7.2 Řez objemovou sítí středem palubní desky a čelního skla.

7.3. Použité typy okrajových podmínek

Typy okrajových podmínek, které byly použity v modelu:

- Wall – Definuje vnější a vnitřní okraje oblasti. Tepelné vlastnosti stěny mohou být definovány několika způsoby, v této práci byly použity pouze tyto: adiabatická stěna – dokonale izolovaná stěna, tepelný tok stěnou je roven nule; environment – definování teploty povrchu stěny a tepelného odpor stěny.
- Preassure Outlet – Definuje většinou volný okraj domény, nebo otvor na okraji oblasti. Tato OP je vhodná v případě, že není definována hodnota vstupní či výstupní rychlosti. Umožňuje současný vstup a výstup tekutiny v různých částech otvoru.
- Velocity Inlet – Definuje rychlost vstupujícího proudu do oblasti, teplotu proudícího média a radiační vlastnosti vstupu (CD-ADAPCO. STAR-CCM+®, 2015).

7.4. Nastavení fyzikálních modelů

Ve výpočetním programu byly zvoleny následující fyzikální modely, podle kterých bylo dosaženo výsledků simulace. Pouze u zimního případu HVAC on se zapnutou ventilací nebyl zapnut fyzikální model Solar Loads, resp. solární záření, protože během tohoto měření nebyly v klimakomoře zapnuty solární lampy.

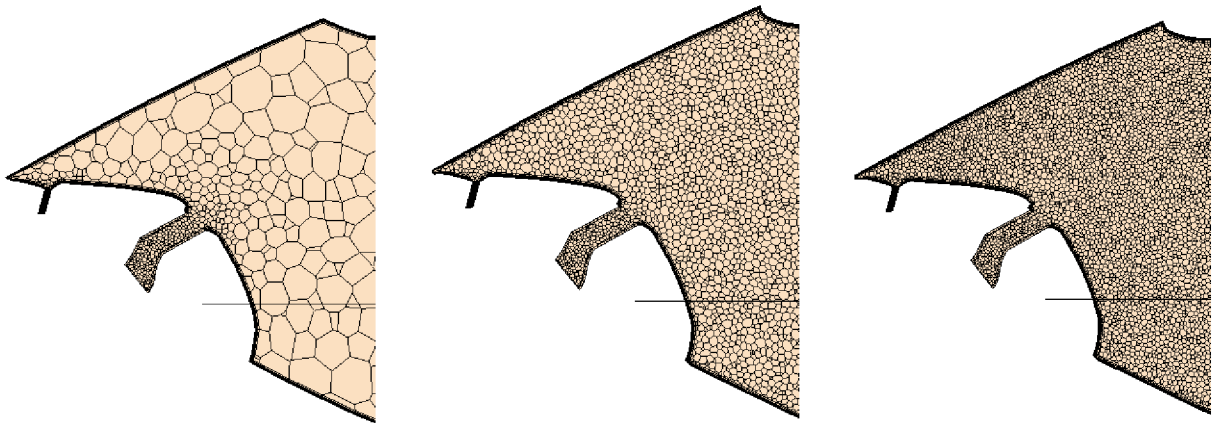
- All y+ Wall Treatmen
- Coupled Energy
- Coupled Flow
- Gas – Air
- Gradients
- Gravity
- Ideal Gas
- K-Omega Turbulence
- Multiband Thermal Radiation
- Radiation
- Reynolds-Averaged Navier-Stokes
- Solar Loads
- SST (Menter) K-Omega
- Steady
- Surface-to-Surface Radiation
- Three Dimensional
- Turbulent
- View Factors Calculator

7.5. Test nezávislosti sítě

Testem nezávislosti sítě byla prokázána nezávislost vygenerované objemové sítě na její základní velikosti Base Size resp. na celkovém počtu buněk. V této práci byly uváděny výsledky ze sítě o Base Size 12 mm o celkovém počtu buněk 3,6 milionu. Pro zimní případ HVAC on byla vygenerována jemnější síť o celkové počtu 8,4 milionu buněk. Na síti s větším

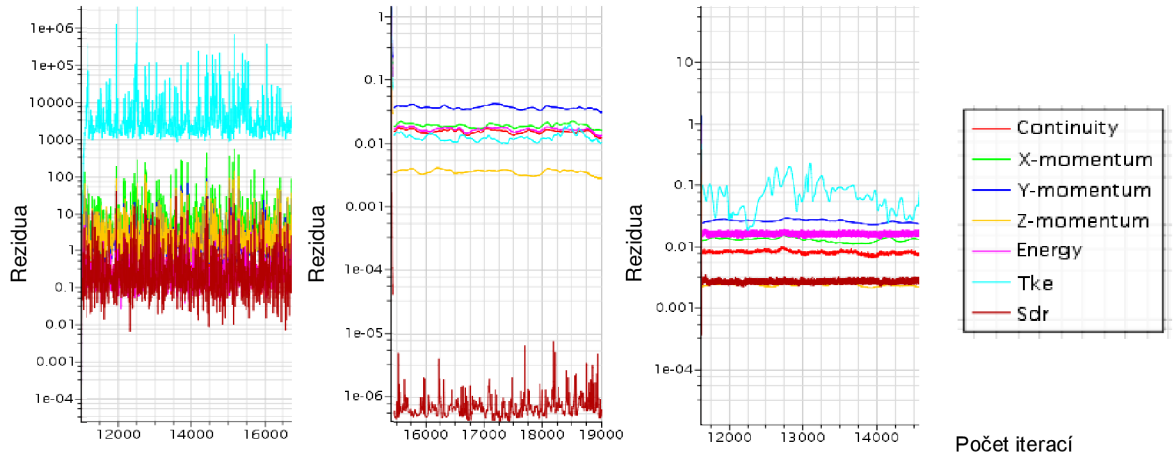
počtem buněk bylo zjištěno, že sledované teploty vzduchu a povrchů se v průměru lišily o méně než 0,7 °C. Rozdíly rychlostí ve sledovaných místech byly menší než 0,04 m/s. Z těchto důvodů lze síť o celkové velikosti 3,6 milionu buněk považovat za nezávislou. Důležité je dodat, že bylo zjištěno, že pouhým novým vygenerováním sítě beze změny geometrie a základní velikosti buňky, dochází k rozdílu výsledných sledovaných teplot o cca 0,1 až 0,4 °C.

Byla vygenerována také síť o celkovém počtu 0,5 milionů buněk. Zde bylo prokázáno, že takto hrubá síť není vhodná pro takto komplexní simulace. Rozdíly objemové sítě vřezu středem palubní desky, čelním sklem a přívodním kanálem vzduchu byly zobrazeny v obrázku 7.3 pro 0,5 mil. buněk, 3,6 mil. buněk a 8,4 mil. buněk.



Obrázek 7.3 Zobrazení rozdílu objemové sítě vřezu středem palubní desky, čelním sklem a přívodním kanálem vzduchu, vlevo 0,5 mil. buněk, uprostřed 3,6 mil. buněk a vpravo 8,4 mil. buněk.

V obrázku 7.4 byly prezentovány rozdíly reziduí mezi 0,5/3,6/8,4 mil. objemových buněk pro zimní případ HVAC on. Počet iterací není v uváděných řezech důležitý, takto zobrazená průměrná rezidua odpovídali více než 15 000 iterací, resp. průběh kmitání se opakoval. Důležitá je velikost rezidua. Simulace s 0,5 mil. buňkami rezidua dosahují více než hodnotě 1, např. veličina Tke zobrazující přesnost simulovaných teplot měla hodnotu rezidua více jak 1 000, což je k použití výsledků nepřípustné. Naopak rezidua u simulace s 8,4 mil. buňkami dosahují velmi podobných hodnot jako u simulace s 3,6 mil. buňkami



Obrázek 7.4 Porovnání reziduí, vlevo 0,5 mil. buněk, uprostřed 3,6 mil. buněk a vpravo 8,4 mil. buněk.

8 VÝSLEDKY SIMULACÍ

Následující podkapitoly obsahují výsledky simulací zimních, jarních/podzimních a letních případů se zapnutým a vypnutým systémem HVAC. U každého simulovaného případu je uvedena základní informace o vstupních datech, resp. o okrajových podmínkách, a výsledcích získaných ze simulace – část je prezentována formou rychlostních a teplotních polí a část je uvedena v tabulce průměrovanými hodnotami teploty a rychlosti vzduchu. Podkapitoly jsou seřazeny podle zapnuté a vypnuté klimatizace, nejdříve jsou uvedeny případy HVAC on a následně případy HVAC off.

Výsledná rychlostní a teplotní pole vzduchu v kabině jsou zobrazeny na obrázcích 8.1 – 8.12 a to vždy ve dvou řezech. Řez v levé části obrázku prochází úrovní těla řidiče a spolujezdce a řez v pravé části obrázku prochází sedadlem na straně spolujezdce a vyústkou na nohy v zadní části vozu. Pro zobrazení rychlostního pole byl vybrán režim „spektrum“, který využívá více barev k zobrazení sledované veličiny, tím vynikne rozdíl mezi jednotlivými rychlostmi. Bílá a růžová vyznačuje maximum a modrá a černá minimum. Pro zobrazení teplotního pole byl zvolen klasický režim „blue-red“, který využívá červené barvy jako maxima a modré barvy jako minima.

Uváděné rychlostní a teplotní pole u každé podkapitoly mělo svůj vlastní rozsah škály rychlostí [m/s] a teplot [°C], protože jedině tak vyniknul rozdíl v jednotlivých případech zvlášť. Přímé srovnání jednotlivých scénářů mezi sebou na sjednoceném rozsahu teplot byl vytvořen v následující kapitole 9 Vyhodnocení výsledků simulace, kde jsou jednotlivé případy porovnávány vůči sobě.

Na začátku každé podkapitoly je uvedena tabulka specifikující daný případ. Na levé straně tabulky jsou informace vstupující do modelu jako okrajové podmínky a na pravé straně tabulky informace vystupující ze simulace jako např. průměrná teplota vzduchu. Následující odstavec popisuje význam a obsah zmíněné tabulky.

Teplota a rychlost vzduchu byly aritmeticky průměrovány z celkem šesti bodově sledovaných míst. Sledované body byly umístěny u spolujezdce a pasažéra za řidičem (resp. v zadní části vozu na levé straně), a to vždy v úrovni hlavy, sedadla a nohou (přesné umístění ve voze viz obrázek v kapitole 6.4 Umístění sledovaných míst ve voze).

Pro snazší orientaci je pod tímto odstavcem uveden seznam sledovaných případů. První uváděná číslice náleží teplotě okolí [°C] a druhá číslice intenzitě solárního záření [W/m^2]. Podrobnější informace jednotlivých případů jsou uvedeny v kapitole 6 Příprava okrajových podmínek.

- Zima – HVAC on, −20 °C, 0 W/m^2
- Jaro – HVAC on, 10 °C, 500 W/m^2
- Léto – HVAC on, 30 °C, 800 W/m^2
- Zima – HVAC off, −20 °C, 300 W/m^2
- Jaro – HVAC off, 10 °C, 500 W/m^2
- Léto – HVAC off, 30 °C, 800 W/m^2

V simulacích nebylo uvažováno s vlhkostí vzduchu[1] byl uvažován pouze suchý vzduch. V zimním případě HVAC on byla v kabině auta změřena 3% RH, v jarním a letním případě HVAC on se RH pohybovala mezi 5 – 12 %, v jarním případě HVAC off se RH pohybovala mezi 20 – 28 % a v letním případě HVAC off se RH pohybovala mezi 9 – 16 %.

[1] Vlhkost vzduchu nebo také RH (Relative Humidity).

8.1. Zima HVAC on

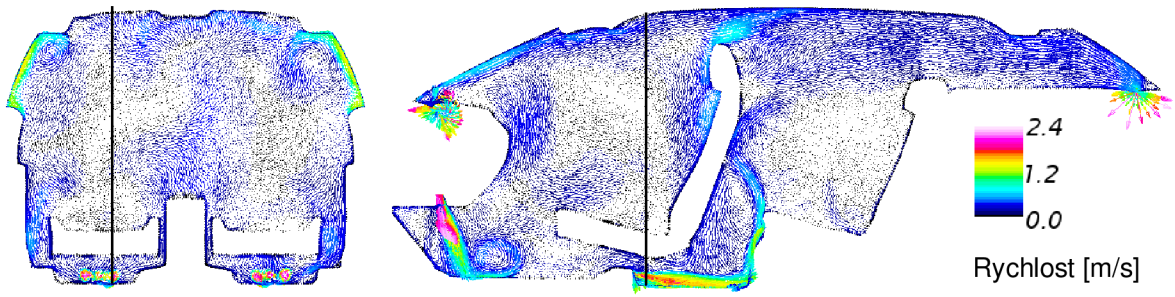
Zimní případ se zapnutou ventilací, resp. HVAC on, byl simulován pro teplotu okolí −20 °C a intenzitu solárního záření 0 W/m^2. Vzduch byl přiváděn do kabiny z vyústek o průměrné teplotě 47,7 °C, průměrné[2] rychlosti 1,61 m/s a o celkovém hmotnostním toku 62,8 g/s.

Ze simulace byly získány hodnoty průměrné teploty vzduchu v kabině 32,3 °C, průměrné rychlosti vzduchu v kabině 0,39 m/s a průměrné teploty odváděného vzduchu 25,1 °C z prostoru kabiny ven tzv. Outletem.

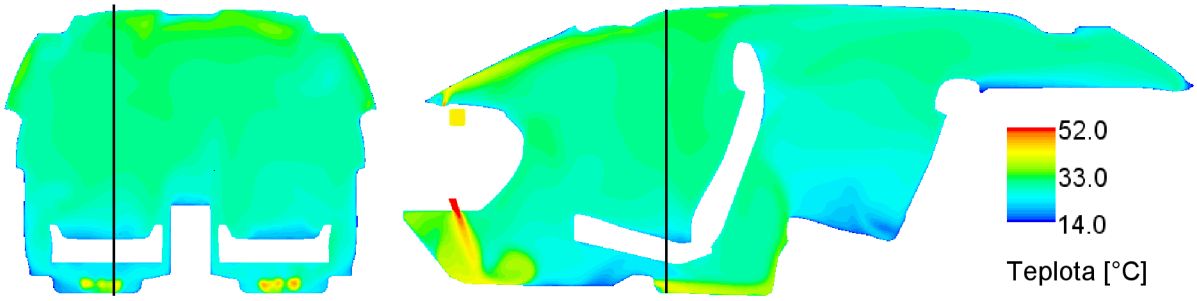
Tabulka 8.1 Specifikace zimního případu v režimu HVAC on.

Okrajové podmínky	Hodnota	Jedn.	Výsledky simulace	Hodnota	Jedn.
Teplota okolí	**−20**	[°C]	Průměrná teplota vzduchu	**32,3**	[°C]
Intenzita solárního záření	**0**	[W/m^2]			
Teplota přiváděného vzduchu	**47,7**	[°C]	Průměrná rychlost vzduchu	**0,39**	[m/s]
Rychlost přiváděného vzduchu	1,61	[m/s]			
Hmot. tok přiváděného vzduchu	62,8	[g/s]	Teplota odváděného vzduchu	**25,1**	[°C]

Následující obrázky zobrazují rychlostní a teplotní pole ve vyznačených řezech úsečkou černé barvy. Rychlost 1,2–2,4 m/s byla zjištěna bezprostředně v místech vyústek a přívodních kanálech. Od určité vzdálenosti od vyústky rychlost klesla pod 1 m/s. Zajímavými místy byly boční okna, kde byla zvýšená rychlost nad 1 m/s a opěrka hlavy na sedadle, kde byla rychlost 0,8 m/s. Obě místa byla ovlivněna směrováním přívodních kanálů. V zadní části vozu, resp. na obrázku rychlostního pole úplně na pravé straně lze spatřit zvýšenou rychlost nad 2,4 m/s,



Obrázek 8.1 Rychlostní pole, zima HVAC on.



Obrázek 8.2 Teplotní pole, zima HVAC on.

[2] Jedná se vždy o vážený průměr, kde váhou bylo procentuální zastoupení hmotnostního toku vyústky z celkového toku – viz kapitola 6.3 Teplota a rychlost přiváděného vzduchu.

v těchto místech byl situován Outlet. Pod palubní deskou se nacházely přívodní kanály, v řezu byly patrné, rychlost mohla lokálně převýšit i hodnotu 3 m/s. Rychlostní pole tvoří z větší části tmavě modrá barva, které náleží rychlost proudění vzduchu do 0,4 m/s. V obrázku 8.1 si lze všimnout zakřivení proudu vzduchu v úrovni nohou u spolujezdce. Dále lze konstatovat, že čím větší hustota vyobrazených vektorů v obr. 8.1 a dalších rychlostních polích, tím větší hmotnostní tok za jednotku času v dané oblasti. V oblasti čelního skla byla patrná větší vektorová hustota než v oblasti zadních sedaček.

Na dalším obrázku 8.2 Teplotní pole byl rozsah teplot 14 až 52 °C. Minimální teplota vzduchu byla 14 °C, lokálně mohla teplota na povrchu klesnout i níže. Místy se mohly vyskytnout i teploty mimo navržený rozsah, jako např. v nejvzdálenější části krytu kufru pod zadním sklem byla teplota o několik jednotek °C nižší, pro vizualizaci rozdílů bylo zapotřebí rozsah snížit na co nejmenší rozpětí teplot. Z patrné teplotní stratifikace byly patrné rozdíly teplot vzduchu mezi úrovní blízkosti střechy a úrovní nohou mimo hlavní proud teplého vzduchu z vyústky v přední části vozu. Tento rozdíl činil až 20 °C. Z celkového pohledu bylo patrné, že v zadní části vozu bylo chladněji než v pření části a stejně tak i ve spodní části bylo chladněji oproti horní části.

8.2. Jaro HVAC on

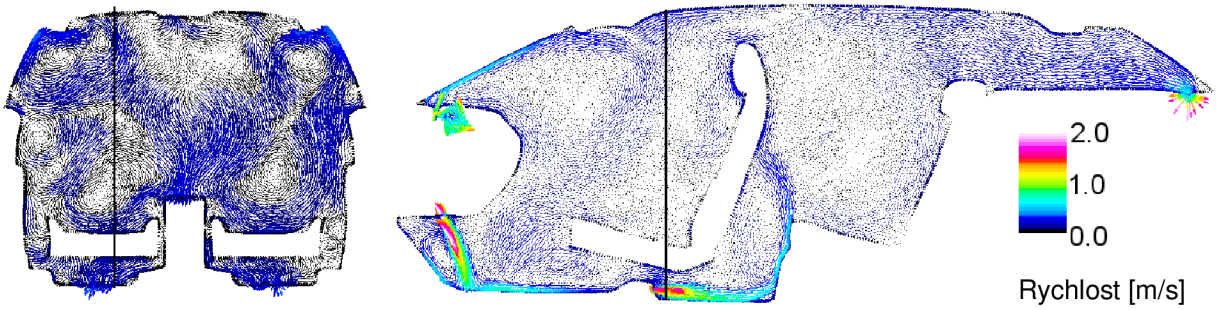
Jarní případ se zapnutou ventilací, resp. HVAC on, byl simulován pro teplotu okolí 10 °C a intenzitu solárního záření 500 W/m^2. Vzduch byl přiváděn do kabiny z vyústek o průměrné teplotě 22,1 °C, průměrné rychlosti 1,2 m/s a o hmotnostním toku 49,9 g/s.

Ze simulace byly získány hodnoty průměrné teploty vzduchu v kabině 23,1 °C, průměrné rychlosti vzduchu v kabině 0,32 m/s a průměrné teploty odváděného vzduchu 24,2 °C.

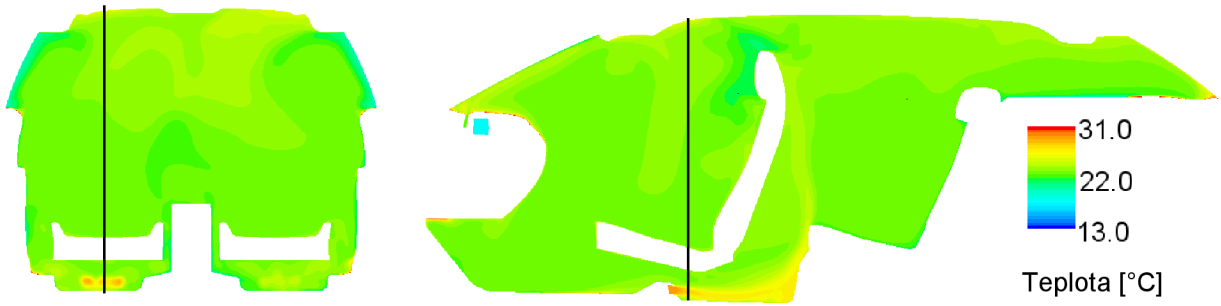
Tabulka 8.1 Specifikace jarního případu v režimu HVAC on

Okrajové podmínky	Hodnota	Jedn.	Výsledky simulace	Hodnota	Jedn.
Teplota okolí	**10**	[°C]	Průměrná teplota vzduchu	**23,1**	[°C]
Intenzita solárního záření	**500**	[W/m^2]			
Teplota přiváděného vzduchu	**22,1**	[°C]	Průměrná rychlost vzduchu	**0,32**	[m/s]
Rychlost přiváděného vzduchu	**1,2**	[m/s]			
Hmot. tok přiváděného vzduchu	**49,9**	[g/s]	Teplota odváděného vzduchu	**24,2**	[°C]

Za zmínku stojí oblast nohou u spolujezdce zobrazená v řezu. V rychlostním poli odpovídala rychlost přiváděného vzduchu z vyústky F2 na nohy u spolujezdce hodnotě kolem 2 m/s. Předepsaná okrajová podmínka rychlosti byla pro tuto vyústku 1,34 m/s ovšem v přívodním kanálu, resp. extrudéru, se proudění rozvinulo tak, že v blízkosti stěn extrudéru byla rychlost nižší než 1 m/s a středem kanálu proudil vzduch o rychlosti kolem 2 m/s, v průměru ale byla předepsaná rychlost zachována. V teplotním poli nelze rozpoznat, zda byl vzduchu přiváděn či nikoliv. Tento fakt byl dán velmi nízkým rozdílem teplot mezi přiváděným vzduchem z vyústky F2 a teplotou vzduchu v dané oblasti. Teplotní stratifikace byla v tomto případě velmi nízká, rozdíl teplot mezi horní a spodní částí vozu nepřekročil 5 °C.



Obrázek 8.3 Rychlostní pole, jaro HVAC on.



Obrázek 8.4 Teplotní pole, jaro HVAC on.

8.3. Léto HVAC on

Letní případ se zapnutou ventilací, resp. HVAC on, byl simulován pro teplotu okolí 30 °C a intenzitu solárního záření 800 W/m^2. Vzduch byl přiváděn do kabiny z vyústek o průměrné teplotě 13,6 °C, průměrné rychlosti 2,1 m/s a o hmotnostním toku 56,7 g/s.

Ze simulace byly získány hodnoty průměrné teploty vzduchu v kabině 26,6 °C, průměrné rychlosti vzduchu v kabině 0,15 m/s a průměrné teploty odváděného vzduchu 28,9 °C.

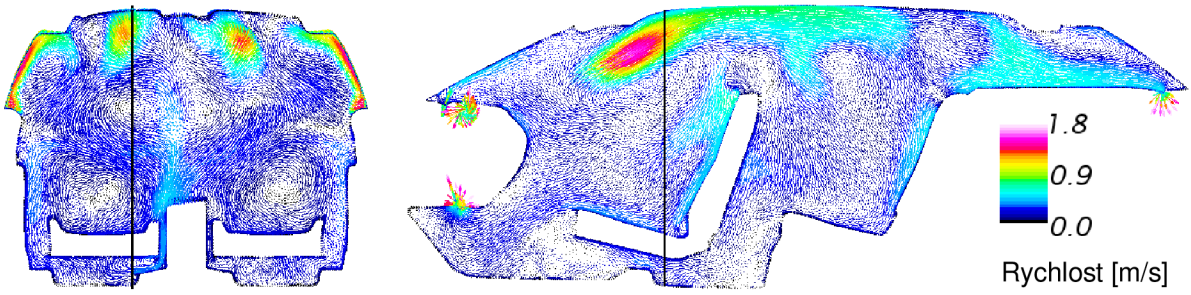
Tabulka 8.2 Specifikace letního případu v režimu HVAC on.

Okrajové podmínky	Hodnota	Jedn.	Výsledky simulace	Hodnota	Jedn.
Teplota okolí	**30**	[°C]	Průměrná teplota vzduchu	**26,6**	[°C]
Intenzita solárního záření	**800**	[W/m^2]			
Teplota přiváděného vzduchu	**13,6**	[°C]	Průměrná rychlost vzduchu	**0,15**	[m/s]
Rychlost přiváděného vzduchu	**2,1**	[m/s]			
Hmot. tok přiváděného vzduchu	**56,7**	[g/s]	Teplota odváděného vzduchu	**28,9**	[°C]

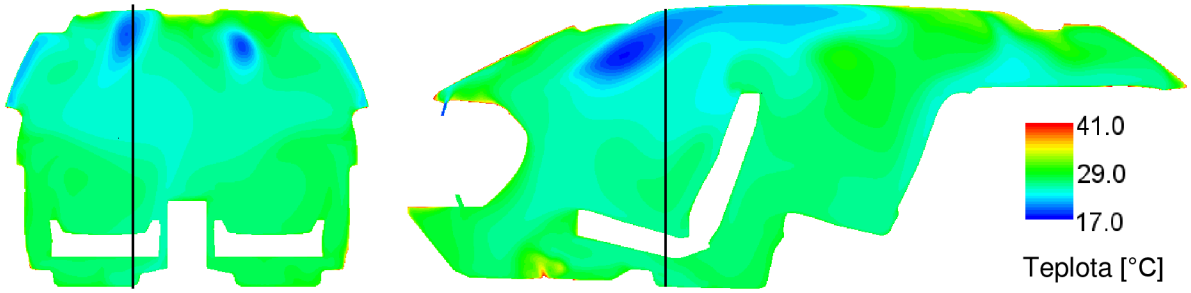
V rychlostním poli byly rychlosti vyšší než 1 m/s v oblastech obličeje u spolujezdce a řidiče a na bočních sklech. Největší rychlost ve vyobrazeném řezu byla zaznamenána cca 50 cm od středové vyústky, což pouze poukazuje na to, kde rovina řezu protíná osu proudu, který má tendenci uhýbat směrem k bočnímu oknu, lépe lze směr proudu sledovat pomocí Streamlines, viz obrázky v tištěné příloze. Na pravém řezu lze spatřit v oblasti nohou u spolujezdce místo odvodu vzduchu do recirkulace zvětšenými vektory zbarvenými do žluta až růžova.

Teplotní pole zobrazuje chladný vzduch proudící ze středové vyústky. Teplotní rozdíl mezi pasažéry v přední a zadní části vozu dosahoval v oblasti hlavy až 10 °C.

V letním případě HVAC on byl ochlazený vzduch přiváděn zejména středovými a bočními vyústkami umístěnými v palubní desce. Zásadní rozdíl oproti zimnímu a jarnímu případu byl místech odváděného vzduchu. V zimním a jarním případě byl veškerý vzduch odváděn v zadní



Obrázek 8.5 Rychlostní pole, léto HVAC on.



Obrázek 8.6 Teplotní pole, léto HVAC on.

části vozu. V letním případě bylo počítáno s 50% recirkulací vzduchu. Polovina z celkového přiváděného hmotnostního toku byla v simulaci odváděna stejným místem jako v zimním a jarním případě a druhá polovina byla odváděna z prostoru nohou u spolujezdce. Protože nebyl vyústkami F přiváděn žádný vzduch do kabiny, byla tato místa využita k odvádění vzduchu z kabiny automobilu.

8.4. Zima HVAC off

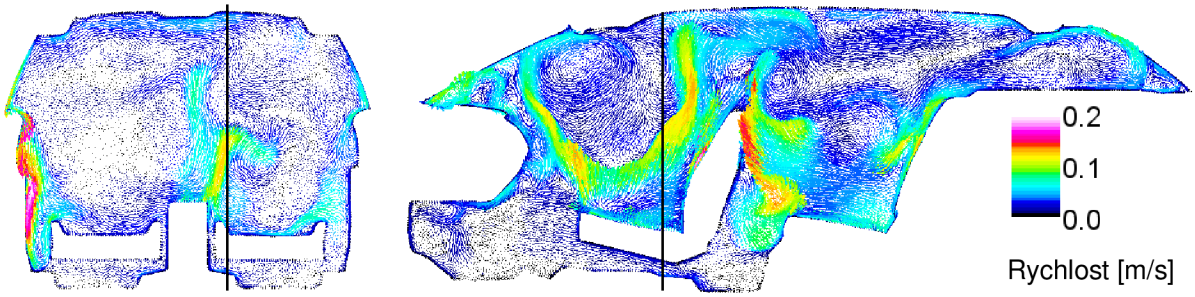
Zimní případ s vypnutou ventilací, resp. HVAC off, byl simulován pro teplotu okolí −20 °C a intenzitu solárního záření 300 W/m^2. Tento případ jako jediný nebyl měřením ověřen a úhel sklonu slunečního svitu také nebyl přímo kolmo na střechu vozu, jak to mu bylo ve všech ostatních případech. Solární záření působilo na kabinu vozu ze strany řidiče pod úhlem[3] 45 °. Žádný vzduch nebyl do kabiny přiváděn, jedná se o tzv. parkovací stav. Ze simulace byla získána hodnota průměrné teploty vzduchu v kabině −10,5 °C.

Tabulka 8.3 Specifikace zimního případu v režimu HVAC off.

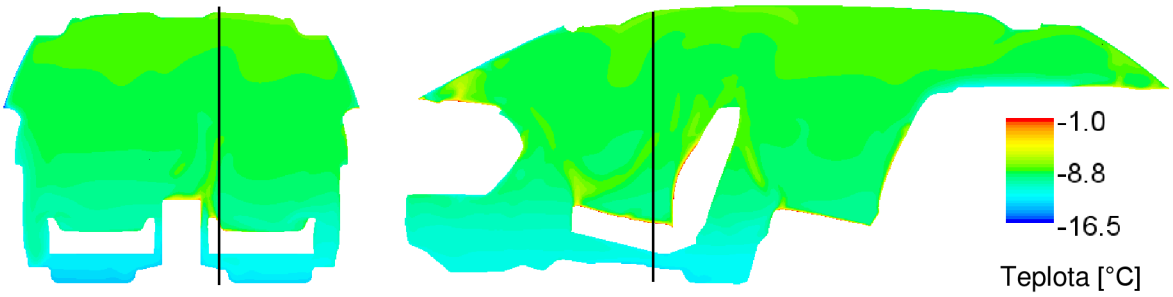
Okrajové podmínky	Hodnota	Jednotka	Výsledky simulace	Hodnota	Jednotka
Teplota okolí	**−20**	[°C]	Průměrná teplota vzduchu	**−10,5**	[°C]
Intenzita solárního záření	**300**	[W/m^2]			

Pozn.: Solární záření mělo parametry: azimut 90 °, výška 45 °.

Prezentované řezy byly navrženy pro místo okraje sedačky řidiče z důvodu největšího solárního zatížení této části. V rychlostním poli šlo spatřit největší rychlost 0,2 m/s vzduchu způsobenou přirozenou konvekci v oblasti dveří u spolujezdce. Rozdíl teplot mezi horní a spodní částí vozu byl do 6 °C. Maximální zjištěná teplota v uváděném řezu 6 °C byla v blízkosti povrchu, na který dopadalo solární záření.



Obrázek 8.7 Rychlostní pole, zima HVAC off.



Obrázek 8.8 Teplotní pole, zima HVAC off.

[3] Azimut = 90 °, elevační úhel = 45 °, nultý azimut byl v přední části vozu.

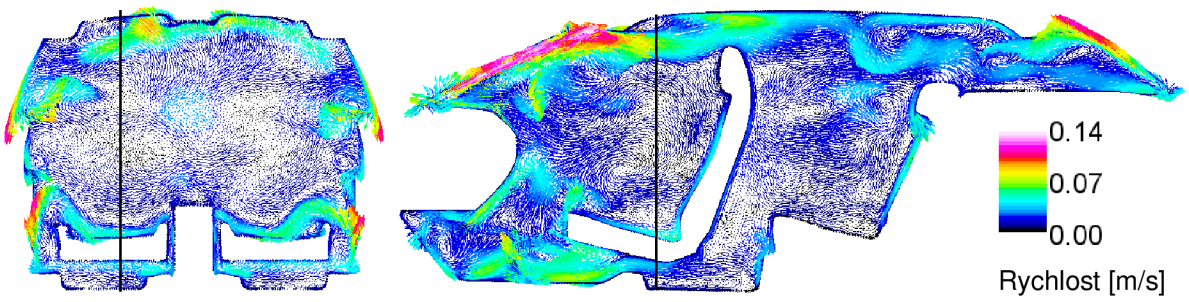
8.5. Jaro HVAC off

Jarní případ s vypnutou ventilací, resp. HVAC off, byl simulován pro teplotu okolí 10 °C a intenzitu solárního záření 500 W/m^2. Žádný vzduch nebyl do kabiny přiváděn, jedná se o tzv. parkovací stav. Ze simulace byla získána hodnota průměrné teploty vzduchu v kabině 23,4 °C.

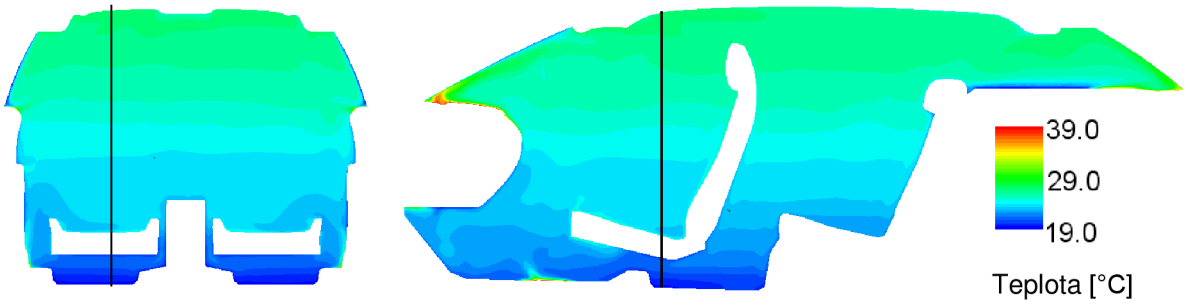
Tabulka 8.4 Specifikace jarního případu v režimu HVAC off

Okrajové podmínky	Hodnota	Jednotka	Výsledky simulace	Hodnota	Jednotka
Teplota okolí	**10**	[°C]	Průměrná teplota vzduchu	**23,4**	[°C]
Intenzita solárního záření	**500**	[W/m^2]			

V rychlostním poli bylo patrné místo s největší rychlostí vzduchu až 0,14 m/s v oblasti čelního skla, kde ohřátý vzduchu od palubní desky stoupal podél čelního skla a pokračoval podél střechy až do zadní části vozu. Na teplotním poli byla patrná teplotní stratifikace mezi horní a spodní části vozu. Rozdíl teplot mezi těmito úrovněmi byl až 10 °C.



Obrázek 8.9 Rychlostní pole, jaro HVAC off.



Obrázek 8.10 Teplotní pole, jaro HVAC off.

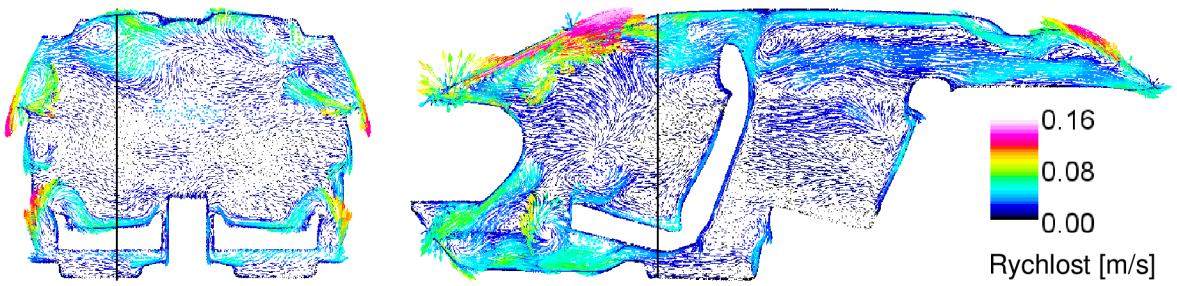
8.6. Léto HVAC off

Letní případ s vypnutou ventilací, resp. HVAC off, byl simulován pro teplotu okolí 30 °C a intenzitu solárního záření 800 W/m^2. Žádný vzduch nebyl do kabiny přiváděn, jedná se o tzv. parkovací stav. Ze simulace byla získána hodnota průměrné teploty vzduchu v kabině 49,8 °C.

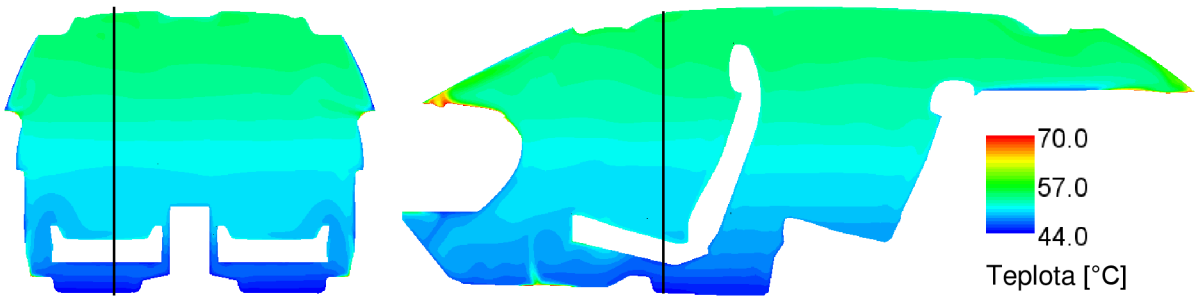
Tabulka 8.5 Specifikace letního případu v režimu HVAC off

Okrajové podmínky	Hodnota	Jednotka	Výsledky simulace	Hodnota	Jednotka
Teplota okolí	**30**	[°C]	Průměrná teplota vzduchu	**49,8**	[°C]
Intenzita solárního záření	**800**	[W/m^2]			

Za povšimnutí stojí střet dvou proudů vzduchu za hlavovou opěrkou spolujezdce. Vzduch stoupající ze strany čelního skla a ze zadní části ohřátý vzduch od palubní desky stoupající podél zadního skla a střechy. Rozdíl teplot mezi střechou a podlahou dosahoval až 12 °C.



Obrázek 8.11 Rychlostní pole, léto HVAC off.



Obrázek 8.12 Teplotní pole, léto HVAC off.

9 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ SIMULACÍ

V této kapitole byly vyhodnoceny a porovnány níže uvedené scénáře (definované v kapitole 6 Příprava okrajových podmínek) nejdříve mezi sebou a poté s měřením.

- Zima – HVAC on, −20 °C, 0 W/m^2
- Jaro – HVAC on, 10 °C, 500 W/m^2
- Léto – HVAC on, 30 °C, 800 W/m^2
- Zima – HVAC off, −20 °C, 300 W/m^2
- Jaro – HVAC off, 10 °C, 500 W/m^2
- Léto – HVAC off, 30 °C, 800 W/m^2

9.1. Porovnání teplot mezi simulacemi

Tato podkapitola porovnává výsledky simulace mezi sebou, resp. vůči posuzovaným případům. Nejdříve byly porovnány teploty vzduchu formou sloupcového grafu a poté povrchové teploty formou perspektivních pohledů do kabiny vozu ze strany řidiče tak, aby bylo zobrazeno co nejvíce detailů vhodných k porovnání.

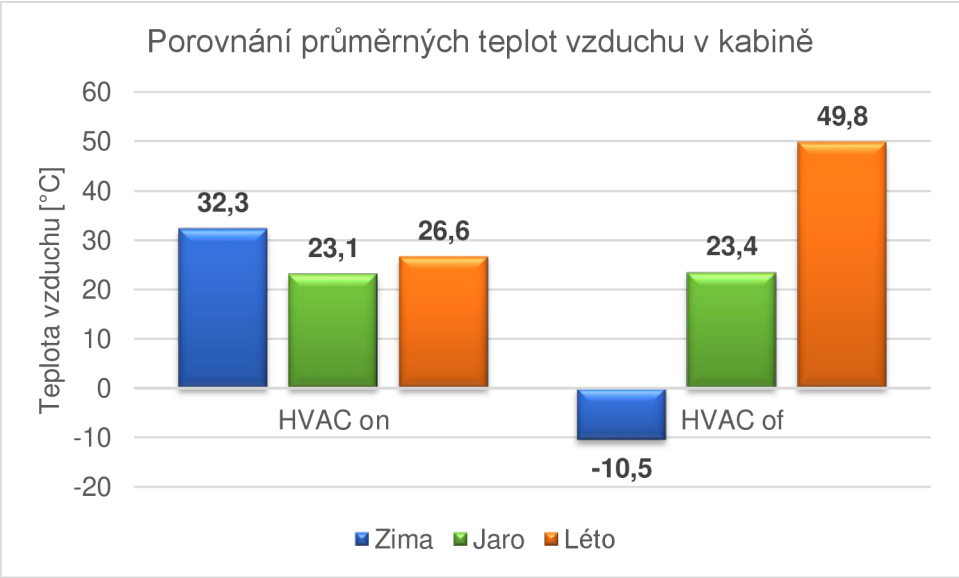
9.1.1. Teploty vzduchu

Následující grafické srovnání (graf 9.1) demonstruje rozdílnost teplot vzduchu uvnitř kabiny.

Zimní případ se zapnutou ventilací dosahoval průměrných teplot vzduchu 32,3 °C. Pokud by nebyly do průměru teplot uvažovány sledované body v úrovní nohou, a to z důvodu velkého ovlivnění teplým proudem vzduchu z vyústky, byla by průměrná teplota vzduchu v kabině 29,1 °C. Zimní případ s vypnutou ventilací dosahoval průměrných teplot vzduchu uvnitř automobilu −10,5 °C, kde teplota okolí vozu byla −20 °C a intenzita solárního záření byla 300 W/m^2.

Teploty vzduchu jarních případů byly velmi podobné, pro HVAC on platí průměrná teplota vzduchu 23,1 °C a pro HVAC off 23,4 °C. Rozdíl byl nepatrný a v případu HVAC off šlo hovořit o stavu, kdy tepelné zisky od solárního záření byly v rovnováze s tepelnou ztrátou kabiny vozu.

Letní případ s vypnutou klimatizací dosahoval průměrných teplot vzduchu uvnitř vozu 49,8 °C, povrchové teploty ozářené přímým slunečním svitem, jako např. palubní deska, dosahovaly maximálních hodnot až 80 °C. Se zapnutou klimatizací byla v kabině průměrná teplota vzduchu 26,6 °C.



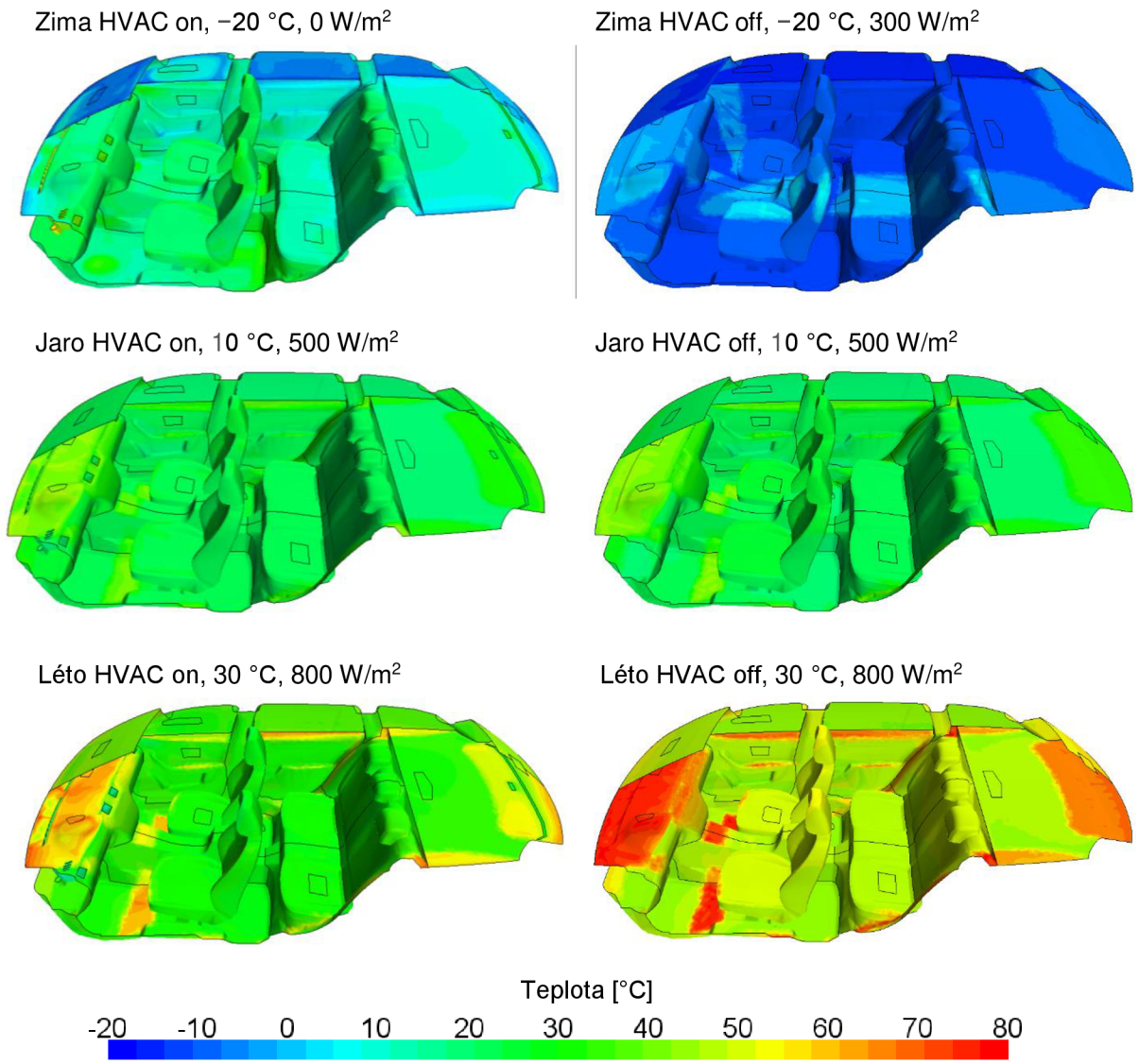
Graf 9.1 Porovnání teplot vzduchu mezi režimy HVAC on a HVAC off.

9.1.2. Povrchové teploty

Následující grafické srovnání (obrázek 9.1) povrchových teplot demonstruje rozdílnost vůči všem simulovaným případům. Tmavě modrá barva značí chladná místa pod −5 °C a oranžová až červená barva značí místa s teplotou vyšší než 60 °C.

Zimní případ HVAC off byl zpozorován jako nejchladnější, na obrázku lze spatřit zvýšenou povrchovou teplotu od solární zátěže, která dopadala na kabinu vozu ze strany řidiče pod úhlem 45 °. U zimního případu HVAC on, lze spatřit chladné povrchy oken, vyjma bočního okna u spolujezdce, zde byl povrch ovlivněn teplým vzduchem z boční vyústky. Dále lze rozpoznat části se zelenou barvou např. v oblasti nohou u řidiče a nohou v zadní části vozu, tyto oblasti byly také ohřáty vlivem blízkosti vyústek.

Rozdílnost povrchových teplot mezi jarními případy se zapnutou a vypnutou ventilací není ze zvolené teplotní škály patrná. Rozdíl povrchových teplot se pohyboval kolem 5 °C, ale na palubní desce v blízkosti defrostu pod čelním sklem byl rozdíl až 16 °C. V tištěné příloze je uvedeno srovnání povrchových teplot s rozsahem teplot pouze pro jarní případ.



Obrázek 9.1 Porovnání povrchových teplot zimních, jarních a letních případů v režimech HVAC on/off.

Naopak u letního případu byl tento rozdíl velmi dobře rozpoznán. Např. povrchová teplota sedadla řidiče byla v režimu HVAC off 50 °C a v režimu HVAC on 30 °C. Dále lze nejlépe u letního případu HVAC off pozorovat povrchy zahřáté nad 65 °C od přímého slunečního svitu jako např. palubní deska.

9.2. Porovnání teplot mezi simulacemi a naměřenými hodnotami

Tato podkapitola porovnává výsledky simulace s naměřenými hodnotami. Porovnání bylo uvedeno v tabulkách, tučným písmem byl vždy uveden rozdíl v absolutních hodnotách mezi měřenými a simulovanými hodnotami. Ve spodní části tabulky byl vždy uveden průměrný rozdíl v daném případě. Nejdříve byly porovnávány případy se zapnutou ventilací nebo také HVAC on a poté případy s vypnutou ventilací, resp. parkovací stav nebo také HVAC off.

9.2.1. Teploty vzduchu v režimu HVAC on

V zimním případě byla kabina celkově více prohřáta v simulaci oproti měření. Průměrný rozdíl teplot vzduchu byl **2,7 °C**. Pouze u spolujezdce v úrovni sedadla byla nasimulovaná teplota nižší než měřená. Nejvyšší zaznamenaný rozdíl 6,3 °C byl u pasažéra vzadu v úrovni nohou, příčina byla v umístění měřeného bodu do hlavního proudu teplého vzduchu z vyústky.

V jarním případě byla teplota vzduchu v průměru rozdílná o **1,2 °C**. Kabina vozu byla celkově teplejší oproti měření. Pouze u spolujezdce v úrovni sedadla a nohou byl rozdíl opačný, resp. teploty zde byly nižší oproti měření než v ostatních sledovaných bodech. Největší zaznamenaný rozdíl byl 1,9 °C v zadní části vozu v úrovni hlavy. V tomto sledovaném bodě bylo proudění vzduchu nejméně ovlivněno přívodními vyústkami.

V letním případě se nedá hovořit o celkovém přehřátí nebo podchlazení kabiny vozu oproti měření. Sledované místo u spolujezdce v úrovni hlavy bylo ovlivněno přivádějícím chladným vzduchem ze středové vyústky více než během měření, tzn. bylo chladnější o 4,2 °C. Pro úroveň nohou u spolujezdce bylo naopak měřené místo v simulaci teplejší než během měření, a to o 1,2 °C. Průměrný rozdíl teploty vzduchu v letním případu byl **2,2 °C**.

Tabulka 9.1 Porovnávané teploty vzduchu v režimu HVAC on.

Sledovaná místa teplot vzduchu HVAC on	Zima			Jaro			Léto		
	Měř.	Sim.	Rozdíl	Měř.	Sim.	Rozdíl	Měř.	Sim.	Rozdíl
	°C								
Spolujezdec úroveň hlavy	28,3	29,9	**1,6**	21,6	22,1	**0,5**	26,1	21,9	**4,2**
Spolujezdec úroveň sedadla	27,4	26,8	**0,6**	24,6	23,0	**1,6**	30,7	27,3	**3,4**
Spolujezdec úroveň nohou	35,4	38,2	**2,8**	23,4	22,8	**0,6**	26,2	27,4	**1,2**
Pasažér ZL úroveň hlavy	26,9	28,8	**1,9**	21,3	23,2	**1,9**	27,4	29,4	**2,0**
Pasažér ZL úroveň sedadla	27,5	30,7	**3,2**	21,9	23,1	**1,2**	26,3	27,3	**1,0**
Pasažér ZL úroveň nohou	33,0	39,3	**6,3**	22,8	24,3	**1,5**	27,8	26,7	**1,1**
Průměrný rozdíl			**2,7**			**1,2**			**2,2**

Pozn.: ZL – zadní část vlevo, rozdíl byl počítán z absolutních hodnot.

9.2.2. Povrchové teploty v režimu HVAC on

Simulované teploty vzduchu v zimním případě byly celkově vyšší než naměřené, ovšem sledované povrchové teploty byly celkově nižší oproti měření. Povrchová teplota předního bočního okna u spolujezdce byla výjimečně vyšší o 2,5 °C, a to z důvodu blízkosti vyústky, resp. ovlivnění pozorované části teplým přiváděným vzduchem. Průměrný rozdíl povrchových teplot byl v zimním případě **5,7 °C**. Velký rozdíl mezi simulovanými a měřenými hodnotami byl u čelního skla 9,6 °C a 12,3 °C, obě teploty byly chladnější než v měření. Příčina byla v nedokonalosti modelu, resp. přívodních kanálu defrostu a nízké povrchové teploty palubní desky. Teplota palubní desky byla během simulace o více jak 12 °C nižší oproti měření. Tento rozdíl mohl z určité míry způsobovat nižší přestup tepla radiací na povrch čelního skla, než tomu bylo během měření. Průměrný rozdíl povrchových teplot bez zastoupení čelních skel byl 4,5 °C. Průměrný rozdíl povrchových teplot se zastoupením palubní desky byl 6,8 °C.

Průměrný rozdíl povrchových teplot jarního případu byl **1,8 °C.** Sledované povrchové teploty byly z větší míry chladnější oproti měření. Pouze teploty střechy, sedadel a zadního okna byly oproti měření vyšší, nejvíce okno zadní o 5,4 °C. Ostatní sledovaná místa byla chladnější. Průměrný rozdíl povrchových teplot se zastoupením palubní desky byl 3,4 °C.

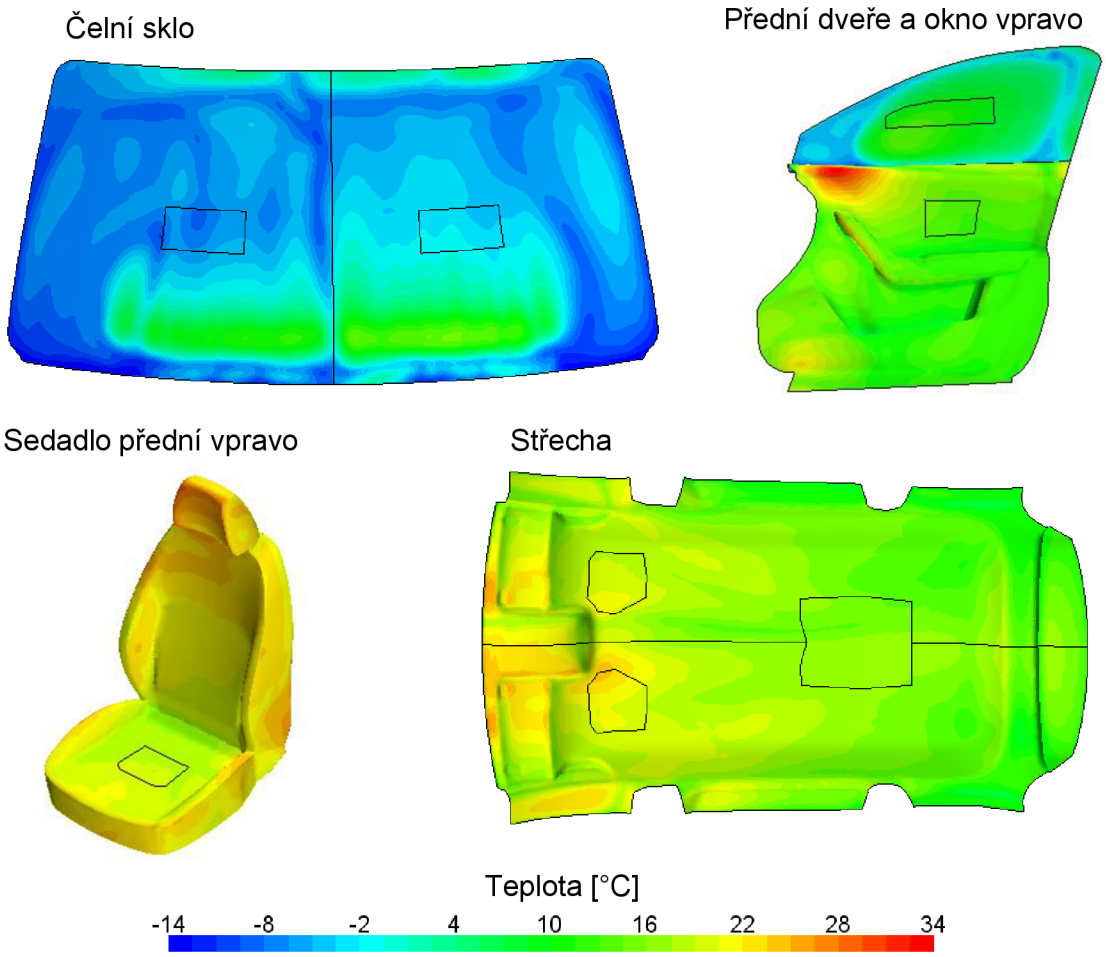
Ze sledovaných povrchových teplot v letním případě bylo zjištěno, že u zadního okna, předních pravých dveří a obou sedadel byly teploty vyšší, naopak u ostatních částí byly teploty nižší než u naměřených hodnot. Tyto části byly mimo hlavní proudy vzduchu z přívodních kanálů. Lze konstatovat, že celkově byla kabina více vychlazena klimatizačním systémem než během měření. Průměrný rozdíl povrchových teplot v letním případě byl **3,7 °C**. Průměrný rozdíl povrchových teplot se zastoupením palubní desky byl 6,5 °C.

Tabulka 9.2 Porovnávané povrchové teploty v režimu HVAC on.

Sledovaná místa povrchových teplot HVAC on	Zima			Jaro			Léto		
	Měř.	Sim.	Rozdíl	Měř.	Sim.	Rozdíl	Měř.	Sim.	Rozdíl
	°C								
Čelní sklo levé	7,2	-2,4	**9,6**	24,4	22,6	**1,8**	49,5	41,4	**8,1**
Čelní sklo pravé	5,9	-6,4	**12,3**	24,5	22,1	**2,4**	44,1	41,9	**2,2**
Okno pravé přední	8,2	10,7	**2,5**	19,5	19,0	**0,5**	34,9	30,7	**4,2**
Okno zadní	3,1	0,3	**2,8**	20,9	26,3	**5,4**	41,9	45,2	**3,3**
Dveře pravé přední	18,3	13,6	**4,7**	22,4	21,9	**0,5**	31,7	32,5	**0,8**
Kryt kufru	20,3	13,0	**7,3**	23,1	19,2	**3,9**	34,6	32,2	**2,4**
Střecha přední průměr	26,0	19,8	**6,2**	23,0	25,3	**2,3**	35,6	31,1	**4,5**
Střecha zadní ve středu	21,1	15,7	**5,4**	24,0	24,6	**0,6**	42,7	35,6	**7,1**
Podlaha zadní vpravo	25,0	24,4	**0,6**	23,7	23,6	**0,1**	32,9	29,6	**3,3**
Sedadlo přední vpravo	24,8	19,3	**5,5**	21,8	23,6	**1,8**	26,2	30,0	**3,8**
Sedadlo zadní vlevo	18,7	12,8	**5,9**	21,3	22,2	**0,9**	28,3	30,0	**1,7**
Průměrný rozdíl			**5,7**			**1,8**			**3,7**
Do průměrného rozdílu nezahrnutá sledovaná místa:									
Palubní deska vlevo	32,0	19,8	**12,2**	33,0	42,8	**9,8**	41,5	61,9	**20,4**
Palubní deska vpravo	30,5	16,9	**13,5**	27,3	41,8	**14,5**	38,9	62,1	**23,1**

Pozn.: Rozdíl byl počítán z absolutních hodnot. Palubní deska nebyla uvažována do průměrování z důvodu velmi obtížného, resp. nepřesného, zadávání okrajových podmínek.

Následující grafické vyobrazení vybraných částí vozu (obrázek 9.2) demonstruje povrchové teploty během simulace zimního případu se zapnutou ventilací. Části ohraničené tenkou černou čarou zobrazují místa, která byla sledována a ve kterých probíhalo měření. Na povrchové teplotě čelního skla je jasně patrný vliv teplého přivádějícího vzduchu z defrost vyústky. U předních dveří je zřetelné, jak se teplý proud vzduchu z boční vyústky opírá do části dveří a dále do bočního skla. Zadní sedadlo je znatelně tepelně zatížené více v oblasti hlavy než v oblasti sezení. U střechy je patrné, že přední část byla více tepelně zatížena než zadní část, rozdíl teplot mezi přední a zadní částí byl až 14 °C. Černě ohraničené oblasti jsou místa sledovaných povrchových teplot.



Obrázek 9.2 Povrchové teploty vybraných částí, zimní případ HVAC on.

9.2.3. Teploty vzduchu v režimu HVAC off

Teploty vzduchu a povrchové teploty byly pro režim HVAC off porovnány pouze pro jarní a letní případ (viz tabulka 9.3), protože zimní případ v režimu HVAC off nebyl v projektu CKAP měřen. Průměrný rozdíl teplot vzduchu byl v simulovaném modelu pro jarní případ **2,9 °C**. Všechny teploty modelu byly vyšší než teploty během měření, kabina byla tedy celkově přehřáta. Největší teplotní rozdíl 4 °C byl u spolujezdce v úrovni nohou.

Průměrný rozdíl teplot vzduchu byl pro letní případ **2,5 °C**. Všechny teploty modelu byly vyšší než teploty během měření, vyjma sledovaného bodu u spolujezdce v úrovni nohou, kde byla teplota nižší o 1,2 °C.

Tabulka 9.3 Porovnávané teploty vzduchu v režimu HVAC off.

Sledovaná místa teplot vzduchu HVAC on	Jaro			Léto		
	Měř.	Sim.	Rozdíl	Měř.	Sim.	Rozdíl
Spolujezdec úroveň hlavy	23,4	26,2	**2,8**	50,7	54,1	**3,4**
Spolujezdec úroveň sedadla	22,0	23,3	**1,4**	49,1	49,6	**0,5**
Spolujezdec úroveň nohou	17,4	21,3	**4,0**	48,1	46,9	**1,2**
Pasažér ZL úroveň hlavy	22,7	25,7	**3,0**	49,3	53,2	**3,9**
Pasažér ZL úroveň sedadla	20,0	23,1	**3,1**	45,9	49,4	**3,5**
Pasažér ZL úroveň nohou	17,3	20,4	**3,1**	42,9	45,5	**2,7**
Průměrný rozdíl			**2,9**			**2,5**

Pozn.: ZL – zadní část vlevo, rozdíl byl počítán z absolutních hodnot.

9.2.4. Povrchové teploty v režimu HVAC off

Průměrný rozdíl povrchové teploty v jarním případě v režimu HVAC off byl **2,6 °C**, se zastoupením palubní desky 3,8 °C. Průměrný rozdíl povrchové teploty v letním případě byl **3,1 °C**, se zastoupením palubní desky 4,2 °C. Velký rozdíl byl u zadního okna.

Tabulka 9.4 Porovnávané povrchové teploty v režimu HVAC off.

Sledovaná místa povrchových teplot HVAC on	Jaro			Léto		
	Měř.	Sim.	Rozdíl	Měř.	Sim.	Rozdíl
	°C					
Čelní sklo levé	25,2	23,3	**1,9**	55,3	50,3	**5,0**
Čelní sklo pravé	24,3	22,4	**1,9**	53,9	48,9	**5,0**
Okno pravé přední	18,7	19,6	**0,8**	45,7	44,2	**1,5**
Okno zadní	20,9	27,5	**6,7**	47,6	56,2	**8,7**
Dveře pravé přední	21,0	22,4	**1,4**	48,8	48,5	**0,3**
Kryt kufru	21,8	19,1	**2,7**	46,3	46,5	**0,2**
Střecha přední průměr	25,4	26,5	**1,1**	55,4	53,8	**1,6**
Střecha zadní ve středu	26,1	25,4	**0,7**	56,3	52,8	**3,5**
Podlaha zadní vpravo	15,7	20,4	**4,7**	41,6	45,6	**4,0**
Sedadlo přední vpravo	20,3	24,6	**4,4**	48,1	51,1	**3,0**
Sedadlo zadní vlevo	19,9	22,4	**2,5**	46,7	48,5	**1,8**
Průměrný rozdíl			**2,6**			**3,1**
Do celkového rozdílu nezahrnutá sledovaná místa:						
Palubní deska vlevo	32,6	41,4	**8,7**	66,1	74,9	**8,7**
Palubní deska vpravo	31,0	42,6	**11,7**	64,6	76,3	**11,7**

Pozn.: Rozdíl byl počítán z absolutních hodnot.

9.2.5. Shrnutí rozdílů teplot mezi simulacemi a měřením

Pro zimní případ HVAC on platí rozdíl absolutních hodnot teplot vzduchu mezi simulací a měřením 2,7 °C čemuž náleží procentuální chyba 3,8 %. Procentuální chyba byla zjištěna ze znalosti minimální teploty ve voze −14,0 °C a maximální teploty 56,6 °C, kde celkové rozmezí činí 70,6 °C. Podělením hodnoty 2,7 °C hodnotou 70,6 °C byla získána procentuální chyba 3,8 %. Stejným způsobem bylo postupováno i u ostatních případů. Průměrný rozdíl teplot

vzduchu v režimu HVAC on 2,0 °C byl stanoven aritmetickým průměrem z hodnot rozdílu teplot vzduchu ze zimního, jarního a letního případu. Průměr procentuální chyby byl stanoven podobně.

Hodnoty ve sloupci „Celkem“ byly získány aritmetickým průměrem zimních, jarních a letních hodnot v režimu HVAC on a současně z jarních a letních hodnot v režimu HVAC off. Tento postup platil pro celkový rozdíl teplot vzduchu **2,3 °C** mezi simulací a měřením. Podobně byl stanoven i celkový rozdíl povrchových teplot na hodnotu **3,4 °C**. Procentuální chyba byla stanovena obdobně, chyba rozdílů teplot vzduchu byla 5,5 % a chyba rozdílů povrchových teplot byla 7,3 %. Celkový rozdíl a celková chyba byla získána obdobně s tím, že do aritmetického průměru vstupovaly hodnoty ze všech sledovaných hodnot, tzn. současně teploty vzduchu a povrchové teploty. Celkový průměrný rozdíl teplot vzduchu a zároveň povrchových teplot mezi simulovanými a měřenými hodnotami byl **2,8 °C** a celková procentuální chyba činila 6,4 %.

Tabulka 9.5 Celkové rozdíly teplot vzduchu a povrchových teplot mezi simulací a měřením.

Rozdíl/chyba	Jedn.	HVAC on				HVAC off			Celkem
		Zima	Jaro	Léto	Průměr	Jaro	Léto	Průměr	
Teplota vzduchu	°C	2,7	1,2	2,2	2,0	2,9	2,5	2,7	**2,3**
Procentuální chyba	%	3,8	4,1	3,3	3,8	10,0	6,1	8,0	5,5
Povrchová teplota	°C	5,7	1,8	3,7	3,7	2,6	3,1	2,9	**3,4**
Procentuální chyba	%	8,1	6,2	5,6	6,6	9,0	7,6	8,3	7,3
Celkový rozdíl	°C								**2,8**
Celková chyba	%								6,4

Pozn.: Procentuální chyba byla počítána z absolutního rozsahu mezi maximálními a minimálními teplotami, které byly během simulace v kabině automobilu.

V tabulce 9.6 byly prezentovány celkové rozdíly teplot vzduchu a povrchových teplot mezi simulací a měřením. Simulované teploty vzduchu v zimním případě HVAC on byly celkově vyšší než naměřené, ovšem sledované povrchové teploty byly celkově nižší oproti měření. V jarním případě HVAC on byla kabina vozu celkově teplejší oproti měření, sledované povrchové teploty byly z větší míry chladnější oproti měření. V letním případě HVAC on byly části ovlivněné přiváděným chladným vzduchem chladnější než v měření a části mimo hlavní proudy vzduchu z přívodních kanálů byly teplejší než v měření. V jarním případě HVAC off byly všechny teploty modelu vyšší než teploty během měření, kabina byla tedy celkově přehřáta. V letním případě HVAC off byly celkově teploty modelu vyšší než teploty během měření, rozdíl povrchových teplot byl neutrální.

Tabulka 9.6 Porovnání celkového přehřátí/podchlazení kabiny.

Teploty ze simulace byly oproti měření:	HVAC on		HVAC off	
	Teplota vzduchu	Povrchová teplota	Teplota vzduchu	Povrchová teplota
Zima	Vyšší	Nižší	-	-
Jaro	Vyšší	Nižší	Vyšší	Vyšší
Léto	Neutrální	Nižší	Vyšší	Neutrální

9.3. Zjednodušený výpočet prostupu tepla kabinou vozu

Simulace byla nastavena podle měření tak, že podmínky odpovídaly stojícímu vozu, resp. maximální naměřené rychlosti kolem auta byly 3,5 m/s. Následující zjednodušené výpočty prostupu tepla byly provedeny pro tento stojící stav, tzn. že pro reálný stav jedoucího vozu je prostup tepla kabinou vozu mnohem vyšší.

Uváděný výpočet byl prezentován pro ujasnění nároků na výkon vytápění, resp. chlazení v porovnání s mařeným teplem odvádějícím ven z vozu do okolí. Ve výpočtu byla uvažována konstantní tepelná kapacita 1010 $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ pro suchý vzduchu o teplotě 20 °C a tlaku 100 kPa z důvodu přehlednosti výpočtu, navíc rozdíl mezi přesným výpočtem s proměnou tepelnou kapacitou a uváděným zjednodušeným výpočtem byl menší než 0,4 % (GLÜCK, 1985). Dalším zjednodušením bylo uvažování průměrné teploty přiváděného vzduchu do kabiny vozu. Rozdíl mezi precizním výpočtem tepelného výkonu z rozdílů teplot od jednotlivých vyústek a zjednodušeným výpočtem pro průměrnou teplotu byl 3 %.

Výpočet pro zimní případ HVAC on:

Bilance výpočtu:

$$\dot{Q}_{O,Z} + \dot{Q}_{ZK} + \dot{Q}_{ZR} = 0 \qquad (1)$$

$\dot{Q}_{O,Z}$	$[W]$	*Tepelný výkon potřebný k ohřátí venkovního vzduchu, zima.*
$\dot{Q}_{ZK}$	$[W]$	*Zmařený tepelný výkon prostupem tepla z kabiny do okolí.*
$\dot{Q}_{ZR}$	$[W]$	*Zmařený tepelný výkon nevyužitím recirkulace vzduchu.*

Tepelný výkon potřebný k ohřátí vzduchu z teploty −20 °C na teplotu 47,7 °C:

$$\dot{Q}_{O,Z} = \dot{m}_Z \cdot c_p \cdot \left(t_{INLET,Z} - t_{OUT,Z}\right) = 0{,}0628 \frac{kg}{s} \cdot 1010 \frac{J}{kgK} \cdot \left(47{,}7 - (-20)\right) = 4294\, W \qquad (2)$$

$\dot{m}_Z$	$\left[\frac{kg}{s}\right]$	*Hmotnostní tok vzduchu, zima.*
c_p	$\left[\frac{J}{kgK}\right]$	*Měrná tepelná kapacita, pro suchý vzduch o teplotě 20 °C a tlaku 100 kPa.*
$t_{INLET,Z}$	$[°C]$	*Průměrná teplota ohřátého vzduchu vstupujícího do kabiny vozu, zima.*
$t_{OUT,Z}$	$[°C]$	*Teplota okolí automobilu, zima.*

Zmařený tepelný výkon prostupem tepla kabinou:

$$\dot{Q}_{ZK} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \left(t_{OUTLET,Z} - t_{INLET,Z}\right) = 0{,}0628 \frac{kg}{s} \cdot 1010 \frac{J}{kgK} \cdot (25{,}1 - 47{,}7) = -1433\, W \qquad (3)$$

$t_{OUTLET,Z}$	$[°C]$	*Průměrná teplota vzduchu vystupujícího z kabiny vozu.*
$t_{INLET,Z}$	$[°C]$	*Průměrná teplota ohřátého vzduchu vstupujícího do kabiny vozu.*

Teplo zmařené nevyužitím recirkulace – dochlazené zpět na teplotu −20 °C:

$$\dot{Q}_{ZR} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_{OUT} - t_{OUTLET}) = 0{,}0628 \frac{kg}{s} \cdot 1010 \frac{J}{kgK} \cdot (-20 - 25{,}1) = -2861\, W \qquad (4)$$

Výpočtem zimního případu HVAC on bylo prokázáno, že pro ohřátí vzduchu z teploty −20 °C na teplotu 47,7 °C je zapotřebí teplený výkon cca 4,3 kW. Z těchto 100 % je 33 % této energie zmařeno prostupem tepla z kabiny vozu do okolí a zbylých 67 % je zmařeno nevyužitím recirkulace vzduchu, resp. zpětným nevyužitím tepla.

Obdobně byl propočítán letní případ v režimu HVAC on s uvažováním 50% recirkulací vzduchu. Celkový výkon potřebný k ochlazení vzduchu na 13,6 °C z teploty okolí 30 °C a současně z recirkulační teploty 28,2 °C byl −888 W (uvažování 50% zastoupení hmotnostního toku recirkulací). Tepelný výkon uspořený využitím recirkulace byl pouze 52 W. Při uvažovaní většího procentuálního zastoupení recirkulace vzduchu by klesla recirkulační teplota a zvýšil by se uspořený výkon.

Výpočet pro letní případ HVAC on:

Celkový tepelný výkon potřebný k ochlazení vzduchu z 30 °C na 13,6 °C:

$$\dot{Q}_{O,L} = \dot{Q}_{O,OUT,L} + \dot{Q}_{O,REC} = -470\,W - 418\,W = -888\,W \quad (5)$$

$\dot{Q}_{O,L}$	$[W]$	*Celkový tepelný výkon potřebný k ochlazení vzduchu.*
$\dot{Q}_{O,OUT,L}$	$[W]$	*Tepelný výkon potřebný k ochlazení z venkovního vzduchu, léto.*
$\dot{Q}_{O,REC}$	$[W]$	*Tepelný výkon potřebný k ochlazení z recirkulace.*

Tepelný výkon potřebný k ochlazení 50% hmotnostního toku z teploty okolí 30 °C na 13,6 °C:

$$\dot{Q}_{O,OUT,L} = 0{,}5 \cdot \dot{m}_L \cdot c_p \cdot \left(t_{INLET,L} - t_{OUT,L}\right) = 0{,}5 \cdot 0{,}0567\frac{kg}{s} \cdot 1010\frac{J}{kgK} \cdot (13{,}6 - 30)°C = -470\,W \quad (6)$$

$\dot{m}_L$	$\left[\frac{kg}{s}\right]$	*Hmotnostní tok vzduchu, léto.*
c_p	$\left[\frac{J}{kgK}\right]$	*Měrná tepelná kapacita, pro suchý vzduch o teplotě 20 °C a tlaku 100 kPa.*
$t_{INLET,L}$	$[°C]$	*Průměrná teplota ohřátého vzduchu vstupujícího do kabiny vozu, léto.*
$t_{OUT,L}$	$[°C]$	*Teplota okolí automobilu, léto.*

Tepelný výkon potřebný k ochlazení 50% hmotnostního toku z recirkulační teploty 28,2 °C na teplotu 13,6 °C:

$$\dot{Q}_{O,REC} = 0{,}5 \cdot \dot{m}_L \cdot c_p \cdot \left(t_{INLET,L} - t_{REC,L}\right) = 0{,}5 \cdot 0{,}0567\frac{kg}{s} \cdot 1010\frac{J}{kgK} \cdot (13{,}6 - 28{,}2)°C = -418\,W \quad (7)$$

$t_{REC,L}$	$[°C]$	*Průměrná teplota recirkulovaného vzduchu, léto.*

Výkon uspořený využitím 50% recirkulace:

$$\dot{Q}_{U,L} = \dot{Q}_{O,REC} - \dot{Q}_{O,OUT,L} = -418\,W - (-470\,W) = 52\,W \quad (8)$$

$\dot{Q}_{U,L}$	$[W]$	*Tepelný výkon uspořený využitím recirkulace.*

V jarním případě bylo zapotřebí tepelného výkonu 610 W pro ohřátí vzduchu z 10 °C na 22,1 °C při hmotnostním průtoku 0,0499 kg/s. Teplotní rozdíl mezi vstupujícím a vystupujícím vzduchem byl 2,1 °C což při stejném hmotnostním toku představuje tepelný zisk 106 W.

10 DISKUZE

V této práci byla použita relevantní metodika k určení rychlostního a teplotního pole v kabině automobilu pro různé provozní podmínky. Vyhodnocení výsledků simulací a jejich porovnání s naměřenými daty vedla ke zjištění nepřesností a dílčích problémů týkajících se zejména přesnosti určení okrajových podmínek a jejich míře zjednodušení. Tato kapitola shrnuje tato zjištění a nabízí možná řešení vedoucí k optimalizaci výpočetního CFD modelu. Samotná optimalizace modelu již ale přesahuje rámec této diplomové práce.

10.1. Diskuze k výsledkům simulace

Očekávaným zjištěním bylo, že pro simulování letního případu v režimu HVAC on s uvažováním recirkulace bylo dosaženo přesnějších výsledků než bez uvažování recirkulace. V simulaci se 100% zastoupením hmotnostního toku vycházejícího vzduchu ven z vozu zadní částí odpovídal průměrný rozdíl vzduchu hodnotě 2,8 °C a průměrný rozdíl povrchových teplot hodnotě 4,1 °C. V simulaci, která byla prezentována v kapitole 8.3 Léto HVAC on, ve které bylo uvažováno s 50% recirkulací, resp. nastavením outletu z 50 % hmotnostního toku v přední části vozu, odpovídal průměrný rozdíl vzduchu hodnotě 2,2 °C a průměrný rozdíl povrchových teplot hodnotě 3,7 °C. To znamená, že zavedením 50% recirkulace byly získány přesnější výsledky, a to řádově o 20 % u teplot vzduchu a o 10 % u povrchových teplot.

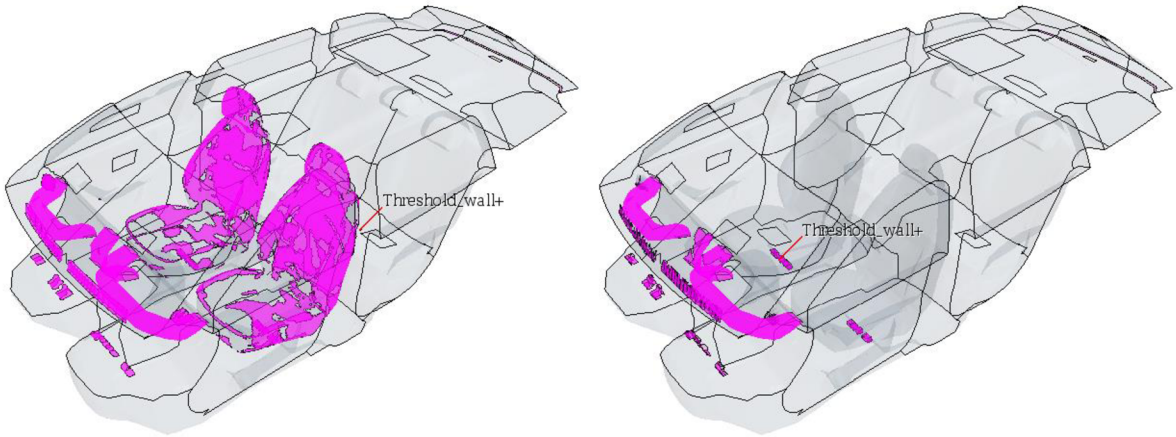
Iteračním postupem je možné zjistit ideální poměr hmotnostních toků vystupujících z vozu mezi recirkulací a outlet výstupem v zadní části vozu. Předpoklad 50% recirkulace s konstantně otevřenou recirkulační klapkou byl navržen tak, aby se přiblížil reálnému stavu. V reálném stavu během automatického režimu HVAC systému Climatronic je recirkulační klapka otevírána a zavírána skokově dle aktuální potřeby – v reálu může docházet k časově neustálenému ději. V práci byl uvažován pouze časově ustálený děj, a proto má problematika recirkulace vzduchu velký prostor pro zlepšení v navazujících pracích.

V zimním případě se zapnutým systémem HVAC bylo zjištěno, že bez zahrnutí úrovně nohou do průměrných hodnot teploty a rychlosti vzduchu byla průměrná teplota vzduchu 29,1 °C oproti 32,3 °C a rychlost vzduchu 0,17 m/s oproti 0,39 m/s. Rychlost vzduchu u spolujezdce v úrovni nohou byla až 1,7 m/s, tzn. že i teplotní ovlivnění vneslo velký podíl do celkového průměrného rozdílů. Ovlivnění bylo způsobeno umístěním sledovaných bodů do hlavního proudu přiváděného vzduchu. Sledované teploty vzduchu byly v zimním případě v průměru vyšší než naměřené, ale naopak teploty povrchové byly celkově nižší než naměřené. Tyto rozdíly poukazují na problematiku řešení mezní vrstvy v blízkosti povrchů a možností zlepšit výsledky pomocí vhodnější diskretizace výpočetní sítě zohledňující hodnotu Wall y+.

10.1.1.Hodnota Wall y+

Hodnota Wall y+ je důležitá pro automatickou volbu modelu výpočtu v mezní vrstvě a je zejména závislá na rychlosti média v přístěnné oblasti. Pro hodnoty kolem jedničky a pod cca 5 až 10 si program Star-CCM+ automaticky volí jiný model než pro hodnoty kolem 30 nad cca 20 až 25 a více. Na obrázku 10.1 bylo zobrazeno porovnání hodnot Wall y+ nad 1 a nad 5 v zimním případě HVAC on. Barevná oblast zobrazuje místa, kde je splněna podmínka, tedy např. v obrázku vlevo je hodnota Wall y+ vetší než 1 v přívodních kanálech a na předních

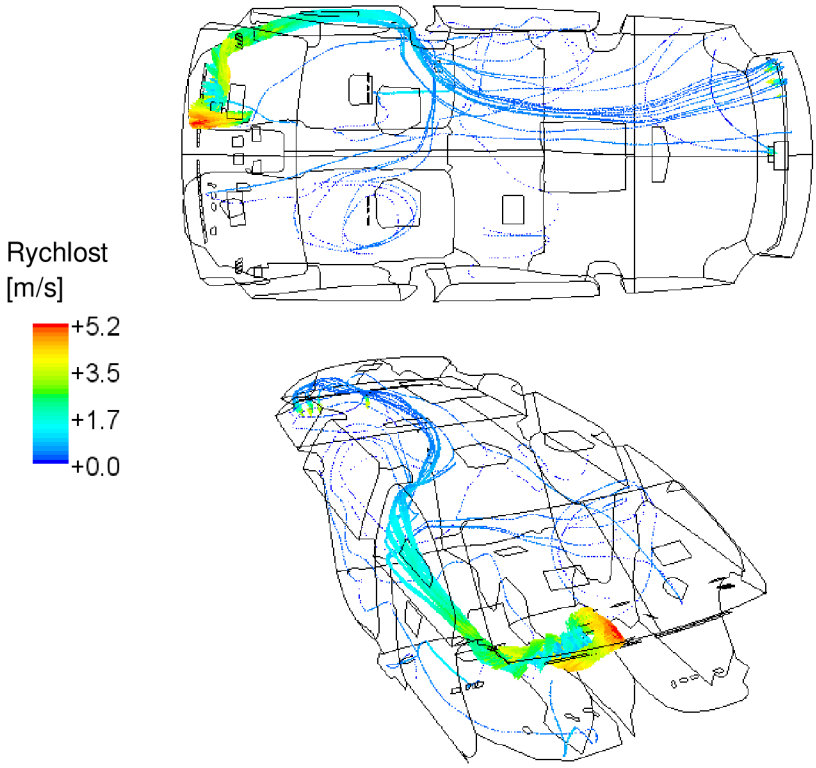
sedačkách, naopak vpravo už sedačky nejsou zobrazeny, což znamená, že jejich hodnota je menší než 5.



Obrázek 10.1 Porovnání hodnoty Wall+, vlevo větší jak 1, vpravo větší jak 5.

10.1.2.Streamline

Vykreslením Streamline lze pozorovat tok částic prostorem. Na obrázku 10.2 byla zobrazena trajektorie pouze krajní vyústky na straně spolujezdce v zimním případu HVAC on. Hlavní proud se opírá do bočního okna a mezi sloupkem a opěradlem sedadla pokračuje do zadní části vozu a následně do Outlet oblasti. Bylo zjištěno, že se určitá část toku vzduchu v přední části vozu odklonila do oblasti řidiče. V zadní části vozu byl tok částic vzduchu odkloněn více od hlavního proudu. Ve vzduchovodu byla rychlost vzduchu až 5,2 m/s, uvnitř vozu byla

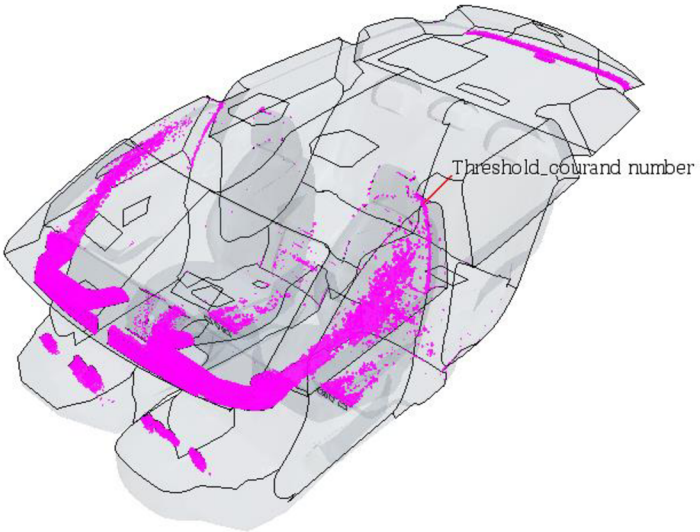


Obrázek 10.2 Streamline boční vyústky u spolujezdce, zima HVAC on

rychlost vzduchu pod 1,7 m/s. Další zobrazení streamline trajektorie částic bylo uvedeno v tištěné příloze pro zimní, jarní a letní podmínky (viz obrázky P8 až P11).

10.1.3.Courantovo číslo

Courantovo číslo lze v simulaci zobrazit pouze pro nestacionární děj. Hodnota Courantova čísla vypovídá o vhodně zvoleném časovém kroku simulace, velikosti buňky a rychlosti proudění média uvnitř sledovaného objemu. Na obrázku 10.3 jsou barevně zobrazeny všechny objemové buňky v Unsteady simulaci zimního případu s HVAC on pro která je hodnota Courantova čísla větší než 1. V oblasti přívodních kanálů byla rychlost vzduchu cca 3 m/s, rozměr buňky byl 12 mm a časový krok byl 0,01 s. Znamená to, že částice vzduchu dokáže za 1 sekundu urazit vzdálenost 3 metrů, tedy za 0,01 s 30 mm. Velikost buňky byla ovšem pouze 12 mm, to znamená že za jeden časový krok částice urazí dráhu více než dvou buněk, tento jev je nežádoucí z důvodu nepřesnosti výsledků a fyzikální podstaty numerického modelování.



Obrázek 10.3 Zobrazení Courantova čísla

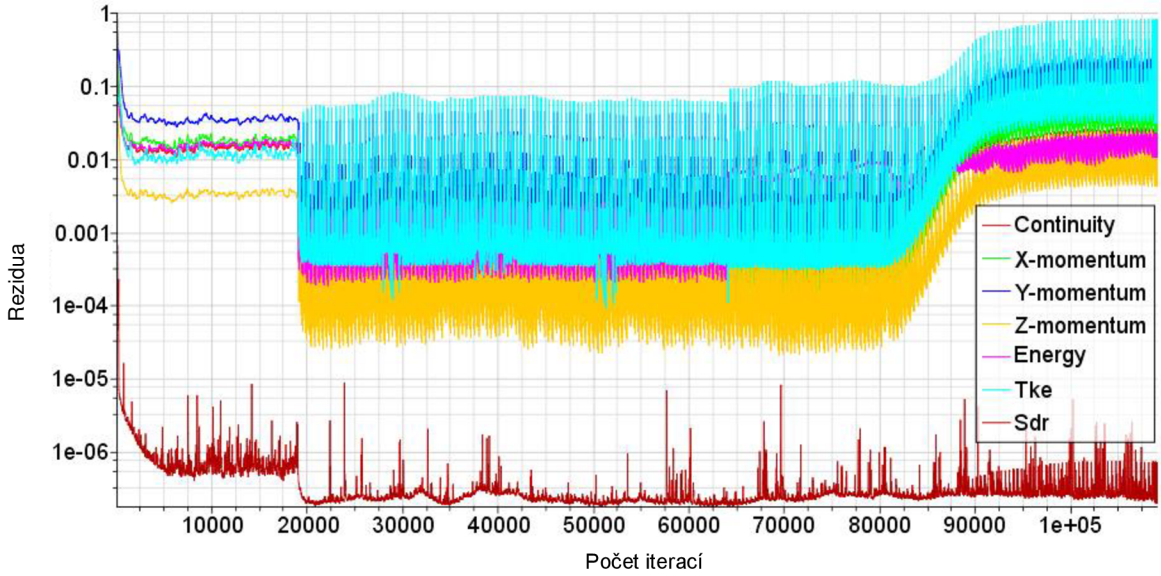
10.1.4.Porovnání Steady a Unsteady simulace

Zimní případ se zapnutou ventilací byl řešen i Unsteady nastavením, tedy s nestacionárním průběhem. Časový krok byl 0,01 a počet vnitřních iterací byl 15. Bylo zjištěno, že sledovaná průměrná teplota vzduchu vzrostla z 2,7 °C (Steady) na 3,0 °C (Unsteady – diskretizace 2. řádu). U sledované průměrné povrchové teploty bylo zjištěno zlepšení z 5,7 °C (Steady) na 5,5 °C (Unsteady – diskretizace 2. řádu), tj. procentuální zlepšení pouze o 3,5 %.

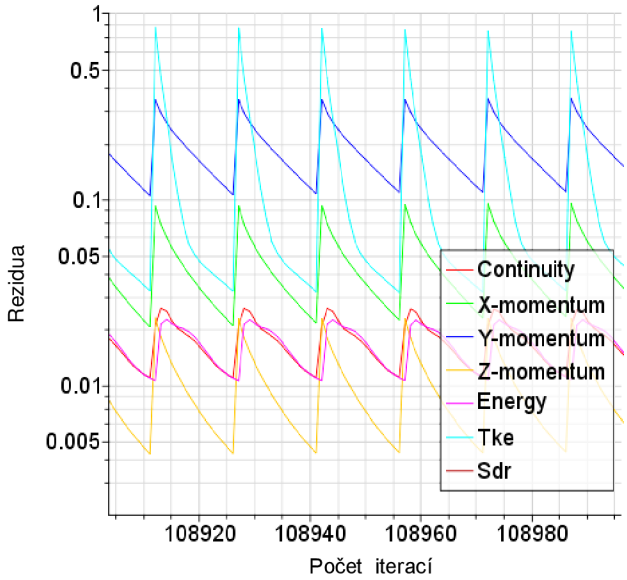
Graf 10.1 zobrazuje rozdílné hodnoty reziduí mezi Steady a Unsteady. Od 0 do 20 000 iterací probíhala Steady simulace, poté byla simulace přepnuta na Unsteady 1. diskretizačního řádu, a to až do 80 000 iterace – zde je jasně patrný pokles reziduí např. pro energii z 0,01 až téměř na 0,0001, tedy o 2 řády zlepšená přesnost. Poté byl nastaven 2. diskretizační řád v Unsteady a rezidua prudce stoupla na hodnoty velmi podobné Steady simulaci.

Hodnota reziduí se u nestacionárních simulací hodnotí podle velikosti rezidua na konci vnitřní iterace. V grafu 10.2 je patrná konvergence sledovaných fyzikálních veličin (je patrná pouze po přiblížení).

Rozdíl mezi Steady a Unsteady ve sledovaných teplotách nebyl zásadní, mezi residui Steady a Unsteady 2. řádu nebylo zaznamenáno také téměř žádné zlepšení a simulace s nestacionárním průběhem jsou mnohonásobě časově náročnější než stacionární. Vyhodnocování Unsteady simulací s 1. řádem diskretizace nemá fyzikální podstatu. Volba Steady simulace byla z výše uvedených důvodů zvolena vhodně.



Graf 10.2 Průběh reziduí od Steady, přes Unsteady 1. řádu až po Unsteady 2. řádu.



Graf 10.1 Rezidua po přiblížení konce grafu 10.1 – Unsteady simulace 2. řádu

Zimní případ HVAC on byl tedy vyhodnocován v rozmezí 10 tisíc iterací, mezi iteracemi 9 000–19 000 byly průměrovány veškeré sledované teploty. Rezidua energie a kontinuity se blížila k hodnotě 0,01. Velmi podobně vypadala Steady rezidua ostatních případů v režimu HVAC on. V režimech HVAC off byla rezidua o řád přesnosti horší než u HVAC on.

10.2. Zjednodušení modelu oproti realitě

Příčiny rozdílů mezi reálným stavem a měřením byl zejména v okrajových podmínkách a v dalších zjednodušeních modelu. Nejdříve byly problémy uvedeny přehledně v odrážkách a následně některé z nich byly rozepsány v odstavcích níže.

- Neuvažované tepelné zisky od spalin vedoucí pod podlahou.
- Neuvažované tepelné zisky zářením, které byly v klimatické komoře od pomocných svítidel v odhadovaném výkonu až 600 W.
- Nedokonale navržené tepelné zisky od bloku motoru, resp. chyba v okrajové podmínce teploty okolí palubní desky – do výčtu spadá teplo od bloku motoru, od přiváděného vzduchu kanály umístěnými těsně za palubní deskou, průvzdušnost z teploty okolí, a průvzdušnost z kabiny vozu.
- Podstatně větší tepelné zisky v oblasti krytu kufru oproti měření, během měření nedopadalo solární záření na kryt kufru (důvod byl v rozdílu délky vozu vůči nastavitelné délce solárních svítidel), ovšem v simulaci solární záření na tuto plochu dopadalo, teploty povrchu zadního okna byly v simulaci oproti měření až 3× větší než byl průměrný rozdíl.
- Rozdíl plochy mezi simulovanou vnitřní částí a reálnou vnější částí, např. střecha.
- Vůz nebyl simulován během jízdy, ale v režimu stání – součinitel přestupu tepla (dále SPT) je velmi rozdílný – pro rychlosti vzduchu do 3 m/s je SPT menší než 20 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ a při jízdě nad 100 km/h je SPT větší než 100 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ (PAVELEK, 2011; THESEUS-FE, 2011), vyšší SPT zvětšuje celkový přestup tepla a také rozdíl mezi simulovanými režimy se zapnutým systémem HVAC on a parkovacím stavem.
- Nedokonale určené materiálové vlastnosti vozu.
- Nedokonale navržený úhel směru proudu vzduchu z vyústek.
- Nepřesné, resp. zjednodušené zadávání okrajových podmínek součinitele přestupu tepla na vnější straně vozu a emisivity povrchů.
- Nesprávná úsťová rychlost vzduchu z vyústek.
- Rozdílná teplota okolí mezi měřením a simulací, např. v zimním případě bylo v klimatické komoře deklarovaných −20°C, ale na čelním skle bylo změřeno −22°C a na zadním skle −18 °C.
- V simulacích nebyla uvažována vlhkost vzduchu.
- Recirkulace v letním případě HVAC on byla uvažována pro stacionární děj, v reálném stavu se může jednat o nestacionární děj – recirkulační klapka v automatickém režimu HVAC systému v některých případech skokově otevírá a zavírá dle aktuální potřeby.

Z měření v projektu CKAP nelze přesně určit, které povrchy byly ozářeny a které nebyly. Bylo známo, že délka solárních zářičů byla kratší než délka vozu, tzn. na určitá místa solární záření nezasahovalo. Problémová místa mohla být v zadní části vozu na krytu kufr, resp. přes zadní sklo nemuselo během měření procházet vůbec žádné solární záření a tím pádem byly zmenšeny tepelné zisky a také naměřená povrchová teplota zadního skla. Z porovnání povrchový teplot zadního skla v režimu HVAC off lze usuzovat tento jev. Zde byly rozdíly mezi měřením a simulací až 8,7 °C, což je cca 3× větší rozdíl, než byl průměrný rozdíl. Pro budoucí řešení obdobného zadání se nabízí vytvořit model klimatické komory

s uvažováním polohy lamp vůči testovanému vozu a výpočtu dopadající krátkovlnné radiace na povrch vozu.

Vytvořená vnitřní geometrie vozu zachovávala velkou míru detailu pro simulování proudění vzduchu uvnitř vozu. Určitou mírou nepřesnosti ovšem byla právě rozdílnost geometrie mezi interiérem a exteriérem. Do okrajových podmínek se zadával součinitel přestupu tepla z vnější strany modelu a ve spojitosti s rozdílností velikostí povrchů např. u střechy je jasně viditelná nepřesnost modelu.

V simulacích nebylo uvažováno s vlhkostí vzduchu nebo také RH (Relative Humidity), byl uvažován pouze suchý vzduch. V zimním případě HVAC on byla v kabině auta změřena 3% RH, v jarním a letním případě HVAC on se RH pohybovala mezi 5 – 12 %, v jarním případě HVAC off se RH pohybovala mezi 20 – 28 % a v letním případě HVAC off se RH pohybovala mezi 9 – 16 %.

Zjednodušené zadávání okrajových podmínek souvisí se součinitelem přestupu tepla na vnější straně vozu, emisivitou povrchu. Součinitel přestupu tepla byl zjednodušen, resp. průměrován pro 6 základních oblastí, data z projektu CKAP obsahují podrobnější hodnoty okrajových podmínek, a to celkem 10 oblastí a každá tato oblast byla průměrována z 2 až 5 měřících míst. Emisivita všech vnitřních povrchů se z údajů CKAP pohybovala v rozmezí 0,96–0,98 [-], pro zjednodušení zadávání OP byla navržena hodnota 0,97 [-] pro všechny vnitřní povrchy. Podobné zjednodušení bylo zavedeno i u emisivity vnější. Pro tuto práci byla tato zjednodušení adekvátní. V navazujících pracích je prostor pro zpřesnění těchto okrajových podmínek.

Nesprávná úsťová rychlost vzduchu z vyústek mohla být zapříčiněna rozdílem podmínek mezi měřeními (POKORNÝ, 2015) a (PLANKA, 2015) nebo nedokonalým měřením ploch vyústek ve zdroji (PLANKA, 2015) a z toho plynoucí nesprávné určení procentuálního zastoupení hmotnostního toku vyústkami.

Elevační úhel solárního záření byl pro letní a jarní podmínky v měření CKAP nastaven na 90 °. Pro letní podmínky je toto nastavení reálné, aby bylo reálné i pro jarní podmínky musel by vůz stát v mírném svahu přivráceném ke Slunci. Simulován byl i zimní případ s 45° elevačním úhlem solárního záření. Ve střední Evropě v zimním období lze dosáhnout elevačního úhlu 45 °, pokud automobil stojí v mírném 5–10° svahu tak, aby zvětšoval úhel mezi Sluncem a automobilem (SUNEARTHTOOLS, 2018).

Dalším omezením byla simulace letního případu HVAC on s recirkulací vzduchu. Zavedením 50% recirkulace z původní 0% recirkulace bylo dosaženo zlepšení výsledků simulace řádově o 20 % u teplot vzduchu a o 10 % u povrchových teplot. Výpočet byl stacionárního charakteru, ale recirkulační klapka se v reálných podmínkách během automatického režimu HVAC systému Climatronic otevírá a zavírá skokově dle aktuální potřeby. Nadstavbou této práce by mohlo být zjištění optimálního recirkulačního poměru tak, aby se rozdíl teplot mezi simulací a měřením snížil na minimum. Další možností by mohlo být simulování mnohem výpočetně náročnějšího nestacionárního děje.

10.2.1. Vliv úhlu přiváděného vzduchu

Následující obrázek zobrazuje rozdíl teplot až 20 °C mezi sledovanými body (bílé tečky v obrázku vlevo) v zimním období v režimu HVAC on. Příčinou bylo nesprávné nastavení úhlu vyústek. Vlevo byl úhel 0 ° a vpravo 30 °. Panel barev definující teploty nebyl uveden, pro obě

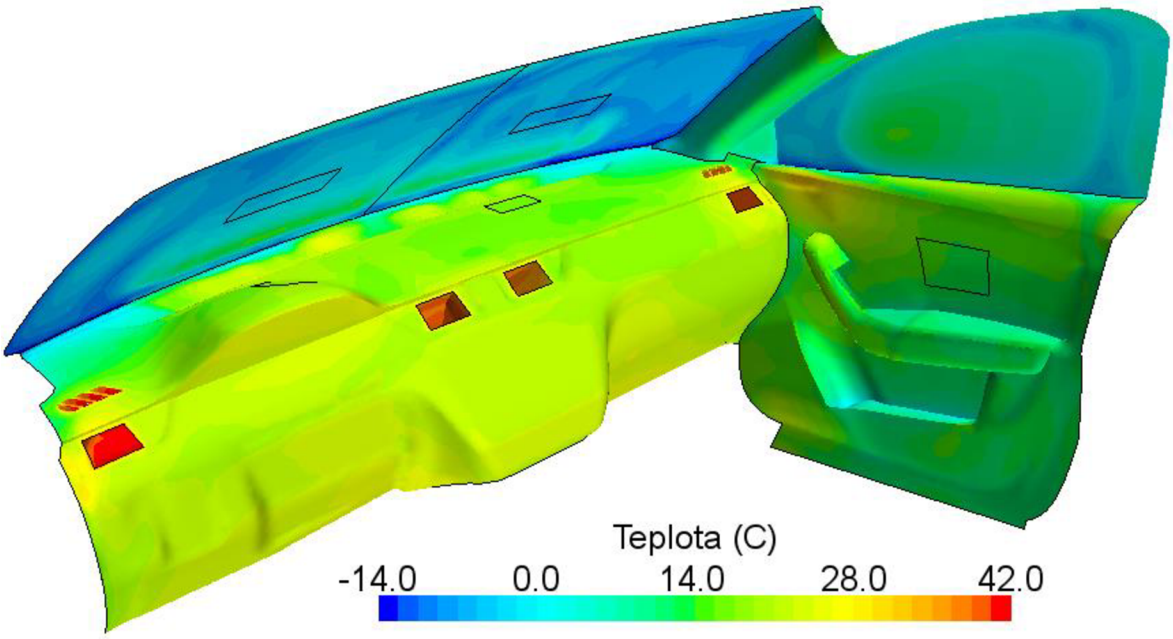
simulace byl rozsah stejný, porovnání poukazuje na rozdíl úhlu vyústky. Pro všechny simulace se zapnutým systémem HVAC on byl zvolen úhel 20°.

Obrázek 10.4 Rozdíl v distribuci teploty z vyústky s 0°a 30°sklonem v oblasti nohou u spolujezdce

10.2.2.Omezení modelu – palubní deska

Velkým omezením modelu byla shledána palubní deska. Do průměru rozdílu povrchových teplot nebylo uvažováno s palubní deskou z důvodu obtížnosti zadávání okrajových podmínek palubní desky, a to zejména teploty vzduchu uvnitř palubní desky. U ní bylo obtížné odhadnout míru vlivu teploty přiváděného vzduchu rozvody vzduchu. Uvažovat o okrajové podmínce adiabatické stěny pro palubní desku se ukázalo za nevhodné, neboť např. v letním případě HVAC on je patrné ovlivnění povrchové teploty palubní desky studeným vzduchem přicházejícím z výparníku, kde typicky za výparníkem bývá 3–5 °C (lze vyčíst z CAN sběrnice vozu). Rozdíl teplot palubní desky mezi simulací a měřením byl 3 až 5ti násobek průměrného rozdílu ostatních částí.

Obrázek 10.1 prezentuje povrchovou teplotu palubní desky v zimním režimu HVAC on. Povrchová teplota ve sledovaných oblastech na palubní desce byla o cca 13 °C nižší než během měření. Další velký rozdíl byl u čelního skla cca 11 °C, u ostatních režimů nebyl zaznamenán tak velký rozdíl. Ovšem rozdíl teplot palubní desky byl u všech sledovaných režimů od 8,7 °C do 23,1 °C, průměrný rozdíl byl 13,4 °C.



Obrázek 10.5 Povrchová teplota palubní desky a přilehlých částí v zimním režimu HVAC on.

11 ZÁVĚR

Prvopočátkem této práce bylo vytvoření CAD modelu skutečného automobilu tak, aby bylo možné simulovat proudění vzduchu uvnitř vozu ve výpočetním programu Star-CCM+. 3D geometrie byla vytvořena precizně s velkou mírou zachování detailů interiéru vozu. S pasažéry ve voze nebylo uvažováno z důvodu porovnávání simulace s měřením, při kterém byl vůz umístěn v klimatické komoře, nepohyboval se a uvnitř nebyla žádná posádka. Měření proběhla v rámci projektu CKAP NETME centra na VUT FSI v Brně na automobilu Škoda Octavia Combi III během různých klimatických podmínek za cílem identifikovat tepelnou zátěž kabiny pro jednotlivé klimatické podmínky. Z tohoto projektu byla získána potřebná data okrajových podmínek, jako teplota a hmotnostní tok přiváděného vzduchu, teplota okolí, intenzita solárního záření, součinitel přestupu tepla, součinitel tepelné vodivosti, tloušťka jednotlivých vrstev stěn vozu a emisivita povrchů. Zapotřebí bylo dopočítat tepelný odpor stěn modelu vozu a úsťovou rychlost jednotlivých vyústek.

Předložená práce obsahuje podrobný popis základních operací v programu Star-CCM+, popis základních funkcí CAD programu Rhinoceros, podrobnosti spojené s nastavením simulace a také informace o provedeném testu nezávislosti sítě. Jádrem práce bylo získat výsledky celkem šesti simulací zimních, jarních a letních podmínek v režimech zapnutého a vypnutého systému HVAC. Výsledky všech těchto případů byly prezentovány nejdříve jednotlivě formou rychlostních a teplotních polí. Následně byly vyhodnoceny jejich teploty vzduchu a povrchové teploty mezi sebou a dále porovnány s naměřenými hodnotami. Bylo zjištěno, že celkový průměrný rozdíl sledovaných teplot mezi měřením a simulací byl 2,8 °C, kde **průměrný rozdíl teplot vzduchu** byl **2,3 °C** a **průměrný rozdíl povrchových teplot** byl **3,4 °C**. Velkým omezením modelu byla zejména palubní deska, která představovala průměrný rozdíl mezi simulací a měřením 13,4 °C.

Tato práce přináší relevantní metodiku, jak simulovat prostředí v kabinách automobilů a zároveň poukazuje na dílčí problémy, které byly během řešení této diplomové práce identifikovány, a to zejména zjištění teploty okolí palubní desky a přesné zjištění ploch ozářených solárními lampami během měření a s tím spojené zpřesnění tepelných zisků v kabině automobilu. Pro budoucí řešení obdobného zadání se nabízí vytvořit model klimatické komory s uvažováním polohy lamp vůči testovanému vozu a výpočtu dopadající krátkovlnné radiace na povrch vozu. Nadstavbou této práce by mohlo být také vytvoření optimalizovaného CFD modelu, které by spočívalo v zpřesnění okrajových podmínek, a to zejména zpřesnění tepelných zisků od bloku motoru, přívodních kanálů a spalin vedoucích pod podlahou, a také v přesném popisu chování recirkulační klapky. Dále pak také optimalizaci výpočetní sítě, zejména v přístěnných oblastech.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

ALTAIR ENGINEERING, Innovation Intelligence®, Cabin Comfort Modeling with AcuSolve, 2012.

AMBS, R., Calver, Matthes, Cucuz, Computation of thermally coupled transient cabin flow for predicting passenger thermal comfort as well as defrost and demist performance, Visteon Corporation, Kerpen/Germany und Plymouth/Michigan, USA, 2011.

AMBS, R., Improved Passenger Thermal Comfort Prediction in the Preprototype Phase by Transient Interior CFD Analysis Including Mannequins, SAE Paper 2002-01-0514, 2002.

BLEJCHAŘ, Tomáš. Turbulence - Modelování Proudění - CFX. 2010. ISBN 978-80-248-2606-6.

CD-ADAPCO. STAR-CCM+® Documentation Version 10.04, 2015.

ČSN 73 0540-3. Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin. Praha: Český normalizační institut, 2005.

DALY, S. Automotive Air-Conditioning and Climate Control Systems. Oxford: Elsevier Ltd., 2006. 432 s.

ELCNER, J. Transport a depozice aerosolu v dýchacím traktu člověka. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 108 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc.

FIŠER, J. Optimalizace mikroklimatu v kabinách malých dopravních letadel. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, 2011. 162 s. 7 příloh, Disertační práce. Vedoucí práce prof. Ing. MIROSLAV JÍCHA, CSc.

FIŠER, J. Letadla a automobily. Přednáška předmětu Větrání a klimatizace II, VUT Brno, FSI, OTTP,2018.

GIELDA, T.P., WEBSTER, B.E., HESSE, M.E., HALT, D.W., Impact of Computational Fluid Dynamics on Automotive Interior Comfort Engineering, AIAA Paper 96-0974, 1996.

GLÜCK, B.: Heizwasser Netze, VEB Verlag für Bauwesen Berlin. Berlin 1985.

JAROŠ M. a KATOLICKÝ J. Komplexní CFD simulace solárně ohřívaného prostoru [Konference] // Sborník 2. národní konference IBPSA-CZ “Simulace budov a techniky prostředí”. - Praha : ČVUT, 2002. - Sv. II.

LÍZAL, F. Větrání kabiny vozidla – rychlostní pole v okolí vyústek přístrojové desky. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. s. 74. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Jedelský, PhD.

NETME CENTRUM, klimatická komora [online]. VUT v Brně [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: http://netme.cz/cs/laboratories-and-facilities/

NILSSON O. H. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models [Kniha]. - Gävle : University of Gävle, 2004. - Doctor thesis.

MENTER F. R., KUNTZ M. a LANGTRY R. Ten Years of Industrial Experience with the SST [Konference] // Turbulence, Heat and Mass Transfer. - New York : Begell House, Inc, 2003. - Sv. 4.

PATANKAR S. V. Numerical heat transfer and fluid flow [Kniha]. - *místo neznámé+ : Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

PAVELEK, M., a kolektiv, Termomechanika, Vysoké učení technické v Brně, ISBN 978-80-214-4300-6, 2011.

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.

PILKINGTON GLASS HANDBOOK [online]. 2010 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: http://www.pilkington.com/resources/glasshandbook2010english.pdf

POKORNÝ, J. Databáze dat okrajových podmínek pro validaci simulačního nástroje kabiny. Zpráva k projektu TE01020020 - Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka, WP22: Human Centered Cabin Design, činnost A06: Validace simulačního nástroje kabiny, VUT Brno, FSI, OTTP, 2015.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES ©, Rhinoceros 5 For Windows User's Guide, 2016. 276 s. Dostupné z: http://docs.mcneel.com/rhino/6/usersguide/en-us/windows_pdf_user_s_guide.pdf

SCHWARZ, J. Automobily Škoda Octavia II: Octavia, Octavia Combi, 4x4, Octavia RS, Scout. 2., přeprac. a rozš. vyd. Praha : Grada, 2010. s. 548 s. ISBN 978-80-247-2962-6.

STOFFER, P., Oceanography, Atmospheric Circulation, Solar Energy Distribution, Geologycafe, 2016

SUNEARTHTOOLS, Calculation of sun's position in the sky for each location on the earth at any time of day [online]. 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php

THESEUS-FE, Theory Manual, Version 4.0. P+Z Engineering GmbH, Munich, 2011.

TU, JIYUAN, GUAN HENG YEOH a CHAOQUN LIU. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 9780080556857.

VERSTEEG, H. K. a W. MALALASEKERA. An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. 2 vyd. B.m.: Pearson Education Ltd, 2007 [vid. 2018-03-27]. ISBN 978-0-13-127498-3. Dostupné z: https://www.amazon.com/Introduction-Computational-Fluid-Dynamics-Finite/dp/0131274988

VISTEON, The Significant Role of AcuSolve at Visteon Climate Control, European HyperWorks Technology Conference, 2011. Staženo z: https://altairatc.com/europe/EHTC2011-Abstracts/EHTC-Presentations-2011/Session_02/Raymond-Ambs_Visteon_Session-2_The-Significant-Role-of-AcuSolve-at-Visteon-Climate-Control.pdf

WILCOX, David C. Turbulence modeling for CFD. 3rd vyd. B.m.: DCW Industries, 2006. ISBN 978-1928729082.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Rozměr	Název veličiny
c_p	$\left[\frac{J}{kgK}\right]$	*Měrná tepelná kapacita*
$\dot{m}_L$	$\left[\frac{kg}{s}\right]$	*Hmotnostní tok vzduchu, léto*
$\dot{m}_Z$	$\left[\frac{kg}{s}\right]$	*Hmotnostní tok vzduchu, zima*
$\dot{Q}_{O,L}$	$[W]$	*Celkový tepelný výkon potřebný k ochlazení vzduchu*
$\dot{Q}_{O,OUT,L}$	$[W]$	*Tepelný výkon potřebný k ochlazení z venkovního vzduchu, léto*
$\dot{Q}_{O,REC}$	$[W]$	*Tepelný výkon potřebný k ochlazení z recirkulace*
$\dot{Q}_{O,Z}$	$[W]$	*Tepelný výkon potřebný k ohřátí venkovního vzduchu, zima*
$\dot{Q}_{U,L}$	$[W]$	*Tepelný výkon uspořený využitím recirkulace*
$\dot{Q}_{ZK}$	$[W]$	*Zmařený tepelný výkon prostupem tepla z kabiny do okolí*
$\dot{Q}_{ZR}$	$[W]$	*Zmařený tepelný výkon nevyužitím recirkulace vzduchu*
$t_{INLET,L}$	$[°C]$	*Průměrná teplota ohřátého vzduchu vstupujícího do kabiny vozu, léto*
$t_{INLET,Z}$	$[°C]$	*Průměrná teplota ohřátého vzduchu vstupujícího do kabiny vozu, zima*
$t_{OUTLET,Z}$	$[°C]$	*Průměrná teplota vzduchu vystupujícího z kabiny vozu*
$t_{OUT,L}$	$[°C]$	*Teplota okolí automobilu, léto*
$t_{OUT,Z}$	$[°C]$	*Teplota okolí automobilu, zima*
$t_{REC,L}$	$[°C]$	*Průměrná teplota recirkulovaného vzduchu, léto*

Zkratka	Význam
CAD	*Computer Aided Design*
CFD	*Computational Fluid Dynamics*
$CKAP$	*Centrum Kompetence Automobilového Průmyslu*
$HVAC$	*Heating, Ventilation, Air Conditioning* *(Vytápění, větrání, klimatizace)*
OP	*Okrajové Podmínky*
$NETME$	*New Technologies for Mechanical Engineering* *(Centrum nových technologií ve strojírenství)*

SEZNAM PŘÍLOH

Tabulka P1 Základní informace o vytvořeném modelu.

Tabulka P2 Příkazy a jejich funkce k programu PuTTy nebo MobaXterm.

Obrázek P1 Povrchové teploty – jarní případ HVAC on.

Obrázek P2 Povrchové teploty – jarní případ HVAC off.

Obrázek P3 Povrchová síť modelu HVAC on.

Obrázek P4 Povrchová síť modelu HVAC on – zobrazení přívodních kanálů a extrudérů umístěných pod palubní deskou.

Obrázek P5 Povrchová síť modelu HVAC on – zobrazení extrudérů vyústek směřujících na nohy, nahoře vyústky zadní za řidičem, dole vyústky přední u řidiče.

Obrázek P6 Povrchová síť modelu HVAC on – zobrazení palubní desky na straně řidiče, hlavních středových vyústek, hlavní boční vyústky a vyústky defrostu.

Obrázek P7 Povrchová síť modelu HVAC on – zobrazení místa vývodu vzduchu z automobilu v zadní části vozu za zadními sedačkami, tzv. Outlet.

Obrázek P8 Objemová síť modelu HVAC on v podélném řezu na straně řidiče.

Obrázek P9 Streamline – zimní případ HVAC on (−20 °C, 0 W/m^2).

Obrázek P10 Streamline – jarní případ HVAC on (10 °C, 500 W/m^2).

Obrázek P11 Streamline – letní případ HVAC on (30 °C, 800 W/m^2).

Obrázek P12 Streamline – vlevo zimní případ HVAC off (−20 °C, 300 W/m^2) a vpravo jarní případ HVAC off (10 °C, 500 W/m^2).

Obrázek P13 Streamline – letní případ HVAC off (30 °C, 800 W/m^2).

Obrázek P14 Boundary Conduction Heat Transfer [W].

Obrázek P15 Specified Y+ Heat Transfer Coefficient [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].

PŘÍLOHY

Následující tabulka P1 prezentuje zajímavé informace o modelu jako celkový počet objemových buněk, objem vzduchu nebo celkové rozměry modelu automobilu. Tyto hodnoty byly získány z programu Star-CCM+.

Tabulka P1 Základní informace o vytvořeném modelu.

Hodnota	Jednotka	Popis
3 559 829	-	Počet objemových buněk vozu (i s přívodními kanály).
299 220	-	Počet objemových buněk - pouze přívodní kanály.
20,28	m^2	Plocha celého modelu automobilu.
0,57	m^2	Plocha přívodních kanálů.
2,709	m^3	Objem vzduchu v modelu automobilu.
0,011	m^3	Objem vzduchu v přívodních kanálech.
3,31×1,22×1,57	m	Rozměry modelu (délka x výška x šířka).

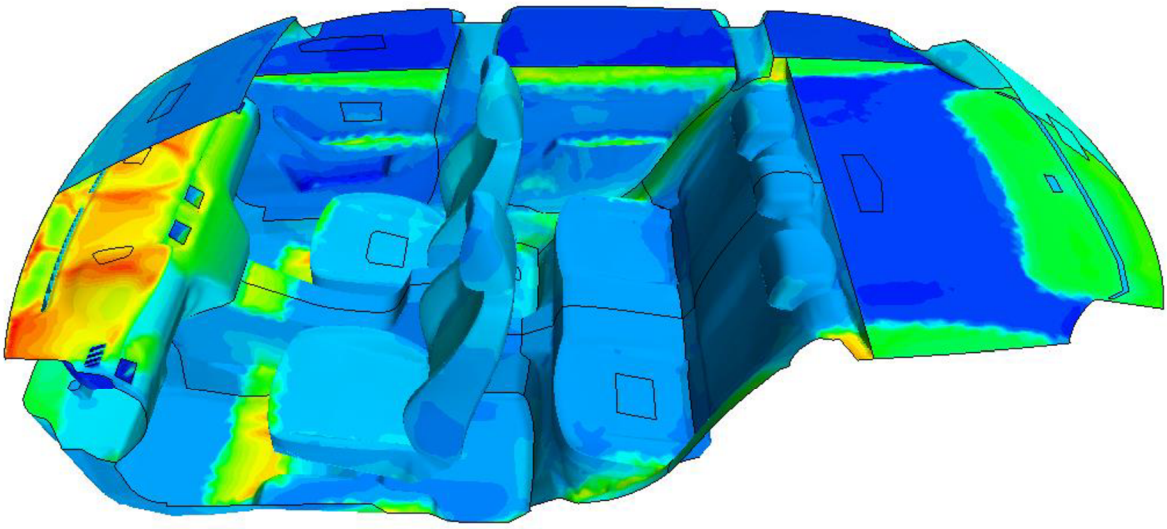
K samotným simulacím byl využit vzdálený server Cluster, který disponuje 360 sloty a je pod správou VUT FSI. 30 000 iterací Steady simulace zimního případu HVAC on o velikosti 3,6 milionů objemových buněk trvala 33 hodin na 16 slotech. 15 000 iterací Steady simulace zimního případu HVAC on o velikosti 8,4 milionů objemových buněk trvala 22 hodin na 128 slotech. 45 000 iterací Unsteady simulace zimního případu HVAC on o velikosti 3,6 milionů objemových buněk trvala 40 hodin na 48 slotech.

Propojení uložiště osobního PC se vzdáleným uložištěm probíhá přes program WinSCP v rozhraní podobnému Total Commanderu. Spouštění simulací ze vzdáleného uložiště je možné přes program PuTTY nebo MobaXterm (disponuje větším počtem funkcí). Základní funkce v těchto programech jsou uvedeny níže. Uvedené příkazy se píší do příkazového řádku a je nutné je potvrdit klávesou Enter.

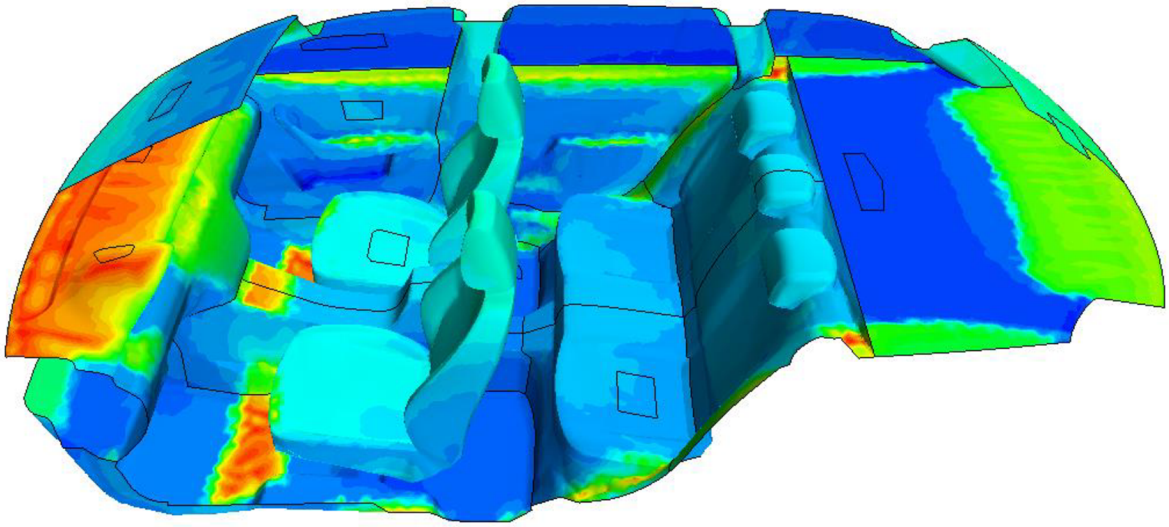
Tabulka P2 Příkazy a jejich funkce k programu PuTTY nebo MobaXterm.

Příkaz	Funkce
qsub-ccm Např.: qsub-ccm 32 Auto	Spuštění simulace. Tento příkaz spustí simulaci nazvanou Auto na 32 slotech.
qdel Např.: qdel 43552	Zruší probíhající simulaci. Zruší probíhající simulaci, která má specifické číslo 43552.
qstat-no	Zobrazí aktuální počet volných slotů na Clusteru.
qstat	Zobrazí aktuální výpočty na Clusteru a specifická čísla.
mc	Vstup do vlastního adresáře.
klávesa F10	Výstup z adresáře.
šipky	Přepínání mezi posledními příkazy.

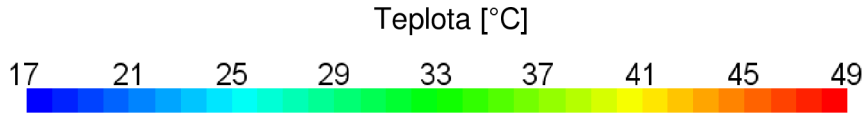
Pozn.: Program rozlišuje malá a velká písmena.

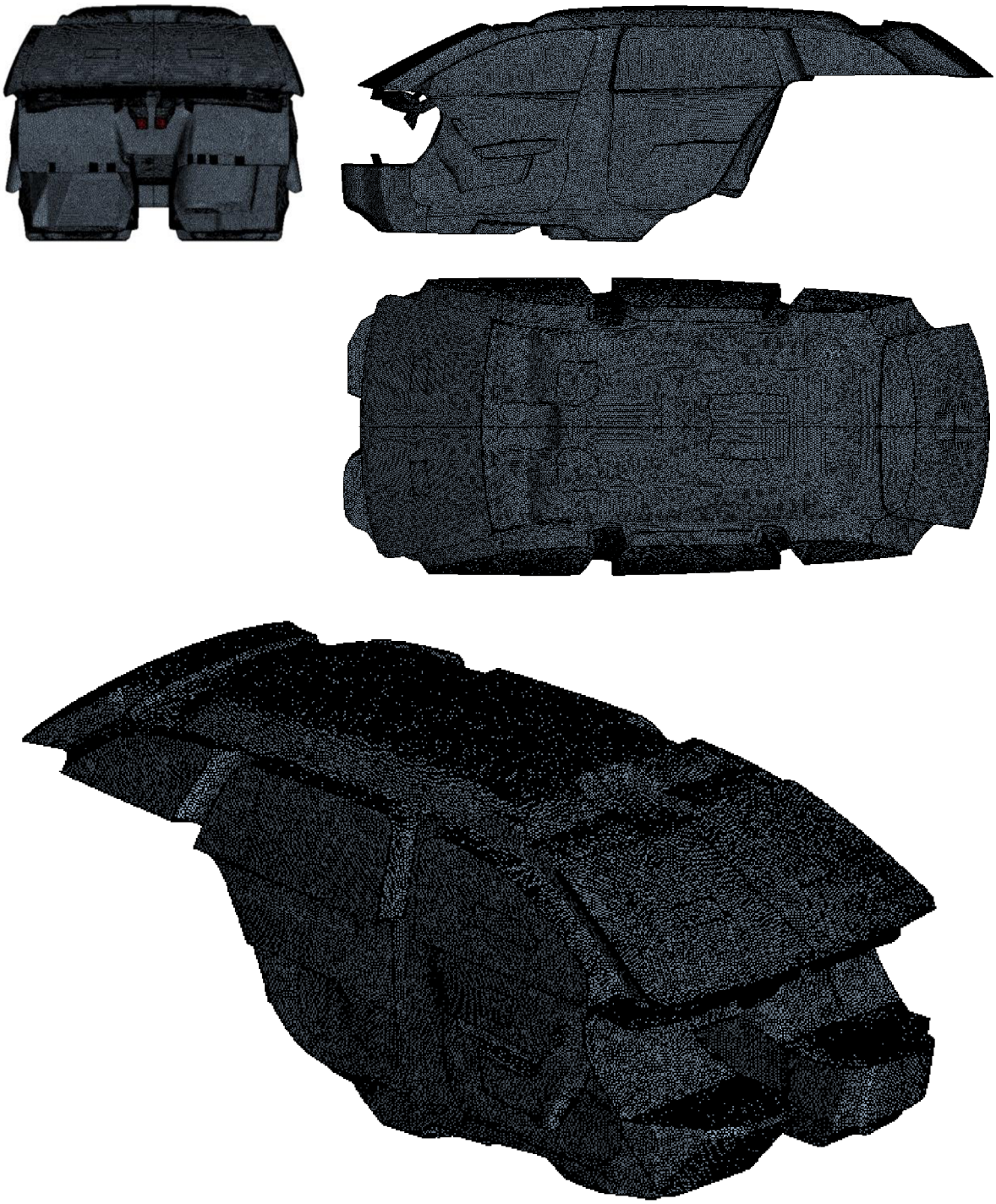


Obrázek P1 Povrchové teploty – jarní případ HVAC on.

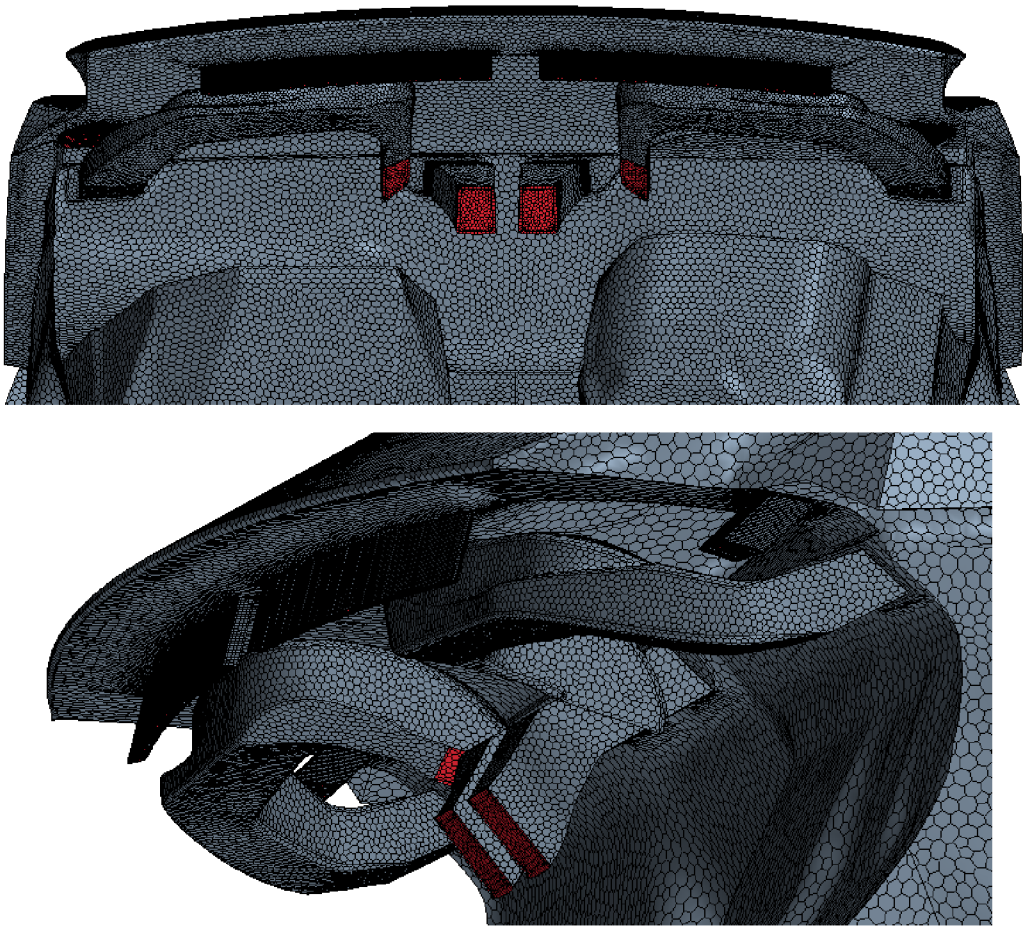


Obrázek P2 Povrchové teploty – jarní případ HVAC off.

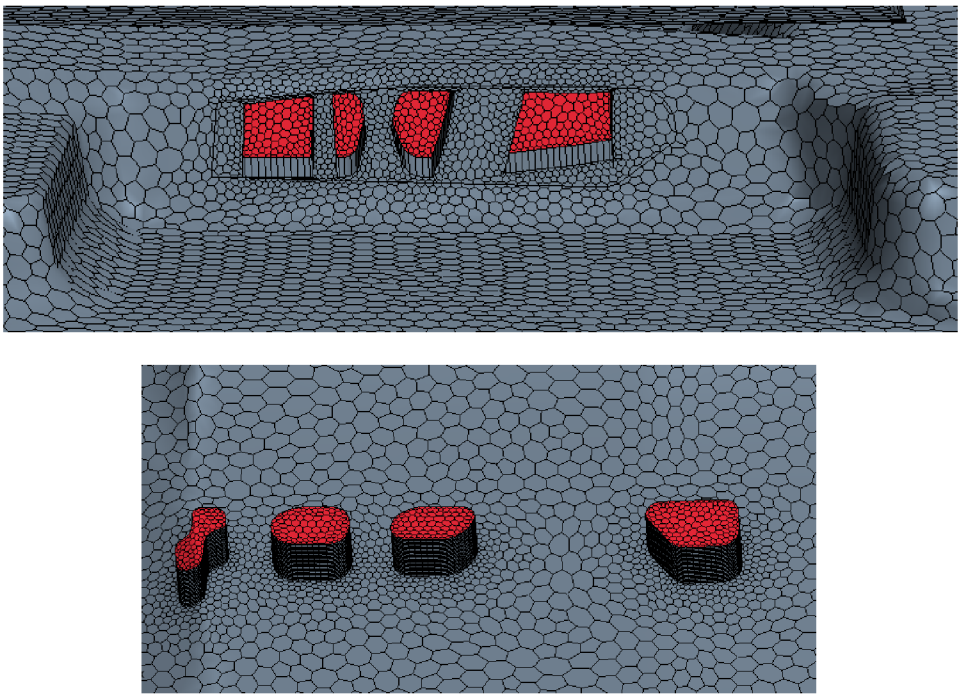




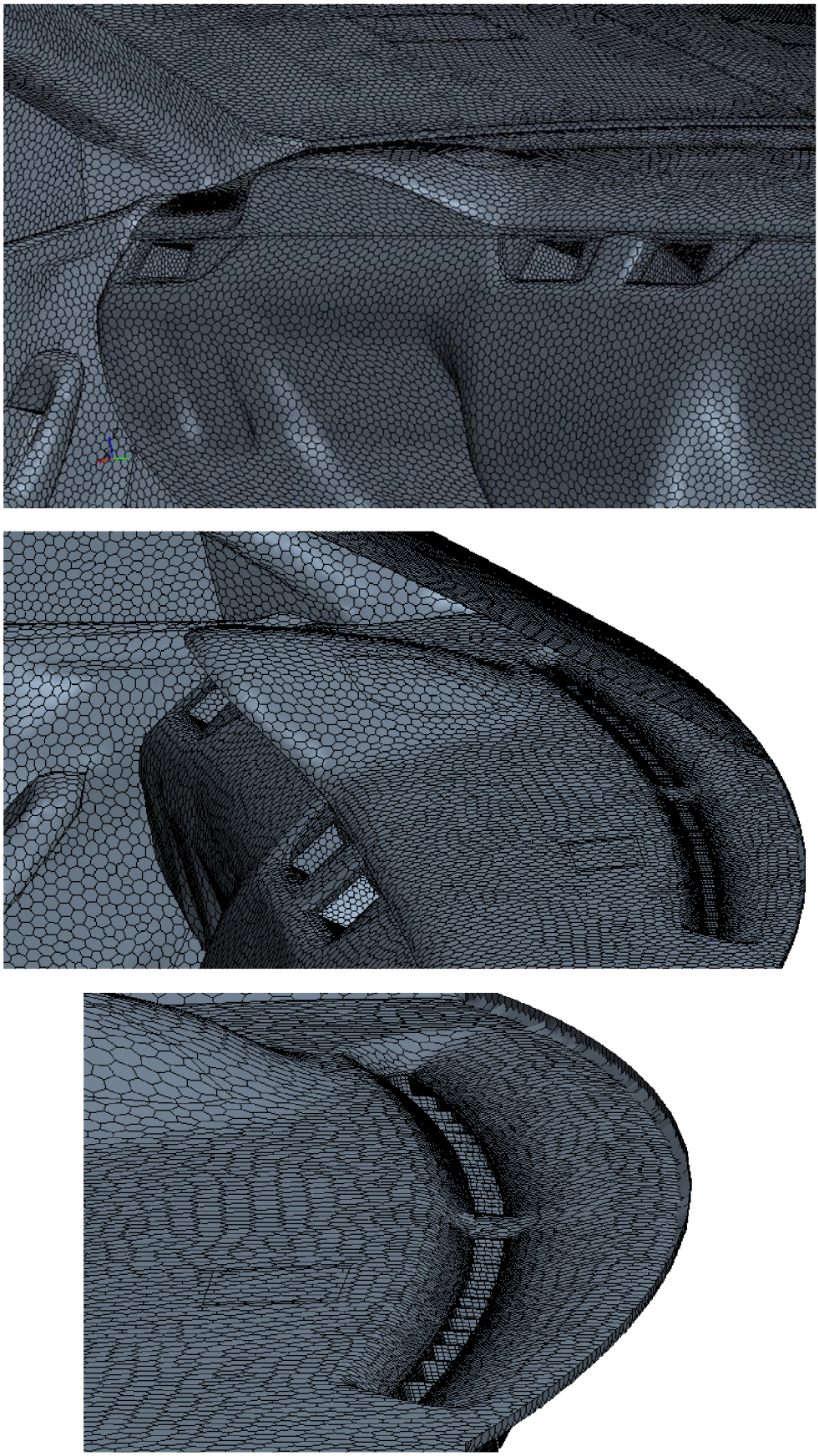
Obrázek P3 Povrchová síť modelu HVAC on.



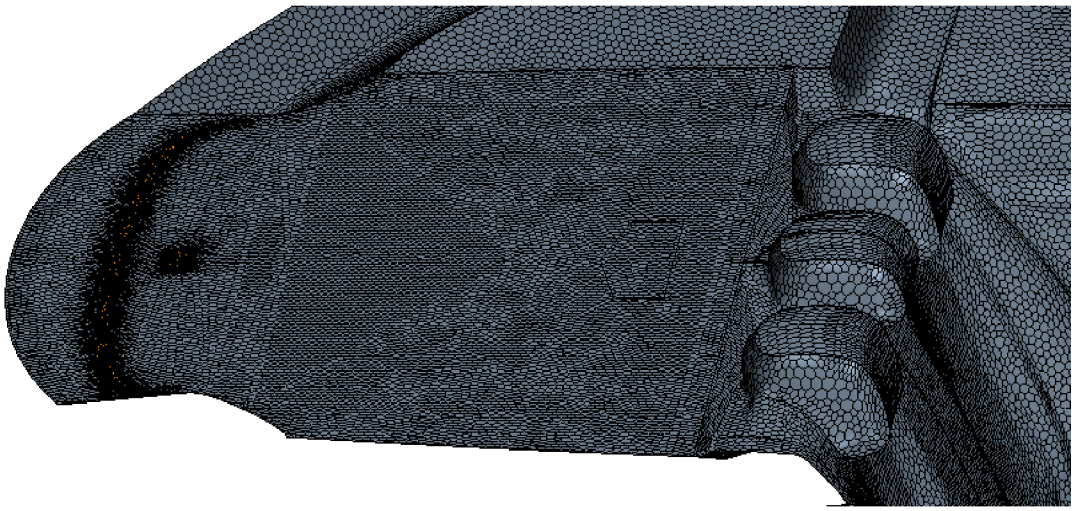
Obrázek P4 Povrchová síť modelu HVAC on – zobrazení přívodních kanálů a extrudérů umístěných pod palubní deskou.

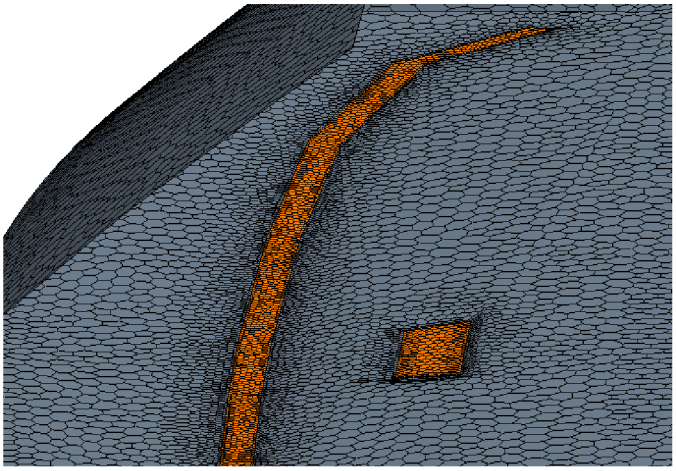


Obrázek P5 Povrchová síť modelu HVAC on – zobrazení extrudérů vyústek směřujících na nohy, nahoře vyústky zadní za řidičem, dole vyústky přední u řidiče.

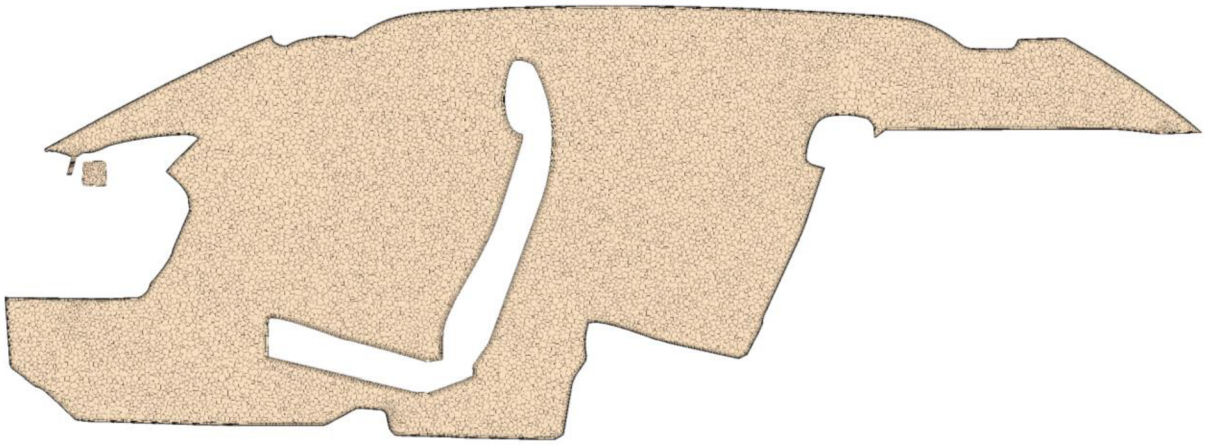


Obrázek P6 Povrchová síť modelu HVAC on – zobrazení palubní desky na straně řidiče, hlavních středových vyústek, hlavní boční vyústky a vyústky defrostu.



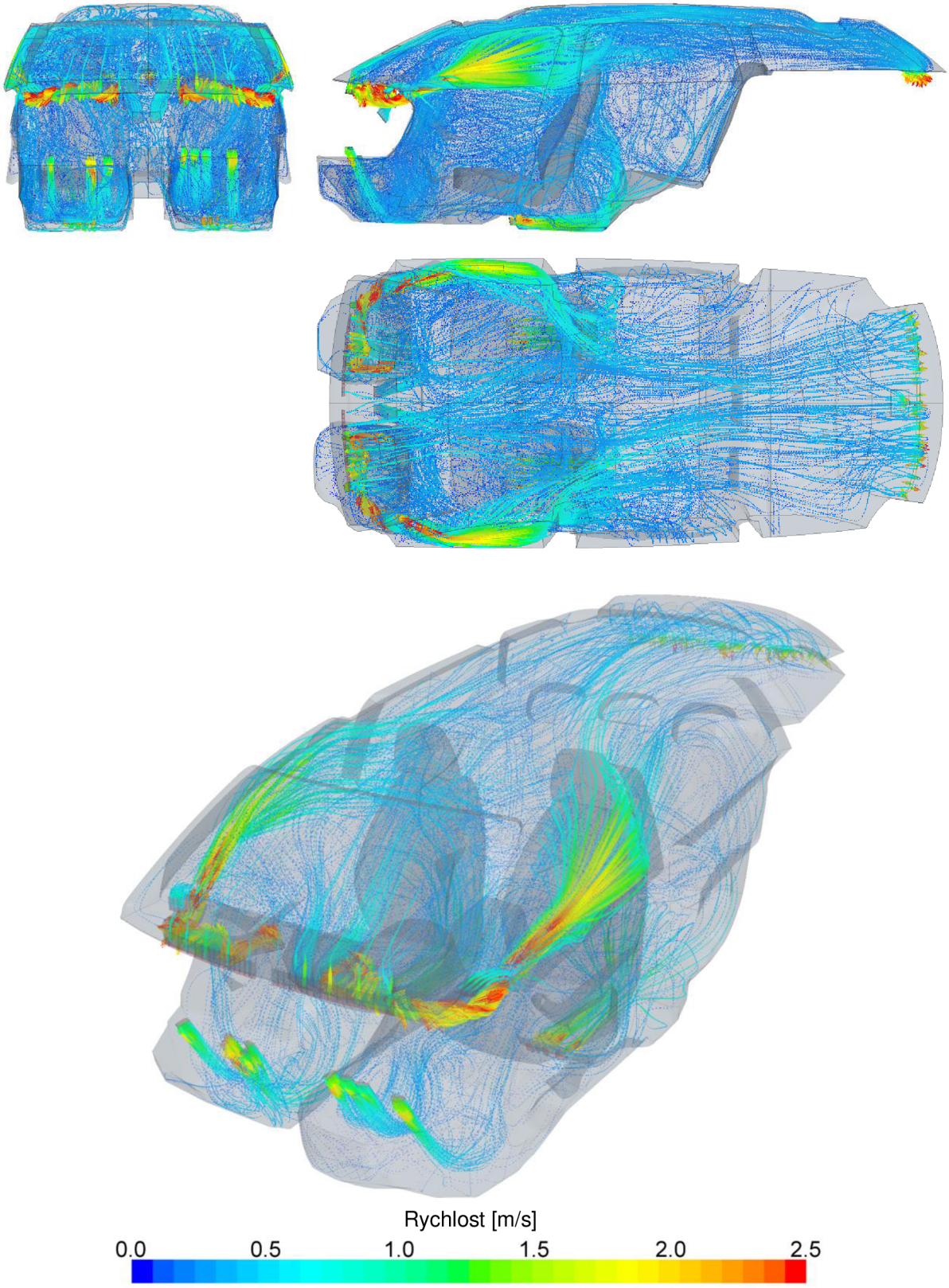


Obrázek P7 Povrchová síť modelu HVAC on – zobrazení místa vývodu vzduchu z automobilu v zadní části vozu za zadními sedačkami, tzv. Outlet.

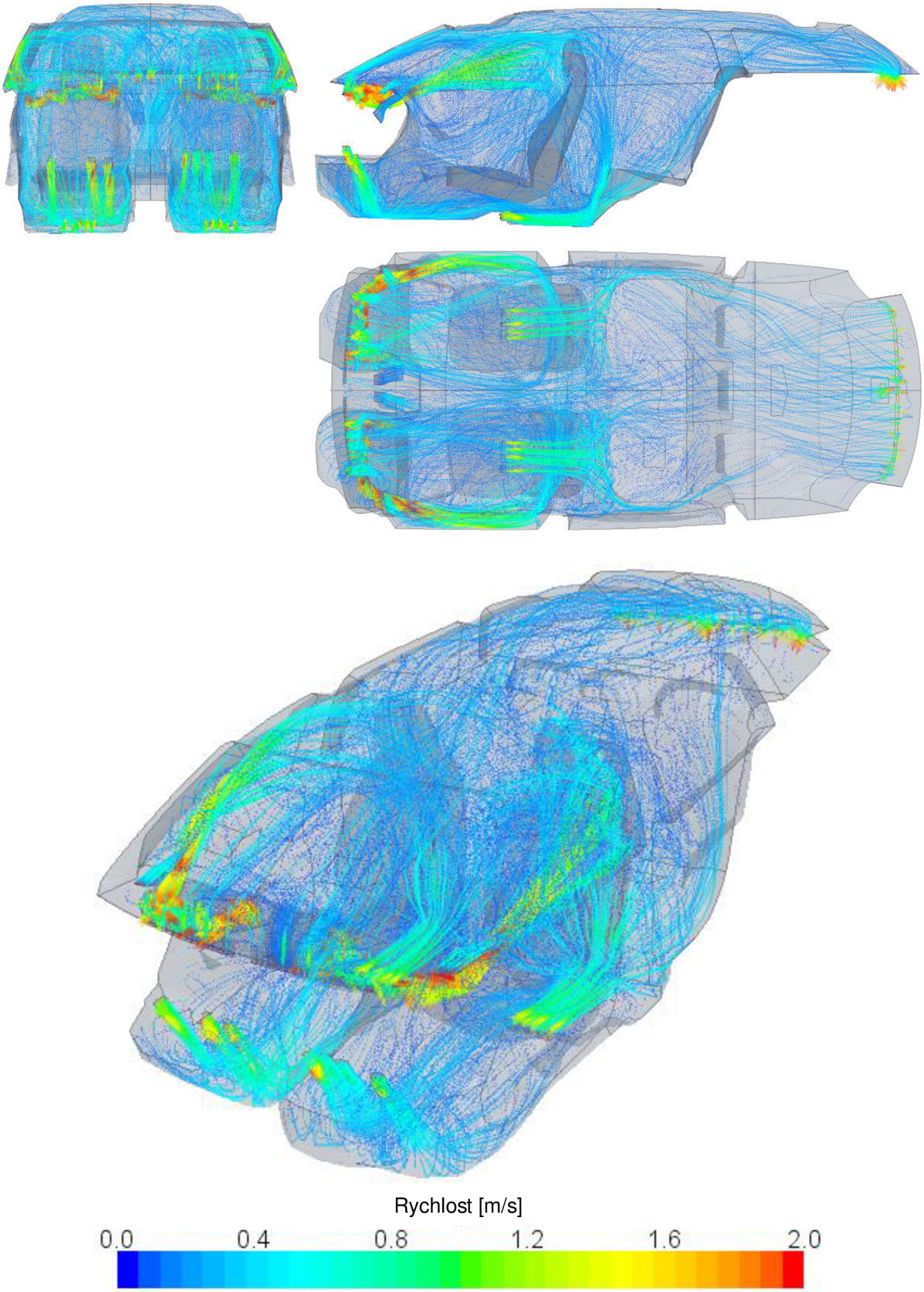


Obrázek P8 – objemová síť modelu HVAC on v podélném řezu na straně řidiče.

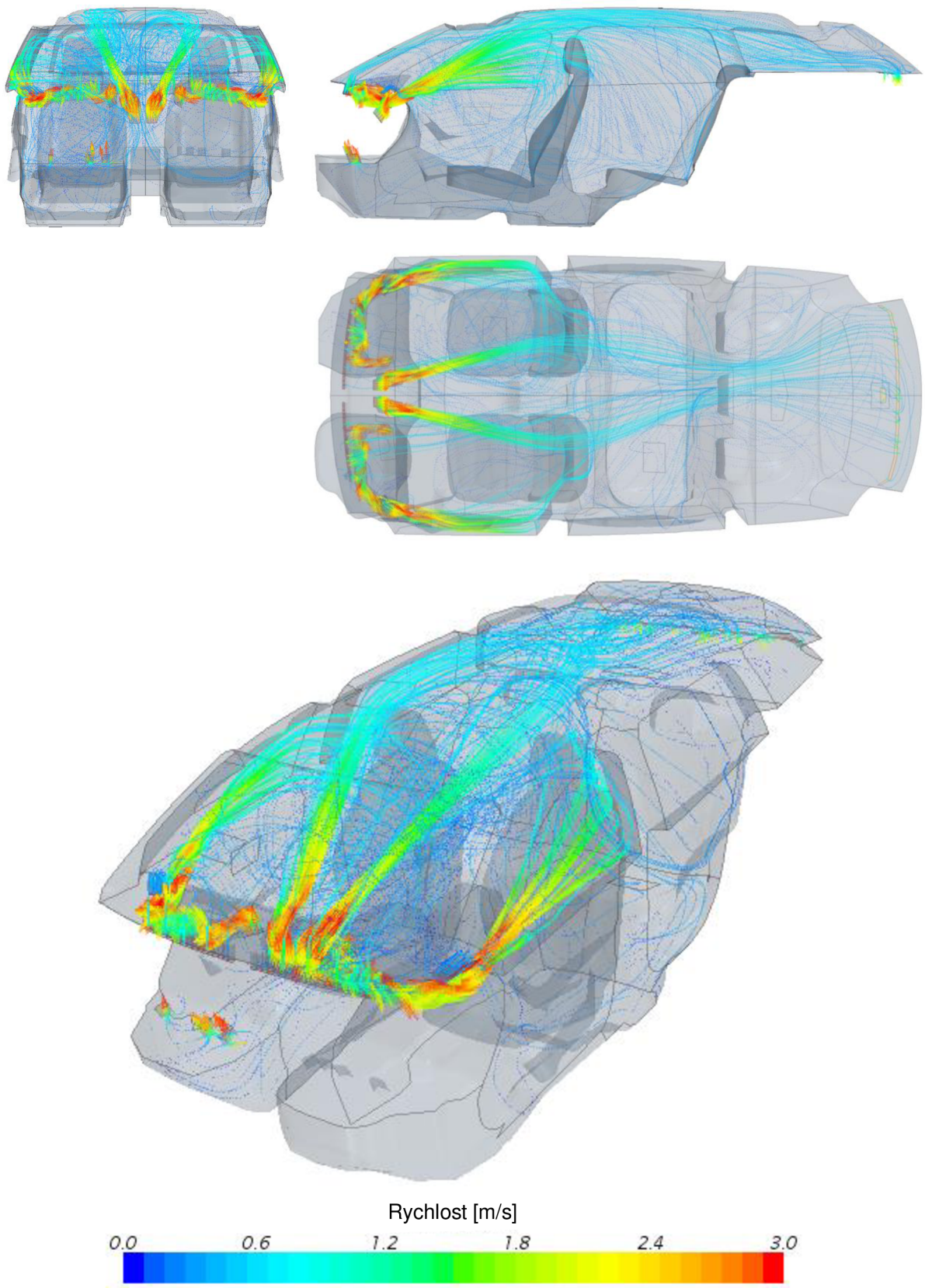
Následující obrázky P9, P10 a P11 zobrazují trajektorie (streamline) ze všech vyústek, které přivádí vzduch do automobilu až po část outlet, kde vzduch z vozu vystupuje.



Obrázek P9 Streamline – zimní případ HVAC on (−20 °C, 0 W/m²).

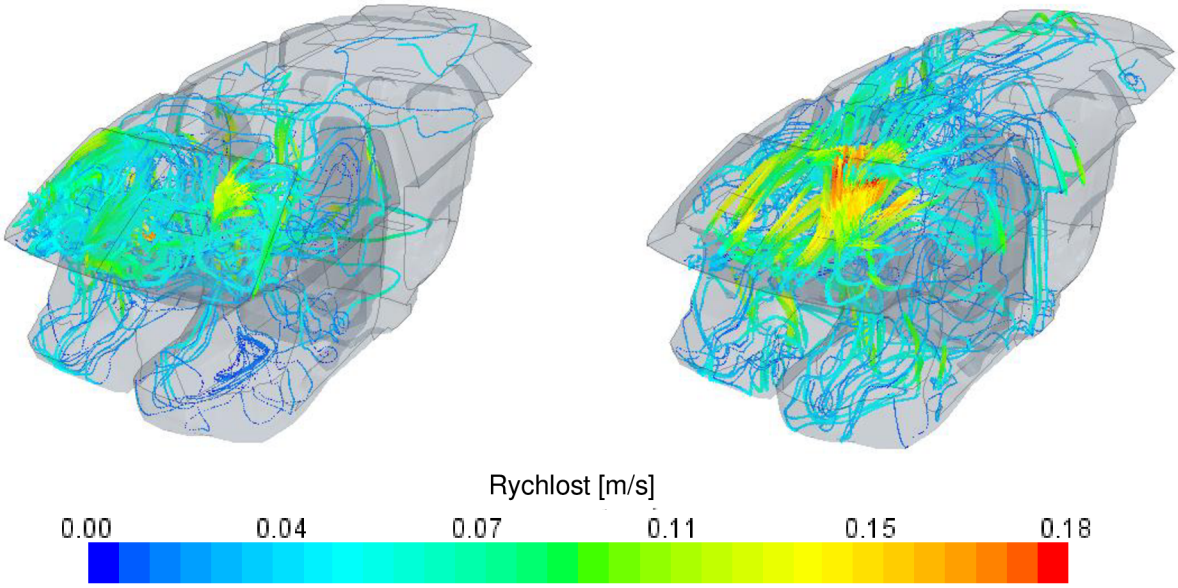


Obrázek P10 Streamline – jarní případ HVAC on (10 °C, 500 W/m^2).

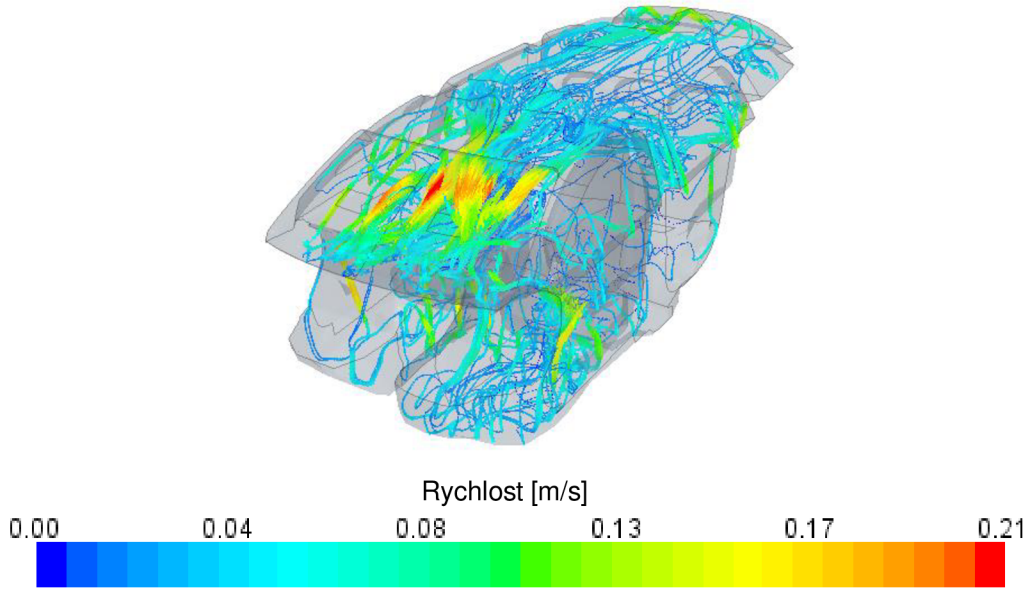


Obrázek P11 Streamline – letní případ HVAC on (30 °C, 800 W/m²).

Následující obrázky P12 a P13 zobrazují trajektorie (streamline) z palubní desky. Dopadající solární záření ohřívá vzduch v mezní vrstvě palubní desky a ten přirozenou konvekcí stoupá a tím se pohybuje samovolně po celé kabině vozu. V zimním případě je pohyb částic vzduchu spíše v přední části vozu, v letním případě je pohyb i v zadní části vozu.

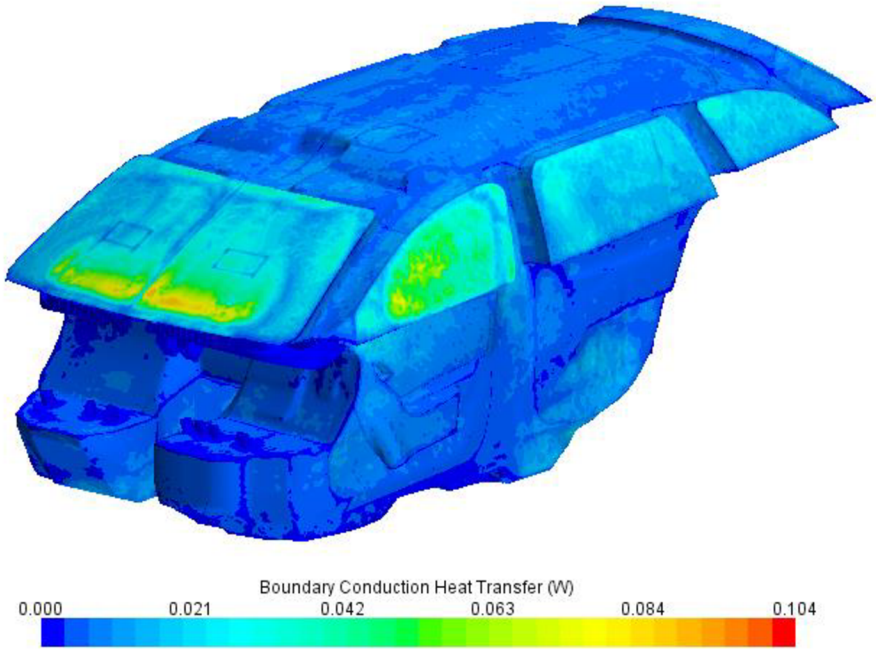


Obrázek P12 Streamline – vlevo zimní případ HVAC off (−20 °C, 300 W/m²) a vpravo jarní případ HVAC off (10 °C, 500 W/m²).

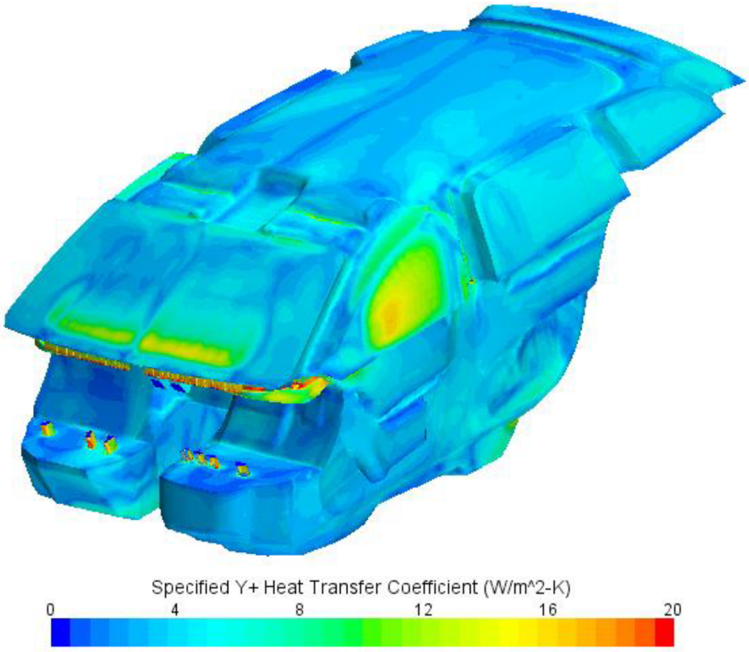


Obrázek P13 Streamline – letní případ HVAC off (30 °C, 800 W/m²).

V programu Star-CCM+ je možné pozorovat i mnohé další fyzikální veličiny. Následující obrázky P14 a P15 byly simulovány pro zimní případ v režimu HVAC on. Obrázek P14 zobrazuje Boundary Conduction Heat Transfer (tepelný tok kondukcí skrz konstrukci kabiny) v jednotkách [W]. Další obrázek P15 zobrazuje Specified Y+ Heat Transfer Coefficient (součinitel přestupu tepla na vnitřní straně) v jednotkách [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].



Obrázek P14 Boundary Conduction Heat Transfer [W].



Obrázek P15 Specified Y+ Heat Transfer Coefficient [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$].