

مدل سازی عددی نحوه توزیع هوا در سیستم تهویه مطبوع یک هواپیمای سر نشین دار

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۹

جاماسب پیرکندی^۱، محمد صادق عبدالله پور^۲، حمید پرهیزکار^۳، مصطفی محمودی^۱

۱- دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، jpirkandi@mut.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- استادیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

چکیده

در این پژوهش عملکرد سیستم توزیع هوا در کابین یک هواپیمای مسافربری ۴۲ نفره تک راهرو که مسافران در دو ردیف سه نفره نشسته اند، تحلیل شده است. برای بررسی توزیع هوا در کابین از روش دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. در این تحلیل عددی اثر تغییر رطوبت نسبی در داخل کابین، تغییر سرعت ورودی هوا به داخل کابین و تغییر نحوه توزیع هوای درون کابین بررسی شده است. برای تعیین آسایش حرارتی در کابین، دو پارامتر میانگین آرای پیش بینی شده و درصد نارضایتی پیش بینی شده بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که در اثر افزایش رطوبت نسبی از ۰ تا ۱۰ درصد، تغییرات فشار استاتیکی بر آسایش بدن مسافران تغییر عمده ای را ایجاد نمی کند. بررسی نتایج نشان می دهد که در سرعت ۱ متر بر ثانیه برای هوای ورودی به داخل کابین، به خاطر گردش بهتر هوا در ناحیه سر و بقیه اندامها مسافران احساس آسایش حرارتی بیشتری داشته و تغییرات فشار استاتیکی کمتری روی سر و بدن خود احساس می کنند. در نهایت با تغییر نحوه توزیع هوا از سیستم اختلاطی به سیستم جابه جایی، مشاهده شد که سیستم توزیع هوای اختلاطی از نظر آسایش حرارتی برای مسافران بهتر بوده اما از نظر فشار استاتیکی در ناحیه سر و بدن مسافران، سیستم توزیع هوای جابه جایی بهتر است.

واژه های کلیدی: تهویه مطبوع، توزیع هوا، کابین، هواپیمای مسافربری، آسایش حرارتی

Numerical modeling of air distribution in the air conditioning system of a passenger plane

Jamasb Pirkandi¹, Mohammad Sadegh Abdollahpoor², Hamid Parhizkar³, Mostafa Mahmoodi¹

1- Associate Professor, Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

2- MSc Student, Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

3- Assistant Professor, Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

Abstract

In this study, the performance of the air distribution system in the cabin of a single-aisle passenger plane with 42 passengers seated in two rows of three has been analyzed. Computational fluid dynamics method has been used to investigate the air distribution in the cabin. In this numerical analysis, the effect of changing the relative humidity inside the cabin, changing the speed of air entering the cabin and changing the way of air distribution inside the cabin has been investigated. In order to determine the thermal comfort in the cabin, two parameters including the average number of predicted votes and the percentage of predicted dissatisfaction have been investigated. The results show that with the increase of relative humidity from 0 to 10%, changes in static pressure do not cause major changes in passenger comfort. Also, at a speed of 1 m/s for air entering the cabin, due to better air circulation in the head and other organs, the passengers feel more thermal comfort and less static pressure changes on their head and body. Finally, by changing the air distribution system from the mixing system to the displacement system, it was observed that the mixing air distribution system is better in terms of thermal comfort for passengers. However, in terms of static pressure in the head and body area of passengers, the displacement air distribution system is better.

Keywords: air conditioning, air distribution, cabin, passenger aircraft, thermal comfort.

۲۳۹

سال ۱۴ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۲

نشریه علمی

دانش و فناوری هوافضا



۱. مقدمه

گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع در فضاهای پرجمعیت مسئله مهمی است که وجود آن برای تأمین آسایش حرارتی افراد در این فضاها ضروری است. هواپیماهای مسافربری از جمله فضاهای پرجمعیتی محسوب می‌شوند که با توجه به مدت‌زمان اشغال طولانی مسافران در آن، باید مجهز به سیستم تهویه مطبوع مناسبی باشند. برای تأمین شرایط آسایش مسافران در کابین هواپیما وجود سیستم تهویه مطبوع مناسب در آن ضروری است. از طرف دیگر موضوع چیدمان و اجرای مناسب توزیع‌کننده‌ها در سیستم‌های تهویه مطبوع بسیار مهم است. در برخی از موارد مشاهده شده است که هواپیما سیستم تهویه مطبوع دارد اما شرایط آسایش مسافران در آن تأمین نشده است. یکی از دلایل عمده این مسئله عدم توزیع مناسب هوا در کابین مسافران است [۱].

برای تأمین شرایط آسایش در یک فضا باید دما، رطوبت، سرعت، صدا و کیفیت هوا در محدوده مناسب باشد. در انتخاب سیستم تهویه مطبوع هواپیما باید سعی کرد سیستم توزیع‌کننده تمام شرایط فوق را تأمین نموده و مسافران از مبدأ تا مقصد در آسایش کامل باشند [۲]. در میان انواع مدل‌های آسایش، مدل^۱ PMV مدل مناسبی است. این مدل با استفاده از اصول تعادل گرمایی و داده‌های تجربی گرفته‌شده از یک اتاق در شرایط آب‌وهوای ثابت، ایجاد شده است [۳]. در این مدل طبق یک پرسشنامه، افراد در یک اتاق مشخص احساس آسایش خود را با ذکر نمره در محدوده سرد (۳-) تا داغ (۳+) ارزیابی می‌کنند. صفر مقدار ایده‌آل بوده که نشان‌دهنده خنثی بودن شرایط آسایش است.

همچنین معادله‌ای دیگر برای ارتباط PMV با درصد پیش‌بینی ناراضی PPD^۲ ارائه شده است [۴]. در تحقیق حاضر برای کنترل میزان آسایش افراد از این مدل PMV استفاده شده است.

با توجه به اهمیت موضوع تهویه مطبوع و توزیع هوا در هواپیما، در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. در سال ۲۰۰۵ بوزباخ و همکاران [۵] در تحقیقی به صورت تجربی و عددی جریان هوا در کابین یک هواپیما را بررسی کردند. آن‌ها در تحقیق خود کابین را هم‌دما فرض نموده و نشان دادند در صورتی که جدایش جریان در نزدیکی صورت مسافران رخ بدهد، آن‌ها شرایط آسایش خوبی را احساس نخواهند کرد. در سال ۲۰۰۶ وانگ و همکاران [۶] در تحقیق خود، اثربخشی تهویه مطبوع در کابین‌های هواپیما، به‌عنوان عاملی مهم برای حداقل کردن آلودگی ناشی از تنفس مسافران را بررسی کردند. آن‌ها مطالعه خود را دربارهٔ قسمتی از کابین بویینگ ۷۶۷ که شامل ۳۵ مانکن بود، انجام دادند. همچنین در هر مانکن یک گرم‌کننده (برای شبیه‌سازی دمای بدن) و یک خروجی دی اکسید کربن (برای شبیه‌سازی تنفس) لحاظ نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که شرایط آسایش فقط تحت تأثیر بالا بودن سرعت هوا نبوده و به نحوه توزیع جریان هوا و مناطق سیرکولاسیون هوا نیز وابسته است. ژانگ و یان چن [۷] در سال ۲۰۰۶ در تحقیقی سیستم توزیع هوای یک هواپیماهای تیب اقتصادی را بررسی کردند. هدف آن‌ها بررسی سیستم توزیع هوا در ایجاد محیطی سالم برای خدمه و مسافران بود. آن‌ها در این تحقیق از نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی استفاده نموده و نتایج را با داده‌های تجربی اعتبارسنجی نمودند. آن‌ها برای مدل



توربولانسی خود از مدل $k-\epsilon$ استفاده کرده بودند. ژانگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۸ در تحقیق خود به صورت تجربی و عددی جریان هوا و آلودگی‌های حمل‌ونقل هوایی در درون کابین هواپیما را بررسی کردند. این پژوهش هم به صورت تجربی و هم به صورت عددی برای نصف یک کابین هواپیما با دو راهرو انجام شده بود. نتایج آن‌ها نشان داد که توزیع دمای هوا، غلظت گازهای آلوده و غلظت ذرات در شبیه‌سازی‌های عددی تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که سیستم تهویه مطبوع و توزیع هوا در کابین از نظر آسایش برای مسافران و خدمه هواپیما در شرایط خوبی قرار دارد. ژانگ و همکاران [۹] در تحقیقی توزیع هوا از پایین در راهروی کابین هواپیما را جهت تسهیل سیستم رطوبت‌زنی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که در سیستم تهویه مطبوع جدید (تزریق هوا از کف راهرو) رطوبت نسبی حدود ۳۰ درصد بوده در حالی که در سیستم قدیمی (سیستم مخلوط هوا) رطوبت نسبی حدود ۱۰ درصد می‌باشد. همچنین در سیستمی که هوا از کف کابین تزریق می‌شود، مسافران از نظر آسایش رضایت بیشتری دارند. دلیل عمده این مسئله کمتر بودن میزان هوای گرم در نزدیکی صورت مسافران بود. در سال ۲۰۰۹ رویتا [۱۰] در پژوهشی کاربرد هوای فشرده در سیستم تهویه مطبوع هواپیماهای جت را بررسی کرد. وی در این تحقیق بیان کرد که در سیستم تهویه مطبوع هواپیماها تأکید بر کاهش وزن، قابل‌اعتماد بودن و تأثیر منفی نداشتن بر محیط‌زیست می‌باشد. در سال ۲۰۱۰ چن و همکاران [۱۱] در تحقیق خود روش‌های مختلف ضدعفونی برای استریل کردن یک کابین خالی را

مقایسه کردند. آن‌ها سه روش برای ضدعفونی کردن هوای داخل کابین استفاده کردند. در روش اول از هیدروژن پراکسید و هوای درون کابین برای تهویه مطبوع هواپیما استفاده کردند. در روش دوم هیدروژن پراکسید مخلوط را از درب جلوی کابین وارد کرده و سپس از درب پشتی کابین خارج کردند. در نهایت در روش سوم هیدروژن پراکسید را وارد کابین کرده و با استفاده از فن هوای داخل کابین را بالا بردند. بررسی آن‌ها نشان داد که روش دوم از دو روش دیگر بهتر است. در سال ۲۰۱۱ ژانگ و همکاران [۱۲] در پژوهشی سیستم تهویه مطبوع یک هواپیما را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که سیستم تزریق هوا از کف، به صورت قابل‌توجهی از آلودگی پخش‌شده هنگام تنفس مسافران جلوگیری می‌کند و جزء بهترین روش‌های تهویه است. در سال ۲۰۱۲ لیو و همکاران [۱۳] در تحقیقی تأمین هوای سیستم تهویه مطبوع کابین هواپیمای MD-82 را بررسی کردند. آن‌ها در مقاله خود نتیجه گرفتند که شرایط مرزی جریان، جهت و مقدار سرعت و شدت توربولانس به طرز قابل‌توجهی در شرایط آسایش کابین تأثیرگذار است. بررسی آن‌ها نشان داد میدان جریانی که سرعت کم و شدت توربولانس زیادی داشته باشد، شرایط خوبی را از نظر تهویه مطبوع برای مسافران فراهم می‌کند. در سال ۲۰۱۲ زو و همکاران [۱۴] در مقاله خود عواملی مانند شرایط تهویه، نرخ تهویه مکانیکی هوا و کیفیت فیلتراسیون کابین را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که با روشن شدن فن سیرکولاسیون، جابه‌جایی هوا رخ داده و جابه‌جایی ذرات ریز ۲۰ درصد افزایش می‌یابد. از سوی دیگر فیلتر کابین ۳۰ درصد در کاهش غلظت ذرات تأثیرگذار می‌باشد. در سال





۲۰۱۳ وینزین و همکاران [۱۵] در پژوهشی، مدلی ترکیبی برای تحقیق و بررسی نقل و انتقال ذرات گذرا در محیط‌های بسته را بررسی کردند. هدف اصلی آن‌ها طراحی شرایط داخلی کابین هواپیما و آسایش گرمایی برای مسافران بود. نتایج آن‌ها نشان داد که مسافران هوای گرم‌تر را نسبت به هوای سردتر ترجیح می‌دهند و افراد به حرکت هوای بیشتر درون جریان گرایش بیشتری دارند. در سال ۲۰۱۳ افقاری و همکاران [۱۶] در پژوهش خود به صورت تئوری و تجربی سیستم توزیع هوای هواپیما را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هر چقدر افت‌های موضعی کمتر باشد، جریان نسبتاً یکنواخت‌تری به مسافران می‌رسد. همچنین نتایج محاسبات آن‌ها با نتایج تجربی تطبیق خوبی داشت. در سال ۲۰۱۴ کائو و همکاران [۱۷] در تحقیقی، سرعت شکل ذرات در سیستم توزیع هوای کابین هواپیما با قدرت تفکیک مکانی زیاد را اندازه‌گیری کردند و نشان دادند که اولین گام برای ارزیابی عملکرد سیستم توزیع هوا در کابین هواپیما تشخیص این موضوع می‌باشد. در سال ۲۰۱۴ ژانگ و همکاران [۱۸] در پژوهشی سیستم کنترل محیطی کابین هواپیما بر اساس طراحی معکوس را شبیه‌سازی کردند و هنگام طراحی بیان کردند که سیستم محیطی کابین باید پنج شرط شامل سرعت ورودی هوا، زاویه ورودی هوا، دما، مکان نشست افراد و محل خروج هوا را داشته باشد. آن‌ها در پژوهش خود برای طراحی معکوس سیستم کنترل محیطی هواپیما از شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک بهره بردند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که استفاده از روش بهینه‌سازی آن‌ها، می‌تواند در حدود ۳۰/۴ درصد در مصرف انرژی هواپیما صرفه‌جویی ایجاد کند. در سال ۲۰۱۶ کائو و

همکاران [۱۹] در تحقیقی نشان دادند که برای ایجاد آسایش در محیط کابین و کارآمدی آن از نظر انرژی، مطالعه رفتار دیفیوزر جت ضروری است. آن‌ها در تحقیق خود نشان دادند که وقتی عدد رینولدز پایین‌تر از ۳۵۹۰ می‌باشد، چرخش جریان بسیار زیاد شده و نزدیک دیواره کابین جریان به طور کامل چرخشی می‌شود که برای آسایش افراد و مسافران خوب نیست. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که هر چقدر عدد رینولدز بالا می‌رود، چرخش جریان کمتر می‌شود. در سال ۲۰۱۶ یو و همکاران [۲۰] در مقاله خود تأثیر دیفیوزرها بر کیفیت هوای داخل کابین هواپیمای مسافربری تجاری را بررسی کردند. آن‌ها در تحقیق خود از مدل آشفته هیبریدی استفاده کرده بودند. آن‌ها در این تحقیق نشان دادند که مدل هیبریدی توصیف بهتری از جریان هوا در داخل کابین را دارد و هر چقدر دیفیوزرها باز باشند، سیرکولاسیون هوا بهتر انجام می‌شود. در سال ۲۰۱۶ لی و همکاران [۲۱] در پژوهشی میزان انتقال آلودگی موجود در هوا در کابین هواپیما را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها بررسی کردند که آلودگی هوا مانند عوامل بیماری‌زا، بو و دی‌اکسیدکربن آزاد شده از یک مسافر چقدر می‌تواند با جریان هوا در داخل کابین گسترش یابد و برای مسافران دیگر آزاردهنده و ناراحت‌کننده باشد. نتایج آن‌ها نشان داد که هرچقدر آلودگی به مکان چرخشی جریان نزدیک‌تر باشد، بیشتر پخش شده و در بدترین حالت آن ۶۲ درصد از آلودگی در کل کابین پخش می‌شود. هانگ شنگ [۲۲] در سال ۲۰۲۰ به بهینه‌سازی یک سیستم خنک‌کننده هوا درون هواپیماهای جنگی و مسافربری پرداخت. وی بر اساس ویژگی‌های سیستم تبرید، الگوریتمی برای

خنک کردن هوا طراحی کرده و مصرف سوخت هواپیما را به عنوان تابع هدف، بهینه‌سازی کرد. هان یانگ [۲۳] در سال ۲۰۲۱، سیستم کنترل محیطی به عنوان یکی از سیستم‌های مهم تهویه مطبوع در هواپیما را بررسی کرد. سیستم کنترل محیطی (ECS۳) برای تنظیم فشار، دما و رطوبت داخل کابین هواپیما استفاده می‌شود. این مطالعه تأثیرات معماری‌های مختلف کابین هواپیما را بر عملکرد حرارتی این سیستم (ECS) بررسی کرد. نتایج تحقیقات وی نشان می‌دهد که نحوه چرخش جریان هوا در کابین هواپیما نسبت به تغییر حالت‌های مبدل حرارتی سیستم (ECS) بر تهویه مطبوع بسیار مؤثرتر است. ژونگدی دوان [۲۴] در سال ۲۰۲۱ در تحقیقی به شبیه‌سازی عددی تهویه مطبوع درون هواپیما با استفاده از سیستم کنترل دمای داخل آن پرداخت.

با توجه به مطالعات انجام شده درباره تاریخچه کار هدف عمده از این مقاله مدل‌سازی عددی و سه‌بعدی نحوه توزیع هوا در سیستم تهویه مطبوع یک هواپیمای سرنشین‌دار می‌باشد. هندسه این مسئله به صورت کامل لحاظ شده و کابین، صندلی‌ها و سرنشینان داخل هواپیما مدل‌سازی شده و سپس با مشخص کردن ورود و خروج هوای تهویه شده شرایط آسایش داخل کابین بررسی شد.

۲. روابط حاکم و روش حل مسئله

در این پژوهش برای تحلیل رفتار جریان، معادلات بقای جرم، مومنتم و معادلات بقای انرژی حل می‌شوند. معادلات متوسط زمانی نایر-استوکس حاکم بر میدان جریان، به ترتیب معادله پیوستگی و معادلات نایراستوکس متوسط گیری شده و معادلات مربوط به آشفنگی موجود

در میدان جریان می‌باشند. در یک جریان تراکم‌ناپذیر، معادله پیوستگی، مومنتم و انرژی به صورت معادله‌های ۱ تا ۳ ارائه شده‌اند [۲۵]:

$$(\vec{v} \cdot \vec{v}) = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_m}{\partial x_m} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (۲)$$

$$\frac{\partial(Pe)}{\partial t} + \frac{\partial[u_i(Pe + P)]}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(k + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (۳)$$

در نرم‌افزار فلوئنت حل بر اساس فشار بوده و سرعت جریان به صورت مطلق وارد می‌شود. تحلیل در این پژوهش، تحلیلی گذراست. در بخش تنظیمات مدل فلوئنت، معادله انرژی فعال و برای مدل توربولانسی از مدل RNG k-ε استفاده شده است. از سه شرط مرزی سرعت ورودی، دیوار و تقارن در این مسئله استفاده می‌شود. دمای ورودی هوا ۲۹۲/۱۵ کلوین و دمای آدامک‌ها با شرط دیواره، به صورت ۳۰۵ کلوین اعمال شده است. گام زمانی برای حل ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. برای حل عددی از هوا به عنوان سیال استفاده شده است. برای حل عددی از روش مرتبه اول ضمنی، کوپلینگ فشار و سرعت و برای کوپلینگ فشار و سرعت از روش نیمه ضمنی برای معادلات فشار مرتبط استفاده شد.





PMV معیاری برای پیش‌بینی میانگین آرای
حرارتی افراد بر اساس مقیاس هفت نقطه‌ای در
مورد احساس حرارتی است. شاخص PMV بر
مبنای تعادل حرارتی بدن انسان استوار است.
تعادل حرارتی زمانی برقرار می‌شود که تولید
حرارت در داخل بدن با حرارت تلف‌شده از آن
برابر شود [۲۶]. شاخص PMV از رابطه (۴)
محاسبه می‌شود.

$$PMV = (0.303 e^{-0.036M} + 0.028) \cdot \{(M - W) - 3.05 \times 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - P_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad (۴)$$

$$t_{cl} = 3.57 - 0.028(M - W) - 0.155 I_{cl} \{3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} \quad (۵)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} & 2.382.38 |t_{cl} - t_a| \\ 12.1 \sqrt{v_{ar}} & 2.382.38 |t_{cl} - t_a| \end{cases} \quad (۶)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1 + 1.29 I_{cl} & I_{cl} \leq 0.78 m^2 \cdot K \\ 1.05 + 0.645 I_{cl} & I_{cl} > 0.78 m^2 \cdot K \end{cases} \quad (۷)$$

در این رابطه، M نرخ متابولیک برحسب وات بر مترمربع، W توان مکانیکی مؤثر برحسب وات بر مترمربع، I_{cl} عایق لباس برحسب مترمربع کلون بر وات، f_{cl} فاکتور مساحت سطح لباس، t_a دمای هوا برحسب درجه سانتی‌گراد، \bar{t}_r میانگین دمای تابشی برحسب درجه سانتی‌گراد، v_{ar} سرعت نسبی هوا برحسب متر بر ثانیه، P_a فشار جزئی بخار هوا برحسب پاسکال، h_c ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برحسب وات بر مترمربع کلون

و t_{cl} دمای سطح لباس برحسب درجه سانتی‌گراد است. برای بررسی آسایش حرارتی، شرایط با توجه به کابین به شرح زیر است:

با قرار دادن $PMV=0$ معادله به دست آمده بیانگر پیش‌بینی کننده مجموعه‌ای از شرایط محیطی است که در نهایت به ایجاد شرایط حرارتی خنثی در فرد منجر خواهد شد [۲۶].

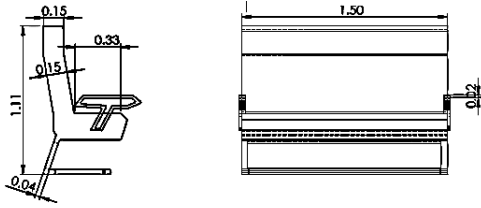
پیش‌بینی تعداد افرادی از گروه که احساس گرما و سرما دارند را نمی‌توان با PMV تخمین زد. PPD شاخصی است برای پیش‌بینی کمی درصدی از افراد که به دلیل احساس سرما یا گرما ناراضی هستند. بر اساس استانداردهای بین‌المللی، ناراضی‌های حرارتی شامل احساس خیلی گرمی، گرمی، سردی و خیلی سردی است. در صورتی که مقدار PMV معلوم باشد شاخص PPD از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۶]:

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0.03353 PMV^4 - 0.2179 PMV^2) \quad (۸)$$

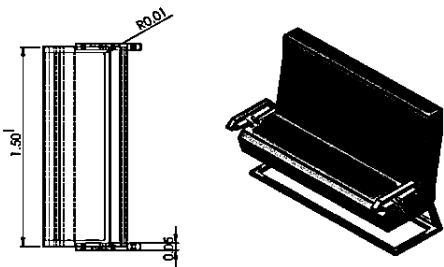
PPD می‌تواند تعداد افرادی را که از نظر حرارتی ناراضی هستند، تخمین بزند. مابقی افراد احساس نسبتاً مطلوبی دارند [۲۶].

۳. هندسه مورد مطالعه و تولید شبکه

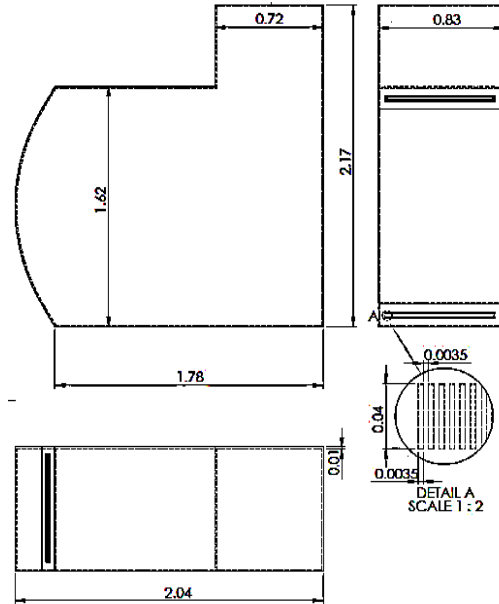
هندسه بررسی شده در این تحقیق، بخشی از کابین یک هواپیمای ۴۲ نفره است که یک ردیف ۶ نفره آن شبیه‌سازی شده است. این ردیف ۶ نفره دو قسمت هست و در هر قسمت سه صندلی وجود دارد. صفحه وسط بین دو قسمت به صورت متقارن محوری شبیه‌سازی شده است. مشخصات و جزئیات کابین، آدمک‌ها و صندلی‌ها در شکل‌های ۱ تا ۳ آورده شده است. برای طراحی و ترسیم و حجم دهی آدمک‌ها از استانداردها و اندازه‌های متوسط انسان‌ها استفاده شده است



(شکل ۲). طول و عرض دریچه ورودی و خروجی هوا به داخل کابین به ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۰۴ متر لحاظ شده است.

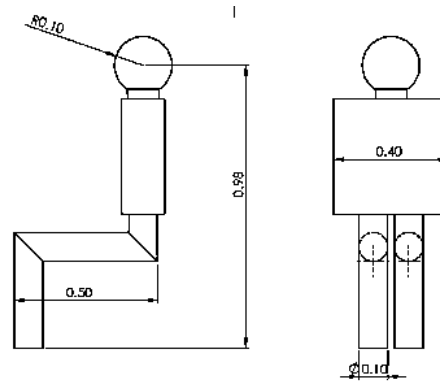


شکل ۳. جزئیات طراحی صندلی‌های کابین

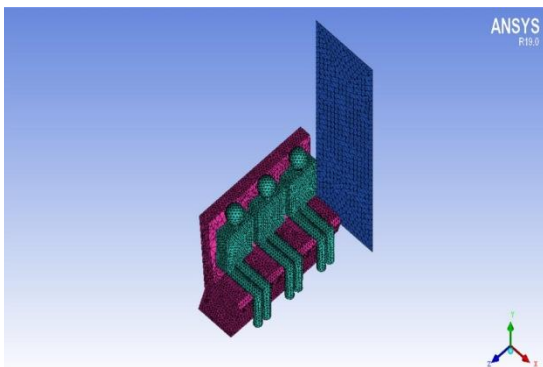


شکل ۱. جزئیات طراحی کابین مورد بررسی

برای انجام مدل‌سازی عددی، ابتدا باید دامنه حل به تعدادی از حجم‌های محدود گسسته‌سازی شود. برای تحقق این امر باید شبکه‌بندی مناسبی بر هندسه مسئله انجام گیرد. استقلال نتایج از شبکه با استفاده از روش شاخص همگرایی شبکه‌بندی ۴ انجام شده است. در میدان حل سه نوع شبکه‌بندی مختلف با ابعاد درشت، متوسط و ریز ایجاد شد. سپس تعداد شبکه‌های ۳۸۰۶۹۹ (شبکه‌بندی درشت)، ۸۳۷۰۵۷ (شبکه‌بندی متوسط) و ۱۷۹۵۶۹۱ (شبکه‌بندی ریز) برای اعتبارسنجی اولیه انتخاب شد.



شکل ۲. سایز و طراحی آدمک‌ها



شکل ۴. نمایی از شبکه‌بندی آدمک‌ها

۲۴۵

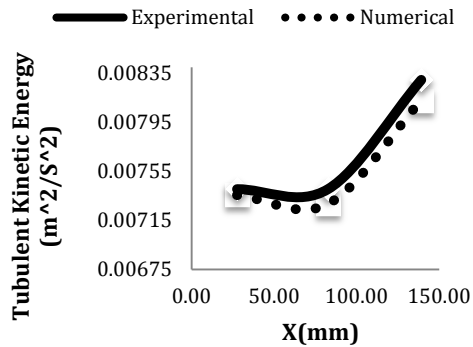
سال ۱۴ - شماره ۱

پهار و تابستان ۱۴۰۲

نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا



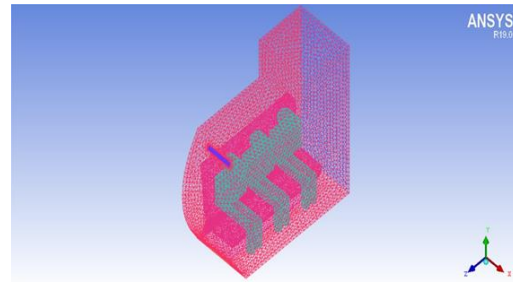


شکل ۷. اعتبارسنجی نتایج حل عددی با نتایج حاصل از حل تجربی

۵. نتایج

در مباحث تهویه مطبوع هنگامی که شرایط عادی است باید رطوبت در حدود ۴۰٪ تا ۶۰٪ باشد؛ اما رطوبت در کابین هواپیما می‌تواند حداکثر ۱۰٪ باشد که مهندسان هنگام طراحی معمولاً رطوبت کابین را زیر ۱۰٪ در نظر می‌گیرند. حتی در پروازهای بیشتر از ۳۰ دقیقه رطوبت کابین ۰٪ در نظر گرفته می‌شود چرا که اگر رطوبت زیاد باشد سیستم‌های الکتریکی و الکترونیکی هواپیما و کابین از کار می‌افتند.

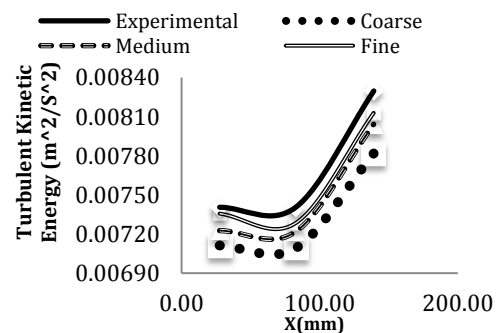
در شکل‌های ۸ و ۹ توزیع دمای استاتیک روی آدمک‌ها و سرعت هوای ورودی به کابین هواپیما در شرایط مرزی اولیه و شبکه‌بندی متوسط نشان داده شده است. بیشترین دما بین پاهای آدمک و بدن افراد دیده می‌شود. از نتایج سرعت ورودی هوا نیز مشخص است که هوای درون کابین برای راهروی کابین، قسمت سر آدمک‌ها و پایین پای آن‌ها با سرعت بیشتری در جریان است.



شکل ۵. نمایشی از شبکه‌بندی کابین

۴. اعتبارسنجی و استقلال از شبکه

برای اعتماد به نتایج حل عددی، بایستی نتایج حل عددی مستقل از تعداد و اندازه شبکه باشد. بنابراین شکل ۶ استقلال نتایج از شبکه را برای انرژی آشفتگی توربولانس بررسی کرده است. برای اطمینان از نتایج درست و صحیح حل عددی، بایستی یک اعتبارسنجی برای حل عددی انجام شده صورت بگیرد. شکل ۷ نتایج حل عددی را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مقاله مرجع نشان می‌دهد. نتایج حل عددی حاضر در شکل ۷ نشان می‌دهد که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی مقاله دارد. پس می‌توان به نتایج حل عددی انجام شده اعتماد کرد [۵، ۶، ۸].



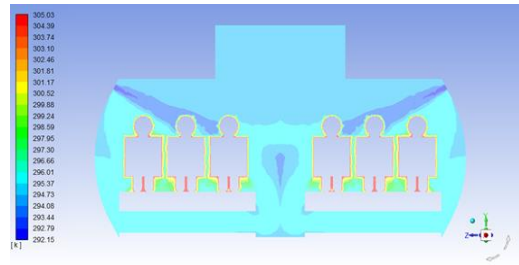
شکل ۶. مقایسه شدت آشفتگی در سه شبکه‌بندی و مقایسه با نتایج تجربی



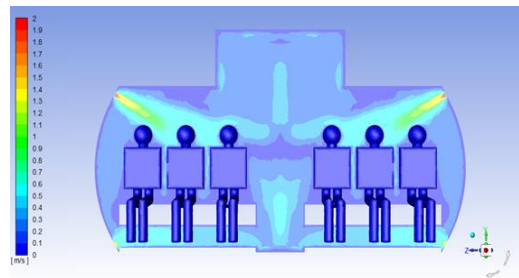
۵-۱- بررسی اثر رطوبت نسبی بر آسایش حرارتی افراد

همان‌طور که گفته شد، ماکزیمم رطوبت نسبی در کابین می‌تواند ۱۰ درصد باشد. با استفاده از حل عددی، رطوبت نسبی در کابین و چگونگی تأثیر آن بر آسایش حرارتی بررسی می‌شود. در این تحقیق سه رطوبت نسبی ۱۰، ۵ و صفر درصدی در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ کانتورهای PMV و PPD در بازه‌های مختلفی از رطوبت‌های نسبی صفر، ۵ و ۱۰ درصد برای کابین هواپیما نشان داده شده است.

با تغییر در رطوبت نسبی کابین هواپیما و با توجه به زاویه‌ای که هوا به درون آن پرتاب می‌شود، پای آدمک‌ها در رطوبت نسبی صفر تا ۱۰ درصد، کمی احساس گرما دارد. همچنین در هر سه شرایط رطوبت نسبی، آدمکی که در وسط قرار دارد در ناحیه سر کمی احساس سرما می‌کند و در ناحیه بدن نیز در نزدیکی گردن احساس رضایت و بقیه نواحی بدن، احساس گرما می‌کند، آدمک‌هایی که در کنار راهرو کابین هواپیما هستند در ناحیه سر و بدن، احساس رضایت و کمی احساس سرما دارند، اما آدمک‌هایی که چسبیده به بدنه کابین هستند، احساس گرمای شدیدی می‌کنند و احساس نارضایتی دارند. جمع‌بندی نهایی نشان می‌دهد که تغییرات رطوبت نسبی در این حدود (بین صفر تا ده درصد) که بسیار کم است، تأثیر به‌سزایی در احساس رضایت افراد ندارد؛ اما هرچقدر رطوبت نسبی بیشتر باشد، احساس رضایت افراد، از هوای داخل کابین بیشتر است.

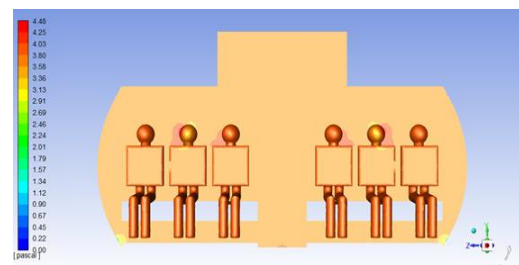


شکل ۸. کانتور دمای استاتیک روی آدمک‌های درون کابین هواپیما



شکل ۹. کانتور سرعت هوای ورودی به کابین هواپیما

هنگام پرواز و در حال ارتفاع گرفتن هواپیما، فشار کابین هواپیما کم می‌شود که برای قابل تحمل کردن فشار در کابین بایستی هوا را به داخل کابین وارد نمود. به علت اختلاف فشار بین داخل و خارج کابین هواپیما و عدم تحمل بدنه کابین فشار نباید بیش از ۸۱۰۶۰ پاسکال شود. شکل ۱۰ فشار استاتیک درون کابین در شرایط مرزی اولیه و شبکه‌بندی متوسط را نشان می‌دهد.

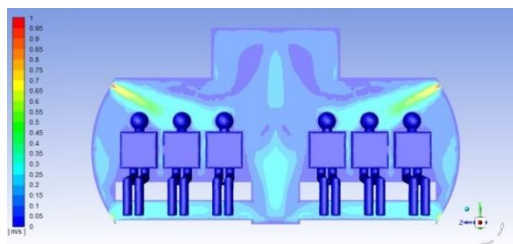


شکل ۱۰. کانتور فشار استاتیکی روی آدمک‌ها درون کابین هواپیما

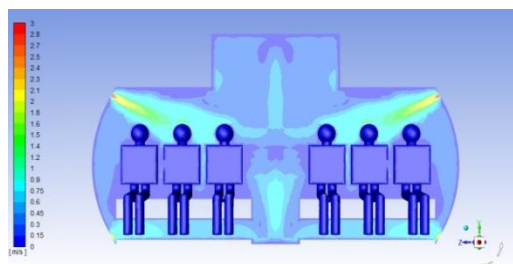
۵-۲- بررسی اثر سرعت ورودی هوا بر آسایش حرارتی افراد

یکی از عوامل تأثیرگذار بر آسایش حرارتی در داخل کابین، سرعت ورودی هوا به کابین است. در واقع به این پارامتر، پرتاب هوا نیز گفته می‌شود. در این بخش، تأثیر سرعت هوای ورودی بر آسایش حرارتی بررسی می‌شود. برای بررسی تأثیر سرعت هوای ورودی بر آسایش حرارتی، سرعت ورودی هوا ۳ و ۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است (رطوبت نسبی در این شرایط ۵ درصد در نظر گرفته شده است).

در شکل ۱۳ کانتور جریان هوای ورودی به درون کابین هواپیما در دو سرعت مختلف هوای ورودی (۱ و ۳ متر بر ثانیه) نشان داده شده است. در سرعت هوای ۳ متر بر ثانیه، فضای بالایی راهرو کابین هواپیما نیز تحت تأثیر جریان هوا قرار گرفته است اما در سرعت ۱ متر بر ثانیه، فضای بالایی راهرو کابین هواپیما کمتر تحت تأثیر قرار گرفته و بیشتر در فضای بین کناره‌های کابین و آدامک در جریان هوا اثر گذاشته است.

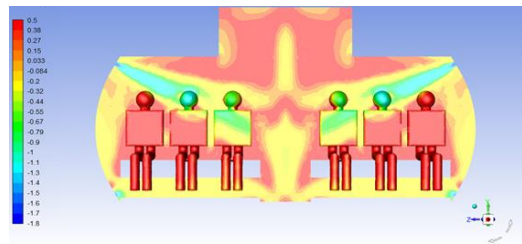


(سرعت ۱ متر بر ثانیه)

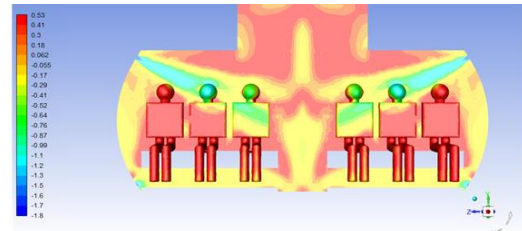


(سرعت ۳ متر بر ثانیه)

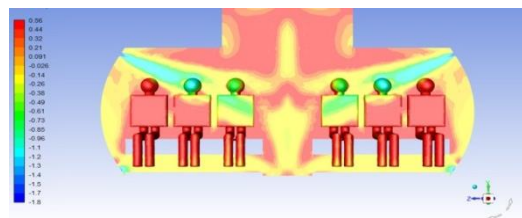
شکل ۱۳. کانتور سرعت در سرعت‌های مختلف ورودی هوا



(رطوبت صفر درصد)

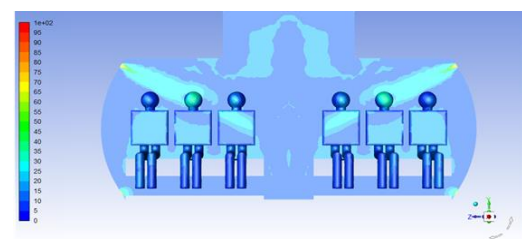


(رطوبت ۵ درصد)

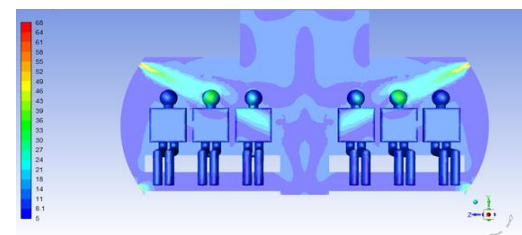


(رطوبت ۱۰ درصد)

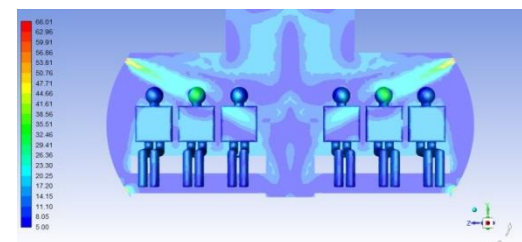
شکل ۱۱. کانتور PMV در رطوبت‌های نسبی مختلف



(رطوبت صفر درصد)

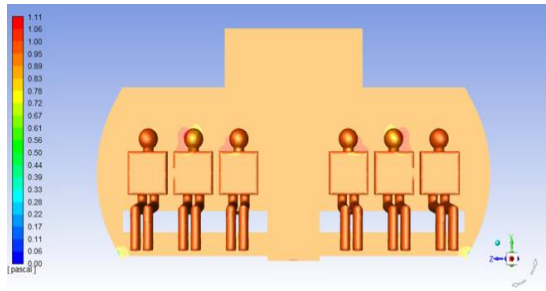


(رطوبت ۵ درصد)

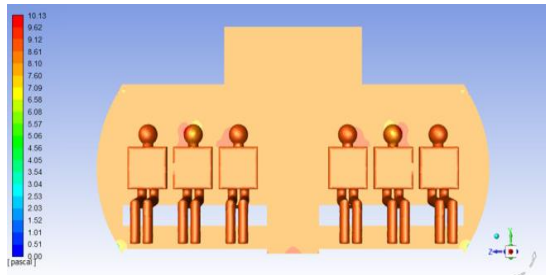


(رطوبت ۱۰ درصد)

شکل ۱۲. کانتور PPD در شرایط رطوبت‌های نسبی مختلف



(سرعت ۱ متر بر ثانیه)



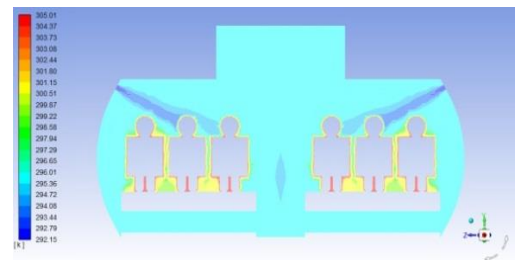
(سرعت ۳ متر بر ثانیه)

شکل ۱۵. کانتور فشار کابین در سرعت‌های مختلف ورودی هوا

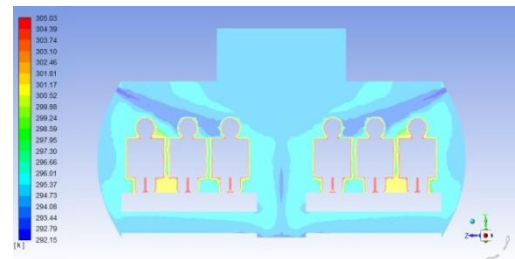
در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ کانتور آسایش درون کابین و درصد ناراضیاتی پیش‌بینی‌شده در دو سرعت مختلف هوای ورودی (۱ و ۳ متر بر ثانیه) نشان داده شده است. با توجه به درصد ناراضیاتی پیش‌بینی‌شده که از نتایج نرم‌افزار به دست می‌آید، می‌توان گفت با توجه به تفاوت سرعت هوای ورودی (پرتاب هوا) از دریچه‌ها، مسافران با جریان هوایی که سرعت ورودی آن برابر ۱ متر بر ثانیه است، احساس رضایت بیشتری دارند.

از نتایج این موضوع استنباط می‌شود که در سرعت ورودی هوای ۳ متر بر ثانیه، به دلیل شدت جریان هوای بیشتر، شدت توربولانس و گردابه‌های به وجود آمده ناشی از جریان هوا، مسافران احساس ناراضیاتی بیشتری دارند، اگرچه در قسمت‌هایی از بدنشان، احساس سرمای بیشتری می‌کنند، اما این سرما، باعث احساس رضایت آن‌ها نمی‌شود. با توجه به درصد ناراضیاتی پیش‌بینی‌شده که از نتایج نرم‌افزار به دست می‌آید، استنباط می‌شود که مسافران با سرعت،

در شکل ۱۴ کانتور دمای کابین هواپیما در دو سرعت مختلف هوای ورودی (۱ و ۳ متر بر ثانیه) نشان داده شده است. علاوه بر آدمکی که در وسط قرار دارد، کنار راهرو نیز در قسمت سر احساس سرما می‌کند؛ اما در سرعت ۱ متر بر ثانیه فقط آدمک وسط در قسمت سر کمی احساس سرما می‌کند.



(سرعت ۱ متر بر ثانیه)

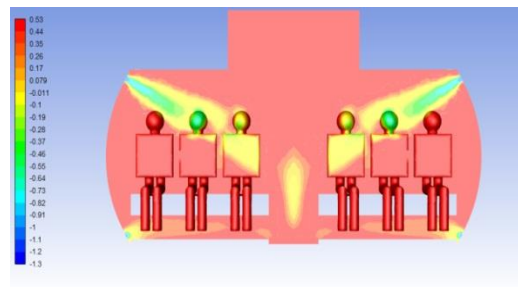


(سرعت ۳ متر بر ثانیه)

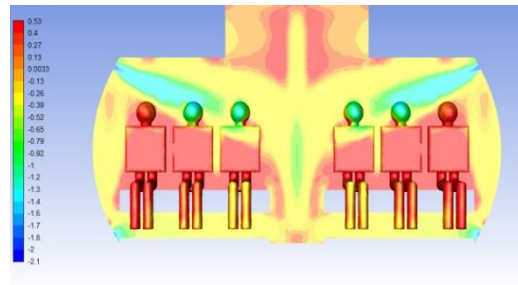
شکل ۱۴. کانتور دمای کابین در سرعت‌های مختلف ورودی هوا

در شکل ۱۵ کانتور فشار کابین هواپیما در دو سرعت مختلف هوای ورودی (۱ و ۳ متر بر ثانیه) نشان داده شده است. با توجه به اینکه، سرعت‌های ورودی هوا (پرتاب هوا) از دریچه‌ها تغییر می‌کند، این مسئله به‌طور حتم فشار بر مسافران را نیز تغییر خواهد داد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در شرایط مرزی که سرعت هوای ورودی به داخل کابین ۳ متر بر ثانیه می‌باشد، فشار بر مسافران بیشتر از ورودی‌های سرعت بوده و در ناحیه سر فشار بیشتری احساس می‌شود. این موضوع ممکن است باعث سردرد یا ناراحتی برای افراد و مسافران شود.

ورودی هوای ۱ متر بر ثانیه، احساس رضایت بیشتری دارند.



(سرعت ۱ متر بر ثانیه)

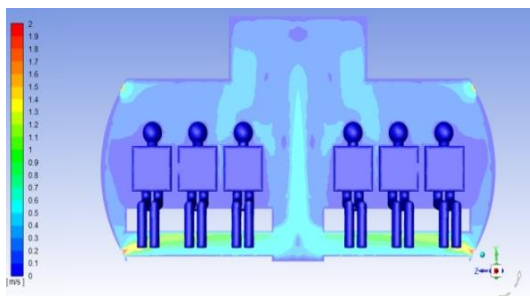


(سرعت ۳ متر بر ثانیه)

شکل ۱۶. کانتور PMV در سرعت‌های مختلف ورودی هوا

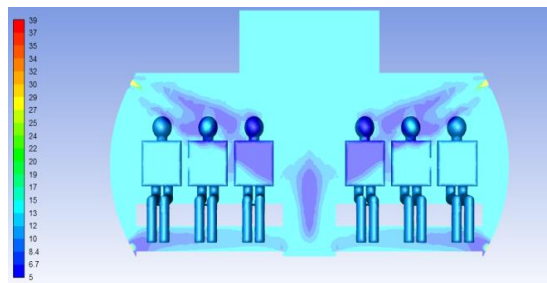
۵-۳- بررسی اثر تعویض دریچه‌های رفت و برگشت هوا بر آسایش حرارتی افراد

معمولاً توزیع هوا به روش جابه‌جایی درون کابین باعث افزایش آسایش حرارتی می‌شود. با توجه به کیفیت خوب هوای اطراف افراد درون کابین، این سیستم متناسب مکان‌های پرجمعیت می‌باشد. می‌توان برای تغییر توزیع هوا از سیستم تهویه اختلاطی به سیستم جابه‌جایی، دریچه‌های هوای ورودی و خروجی هوا را با هم جابه‌جا کرد. در این بخش تأثیر تغییر سیستم توزیع هوا در حالتی بررسی شد که رطوبت نسبی ۵ درصد، ورودی هوا ۲ متر بر ثانیه و شرایط اولیه حاکم باشد. شکل ۱۸ جریان هوا و سرعت آن را در کابین هواپیما نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، سرعت جریان در پایین پای آدمک‌ها، راهرو و بالای سر آدمک نزدیک‌تر به راهرو بیشتر است.

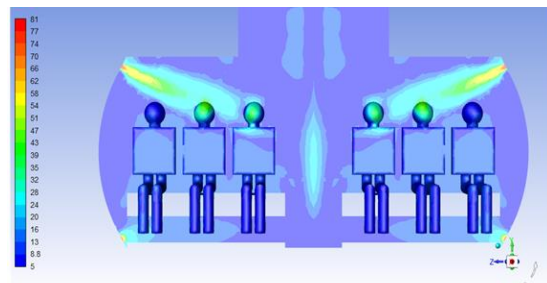


شکل ۱۸. کانتور سرعت در شرایط ورودی هوا از پایین کابین و خروجی از بالا (روش جابه‌جایی)

در شکل ۱۹ کانتور فشار ناشی از جریان هوا در صورتی که دریچه ورودی هوا از پایین پای آدمک‌ها باشد نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در این حالت بیشترین فشار به بدنه کابین وارد می‌شود و فشاری به آدمک‌ها وارد نشده است.

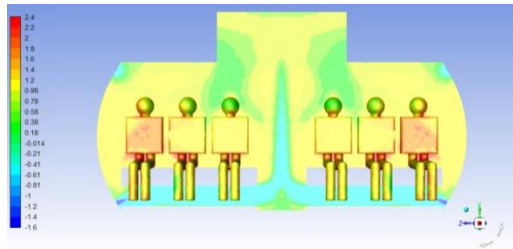


(سرعت ۱ متر بر ثانیه)

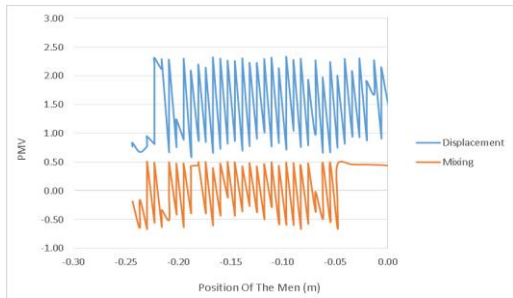


(سرعت ۳ متر بر ثانیه)

شکل ۱۷. کانتور PPD در سرعت‌های مختلف ورودی هوا

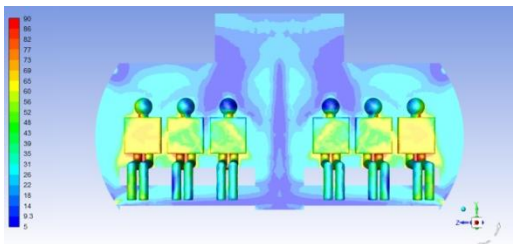


شکل ۲۱. کانتور PMV در شرایط ورودی هوا از پایین کابین و خروجی از بالا (روش جابه‌جایی)

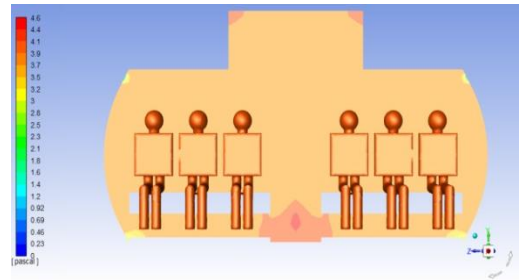


شکل ۲۲. مقایسه تغییرات PMV در شرایط توزیع هوای اختلاطی و توزیع هوای جابه‌جایی

در شکل ۲۳ کانتور رضایت پیش‌بینی شده درون کابین هواپیما در توزیع هوا با روش جابه‌جایی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در روش جابه‌جایی توزیع هوا، مسافران در ناحیه سر و پا احساس رضایت نسبی‌ای دارند اما چون ورودی هوا از بدنه کابین هواپیما می‌باشد، دمای میچ و کف پا در حدود ۲۱ درجه سانتی‌گراد است که سبب احساس سردی در این ناحیه شده است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که در روش سیستم تهویه اختلاطی، توزیع هوا موجب شده که آدمک‌ها در ناحیه بدن خود احساس گرمای بیشتری کنند.

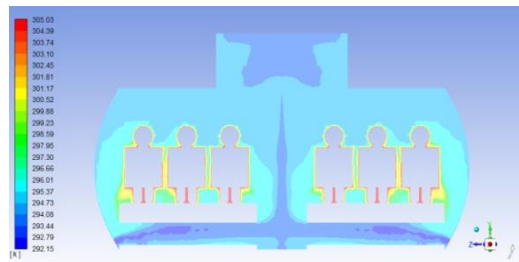


شکل ۲۳. کانتور PPD در شرایط ورودی هوا از پایین کابین و خروجی از بالا (روش جابه‌جایی)



شکل ۱۹. کانتور فشار در شرایط ورودی هوا از پایین کابین و خروجی از بالا (روش جابه‌جایی)

در شکل ۲۰ کانتور دمای ناشی از جریان هوا در این حالت نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در این حالت دمای هوای در فضای کابین هواپیما ۲۹۵ کلوین بوده و گرم‌ترین نقاط در بین پاها و بدن آدمک‌هاست.



شکل ۲۰. کانتور دما در شرایط ورودی هوا از پایین کابین و خروجی از بالا (روش جابه‌جایی)

در شکل ۲۱ کانتور آسایش آدمک‌های درون کابین هواپیما در این حالت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود آدمک کنار بدنه کابین شرایط گرم‌تری را نسبت به بقیه حس می‌کند اما شرایط آسایش آدمک‌های دیگر مطلوب به نظر می‌رسد.

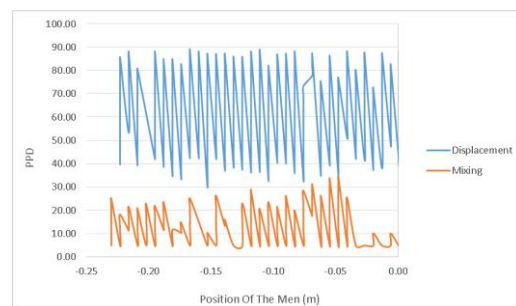
در شکل ۲۲ آسایش درون کابین هواپیما که ناشی از دو روش تهویه مطبوع جابه‌جایی و اختلاطی است با یکدیگر مقایسه شده است. در هر دو حالت سرعت هوای ورودی به کابین ۲ متر بر ثانیه و رطوبت نسبی ۵ درصد لحاظ شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در روش جابه‌جایی برای تمام موقعیت‌ها مقدار PMV بیشتر است.

ورودی هوا در سرعت‌های مختلف به داخل کابین هواپیما مشخص شد که هرچه سرعت ورودی هوا کمتر باشد، گردش هوا بهتر است و مسافران احساس آسایش بیشتری دارند. همچنین هرچه سرعت ورودی هوا کمتر باشد، تغییرات فشار استاتیکی ناشی از آن در ناحیه آدمک‌ها بهتر و بهبود یافته‌تر است. با تغییر روش توزیع جریان هوا درون کابین هواپیما از سیستم اختلاطی به سیستم جابه‌جایی، مسافران احساس آسایش حرارتی کمتری دارند؛ اما در روش جابه‌جایی تهویه مطبوع، تغییرات فشار استاتیکی روی بدن و سر مسافران کمتر می‌باشد. با ۵ درجه کلون خنک کردن هوا نسبت به شرایط اولیه، اگرچه مسافران احساس سرمای بیشتری در قسمت سر خود می‌کنند اما آسایش آن‌ها کمتر می‌شود. در اثر تغییر دمای هوا، تغییرات فشار استاتیکی ناحیه سر و بدن مسافران ناچیز بود.

۷. مآخذ

- [1] R.H. Howell, Principles of Heating Ventilating and Air Conditioning, ASHRAE Handbook—Fundamentals, 8th Edition, 2017.
- [2] Ashrae handbook, Fundamentals, 2021.
- [3] R. de Dear, G.S. Brager, Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, ASHRAE Transactions, Vol. 104 (part 1), 1998.
- [4] P.O. Fanger, Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering, McGraw-Hil, 1970.
- [5] J. Bosbach, J. Pennecot, C. Wagner, M. Raffel, T.H. Lerche and S.T. Repp, Experimental and Numerical Simulations of Turbulent Ventilation in Aircraft Cabins, Energy, Vol. 31. No. 5, pp. 694-705, 2006.
- [6] A. Wang, Y. Zhang, Y Sun and X. Wang, Experimental study of ventilation effectiveness and air velocity distribution in an aircraft cabin mockup, Building and Environment, Vol. 43, pp. 337-343, 2008.
- [7] T. Zhang, Q. Chen Novel, Air distribution systems for commercial aircraft cabins, Building and Environment, Vol. 42, pp. 1675-1684, 2007.

با مشاهده شکل ۲۴ و نتایج به‌دست‌آمده از شرایط توزیع هوا (اختلاطی و جابه‌جایی) می‌توان گفت که مسافران با توزیع هوا از بالای کابین (روش اختلاطی) احساس رضایت بیشتری می‌کنند. با توجه به نتایج حاصل می‌توان این‌گونه جمع‌بندی کرد که در فضای داخل کابین روش اختلاطی مقبول‌تر بوده و شرایط آسایش بیشتری را تأمین می‌کند.



شکل ۲۴. مقایسه تغییرات PPD در شرایط توزیع هوای اختلاطی و توزیع هوای جابه‌جایی

توزیع مناسب جریان هوا در کنار استفاده از سیستم‌های تولید توان جدید می‌تواند عملکرد سیستم تهویه مطبوع هواپیما را بهبود دهد [۲۷].

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

برای حل این پژوهش از دینامیک سیالات محاسباتی و مدل $k-\epsilon$ استفاده شده است. برای بررسی آسایش از دو پارامتر میانگین آرای پیش‌بینی‌شده (PMV) و درصد نارضایتی پیش‌بینی‌شده (PPD) استفاده شد. اثر رطوبت نسبی در صفر، ۵ و ۱۰ درصد تحلیل شد. نتایج نشان داد که در اثر این تغییرات، آسایش حرارتی برای مسافران تقریباً در یک محدوده قرار گرفت و فشار استاتیکی با وجود تغییرات فشار جزئی ناشی از بخار تغییر محسوسی نداشت. با بررسی جریان

environment, Building and Environment, Vol. 99, pp. 44-58, 2016.

- [20] R.You, J. Chen, Ch. H. Lin, D. Wei and Q. Chen, Investigating the impact of gaspers on cabin air quality in commercial airliners with a hybrid turbulence model, Building and Environment, Vol. 111, pp. 110-122, 2017.
- [21] F. Li, J. Liu, J. Ren, X. Cao and Y. Zhu, Numerical investigation of airborne contaminant transport under different vortex structures in the aircraft cabin, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 96, pp. 287-295, 2016.
- [22] H. Jiang, S. Dong, H. Zhang and J. Wang, Optimization on conventional and electric air-cycle refrigeration systems of aircraft: A short-cut method and analysis, Chinese Journal of Aeronautics, Vol 33, No. 7, 2020.
- [23] H. Yang, Ch. Yang, X. Zhang and X. Yuan, Influences of Different Architectures on the Thermodynamic Performance and Network Structure of Aircraft Environmental control System, Entropy, Vol. 23, No. 7, 2021.
- [24] D. Zhongdi, S. Haoran, W. Chengyun and H. Haitao, Flow- network based dynamic modelling and simulation of the temperature control system for commercial aircraft with multiple temperature zones, Energy, Vol. 238, 2021.
- [25] A. Tohidi and H. ghafari, Ansys Fluent comprehensive guide (introductory), Dibagaran Tehran, Tehran, 2013.
- [26] National Standard 14384, determination of PMV and PPD thermal comfort indices and local thermal comfort criteria, First edition, 1384.
- [27] J Pirkandi, M Ommian, Thermo-Economic Operation Analysis of SOFC-GT Combined Hybrid System for Application in Power Generation Systems, Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, Vol. 16 (1), 2019.

- [8]. Z. Zhang, X. Chen, S, Mazumdar, T. Zhang and Q. Chen, Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mockup, Building and Environment, Vol 44, No. 1, pp. 85-94, 2009.
- [9]. T. Zhang, S.Y. Yin and Sh. Wang, An under-aisle air distribution system facilitating humidification of commercial aircraft cabins, Building and Environment, Vol 45, No. 4, pp. 907-915, 2010.
- [10]. P. Roytta, Study of a vapor-compression air-conditioning system for jetliners, PhD Thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2009.
- [11] X. Chen and Q. Chen, Comparison of different decontaminant delivery methods for sterilizing unoccupied commercial airliner cabins, Building and Environment, Vol. 45, No. 9, pp. 2027-2034, 2010.
- [12]. T. Zhang, P. Li and S. Wang, A personal air distribution system with air terminals embedded in chair armrests on commercial airplanes, Building and Environment, Vol. 47, pp. 89-99, 2012.
- [13]. W. Liu, J. Wen, J. Chao, W. Yin, Ch. Shen, D. Lai, Ch.H. Lin, J. Liu, H. Sun and Q. Chen, Accurate and high-resolution boundary conditions and flow fields in the firstclass cabin of an MD-82 commercial airliner, Atmospheric Environment, Vol. 56, pp. 33-44, 2012.
- [14]. B. Xu and Y. Zhu, Investigation on lowering commuters in-cabin exposure to ultrafine particles, Transportation Research Part D Transport and Environment, Vol. 18, No. 1, pp. 122-130, 2013.
- [15] C. Chen, W. Liu, F. Li, Ch.H. Lin, J.Liu, J. Pei and Q. Chen, A hybrid model for investigating transient particle transport in enclosed environments, Building and Environment, Vol. 62, pp. 45-54, 2013.
- [16]. M. R. Afghari1, M. Abolhasani Moghadam and A. Ziaie, Design and experimental analysis of aircraft air distribution system, Journal of Mechanical Research and Application, Vol. 4, No. 3, pp. 19-27, 2012.
- [17]. X. Cao, J. Liu, J. Pei, Y. Zhang, J. Li and X. Zhu, 2D-PIV Measurement of aircraft cabin air distribution with a high spatial resolution, Building and Environment, Vol. 82, pp. 9-19, 2014.
- [18]. T. Zhang and X. Yi You, A simulation-based inverse design of preset aircraft cabin environment, Building and Environment, Vol. 82, pp. 20-26, 2014.
- [19] X. Cao, J. Li, J. Liu, and W. Yang, 2D-PIV measurement of isothermal air jets from a multi-slot diffuser in aircraft cabin

۸. پی نوشت

1. P.M.V: Predicted Mean Vote
2. P.P.D: Predicted Percentage of Dissatisfied
3. ECS: Environmental Control System
4. GCI: Grid Convergence Index