



مطالعه‌ی عددی تاثیر پرده‌ی هوایی بر انتقال حرارت اتاق‌های سرد و گسترش آلودگی در زمان وقوع آتش

شهرز متقیان¹، هادی پاسدار شهری^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* صندوق پستی 14115-143، pasdar@modares.ac.ir

چکیده

پرده‌های هوایی به شکل گسترده برای عایق‌بندی حرارتی ورودی محیط‌هایی با رفت آمد زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از این کاربردها عایق‌بندی و جداسازی اتاق‌های سرد از نواحی بیرونی می‌باشد. به علاوه از این تجهیزات برای جلوگیری از گسترش آتش و آلودگی‌های شیمیایی نیز استفاده می‌شود. در این مطالعه تاثیر و عملکرد پرده‌ی هوایی عمودی که کاربرد بیشتری دارند، در هر مورد از کاربردهای مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل تاثیرات پرده‌ی هوایی برای دو مساله انجام شده است: در مساله‌ی اول هدف استفاده از پرده‌ی هوایی کاهش انتقال حرارت بین اتاق سرد و اتاق گرم با 25 درجه‌ی سانتی‌گراد اختلاف دما می‌باشد و پرده‌ی هوایی در اتاق گرم نصب شده است. در مساله‌ی دوم شرایط آتش سوزی در در یک اتاق در حضور پرده‌ی هوایی برای کنترل گسترش گونه‌ی سمی مونواکسیدکربن به اتاق خنثی شبیه‌سازی شده است. اتاق آتش در دمای 300 درجه‌ی سانتیگراد می‌باشد و تمامی اتاق را مونواکسیدکربن پر کرده است و هندسه‌ی هر دو مساله یکسان می‌باشد. آنالیز حساسیت برای بازده پرده‌ی هوایی در سرعت‌های ورودی و زوایای سرعت مختلف انجام شده است. برای ارزیابی عملکرد پرده‌ی هوایی از روش دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزار تجاری آنسیس فلونت 16.2 استفاده شده است.

کلید واژگان: پرده‌ی هوایی، اتاق سرد، انتقال حرارت، انتقال جرم، دینامیک سیالات محاسباتی

Numerical investigation of air curtain effects on heat transfer of cold rooms and pollution spreading in fire situations

Shahrooz Motaghian, Hadi Pasdarshahri*

Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, pasdar@modares.ac.ir

ABSTRACT

Air curtain devices are widely being used as thermal sealing in environments with heavy human traffic from outer zones. One of these applications is isolating and sealing of cold rooms. In addition, these devices are used in order to keep wildfires and chemical pollutions from spreading. In this study, performance of vertical air curtains, which have more applications, are investigated in both aforementioned usage areas. Analysis of air curtain performance are investigated through two case studies: in the first one, Air curtain isolating performance in heat transfer reduction from a cold room to a warmer zone with 25°C temperature difference is evaluated, in which the device is installed in warmer room. In the second case study, an ongoing fire in a room with presence of air curtain to control toxic CO from spreading to neutral room is simulated. The fire room is filled with CO at the temperature of 300°C. the two case studies were conducted with identical geometries. Sensitivity analysis is carried out on air curtain device efficiency in different jet velocities and velocity angles. Computational fluid dynamics (CFD) method by mean of commercial software ANSYS FLUENT 16.2 is used to evaluate air curtain effect.

Keywords: Air curtain device, Cold room, Heat Transfer, Mass transfer, CFD

1- مقدمه

آمد وسایل نقلیه یا افراد به اتاق سرد صورت می‌گیرد. این نفوذ هوا از طرفی دیگر باعث افزایش رطوبت نامطلوبی در اتاق سرد می‌شود. استفاده از درهای خودکار که برای زمان اندکی اجازه‌ی نفوذ هوا را می‌دهند، یک راه حل معمول برای جلوگیری از نفوذ هوا می‌باشد. اما استفاده از این درها باعث دشواری در رفت و آمد و جابه‌جایی کالاها می‌شود [3].

روش دیگری که برای جلوگیری از انتقال حرارت و انتقال جرم ناخواسته بین محیط خارجی و محیطی که شرایط حرارتی مشخصی برای آن در نظر گرفته شده است، استفاده از پرده‌ی هوایی می‌باشد. این تجهیزات با استفاده از یک جت هوا که می‌تواند به شکل افقی و عمودی (معمولاً عمودی) باشد،

یکی از مشکلات مکان‌هایی که نیاز به رفت و آمد متعدد در آنها می‌باشد، انتقال حرارت و انتقال جرم در آنها می‌باشد. این موضوع سبب می‌شود تا بار مورد نیاز (گرمایشی و سرمایشی) برای برقراری شرایط مورد نظر افزایش پیدا کند و از طرفی انتقال جرم صورت گرفته از محیط خارجی که معمولاً به دلیل نفوذ هوا می‌باشد، باعث کاهش کیفیت هوای داخلی شود. در مناطق مرطوب انتقال جرم باعث افزایش بار نهان سیستم‌های تهویه مطبوع می‌شود [2,1].

یکی از دلایل مصرف بالای انرژی در اتاق‌های با دمای پایین، بار حرارتی بالایی است که توسط نفوذ هوا ایجاد می‌شود. این نفوذ هوا به دلیل رفت و

Please cite this article using:

Sh.Motaghian, H.Pasdarshahri, Numerical investigation of air curtain effects on heat transfer of cold rooms and pollution spreading in fire situations, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 230-234, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

در مساله‌ی دوم عملکرد پرده‌ی هوایی در جلوگیری آلودگی با کمک حل عددی مورد تحلیل قرار گرفته است. به همین منظور فرض شده است که در محیطی که پرده‌ی هوایی در خارج از آن قرار گرفته است، آتش‌سوزی رخ داده است. گونه‌ی سمی در مواقعی که آتش‌سوزی رخ می‌دهد، منواکسیدکربن می‌باشد و از طرفی دیگر آتش سوزی باعث افزایش دمای محیط تحت حریق می‌شود. برای شبیه‌سازی این شرایط دمای محیط تحت حریق 300 درجه‌ی سانتی‌گراد و دمای ناحیه‌ای که پرده‌ی هوایی در آن قرار دارد 25 درجه‌ی سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. در $T=0$ فرض شده است که در ناحیه‌ی حریق تنها گونه‌ی منواکسیدکربن در ابتدا وجود دارد و هوا ناحیه‌ی بیرونی را پر کرده است. ورودی جت هوا با دمای 25 درجه‌ی سانتی‌گراد فرض شده است و شرایط مرزی دیوارها نیز همانند مساله‌ی اول می‌باشد.

3-2- شبکه‌ی محاسباتی و روش حل

به دلیل مقارن بودن شرایط مرزی و اولیه‌ی مساله، نیمی از هندسه شبکه‌بندی (شکل 2) و حل شده است و برای صفحه‌ی $z=3$ متر که صفحه‌ی مرکزی هندسه می‌باشد شرط مرزی تقارن اعمال شده است. تعداد شبکه‌ی محاسباتی در نظر گرفته شده برای تحلیل این مساله که در آن تعداد حل از تراکم شبکه مستقل می‌شود، در مرجع [7] حدود 152000 گزارش شده است که در این مطالعه تعداد شبکه، 306000 در نیمه‌ی مذکور هندسه می‌باشد، به علاوه در شبکه‌ی تولید شده در ناحیه‌ی تشکیل پرده‌ی هوایی و مجاورت دیوارها، به منظور افزایش دقت و بهینه‌سازی شبکه، تراکم سلول‌های محاسباتی بیشتر می‌باشد.

تحلیل عددی مساله موردنظر در این مطالعه به کمک نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت 16.2⁴، که بر پایه‌ی روش حجم محدود⁵ توسعه داده شده است، انجام شده است. به منظور مدل‌سازی اغتشاشات از روش متوسط‌گیری رینولدز⁶ و مدل کی-اِپسیلون استاندارد⁷ استفاده شده است که برای حصول دقت بیشتر در مجاورت دیوارها از تابع دیوار استاندارد⁸ بهره برده شده است. حل عددی انجام شده برای تمامی حالات مساله به شکل غیرپایا و برای 120 ثانیه از زمان جریان صورت گرفته است. گام زمانی مناسب با توجه به گام زمانی پیشنهادی مرجع [7]، 0.1 ثانیه در نظر گرفته شده است.

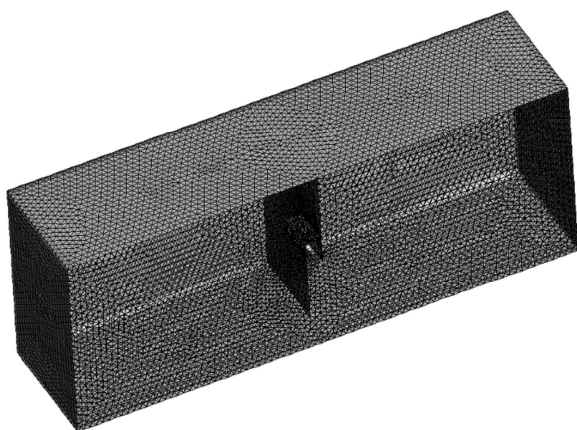


Fig. 2 Mesh of calculation domain

شکل 2 شبکه‌ی دامنه‌ی محاسباتی

یک مانع هوایی را در ورودی‌ها تشکیل می‌دهند. مزیت استفاده از تجهیزات، امکان عبور آسان افراد و کالاها با سرعت بالا می‌باشد.

در کاربردهای ذکر شده‌ی پرده‌ی هوایی، مهمترین هدف جلوگیری از انتقال حرارت و نفوذ هوا به یک محیط مشخص می‌باشد. برای این تجهیزات به کاربردهای دیگری نظیر جلوگیری از گسترش آتش و محدود کردن آن در تونل‌ها [4]، کنترل گسترش آلودگی در اتاق‌های تمیز¹ [5] و کنترل آلودگی ناشی از ذرات و گازهای سمی در کاربردهای صنعتی [6] می‌توان اشاره کرد. در این مطالعه به کمک دینامیک سیالات محاسباتی² به بررسی عملکرد پرده‌ی هوایی در عایق بندی حرارتی و جلوگیری از گسترش آلودگی پرداخته شده است.

2- مدل‌سازی عددی

1-2- هندسه‌ی مساله

به منظور تحلیل عددی عملکرد پرده‌ی هوایی در عایق‌بندی حرارتی و جلوگیری از ورود آلودگی از هندسه‌ی مطالعه‌ی انجام شده توسط جی.سی. گنکالوس³ [7] و همکاران استفاده شده است که این هندسه در "شکل 1" نشان داده شده است. هندسه مساله از دو ناحیه‌ی $6 \times 6 \times 4$ تشکیل شده است. بین دو محیط یک ورودی با عرض 1.8 متر و با ارتفاع 2 متر در نظر گرفته شده است. پرده‌ی هوایی به فاصله‌ی 0.2 متر بالای قرار می‌گیرد. این تجهیز دارای 2 متر طول، 0.4 متر عرض و 0.3 ارتفاع می‌باشد و در وجه زیرین پرده‌ی هوایی، نازل ورودی با طول 1.9 متر و عرض 0.15 متر قرار دارد. دریچه خروجی نیز دارای 1.9 متر طول و 0.2 متر عرض می‌باشد.

2-2- شرایط مرزی و شرایط اولیه

در مساله اول، زمانی که از پرده‌ی هوایی جهت عایق‌بندی حرارتی و جلوگیری از نفوذ هوا به اتاق سرد استفاده می‌شود، دمای اولیه‌ی اتاق سرد 5 درجه‌ی سانتی‌گراد و دمای اولیه‌ی محیط بیرونی 30 درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. فشار اولیه در دو محیط فشار 1 اتمسفر می‌باشد. در این مساله پرده‌ی هوایی همواره در خارج از اتاق سرد قرار دارد. دمای هوای ورودی پرده‌ی هوایی 30 درجه‌ی سانتی‌گراد و سرعت و جهت آن نیز متغیر می‌باشد و برای شرط مرزی خروجی نیز، فشار خروجی 1 اتمسفر در نظر گرفته شده است. شرط مرزی دیوارهای هندسه در معادله‌ی مومنوم عدم لغزش و برای معادله‌ی انرژی عایق حرارتی می‌باشد.

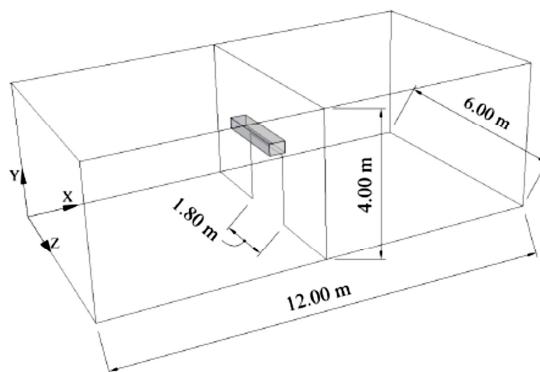


Fig. 1 Geometry of the case study

شکل 1 هندسه‌ی مساله

⁴ Ansys Fluent 16.2

⁵ Finite Volume

⁶ Reynolds

⁷ Standard k-epsilon

⁸ Standard Wall Function

¹ Clean Room

² Computational Fluid Dynamics (CFD)

³ J.C Goncalves

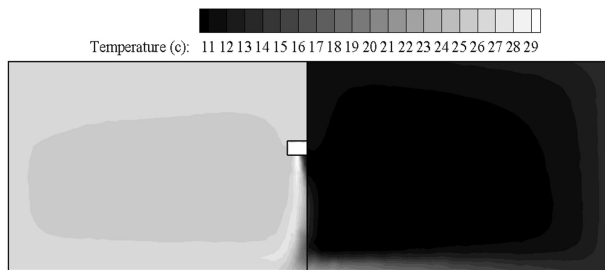


Fig 4. Distribution of temperature in z=3m plane with turned on air curtain

شکل 4 توزیع دما در صفحه‌ی z=3 متر با پرده‌ی هوایی روشن

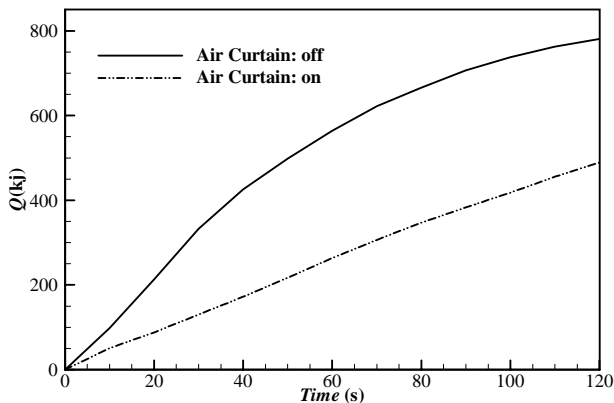


Fig 5. Sensible Energy gained by cold room in both off and on mode of air curtain

شکل 5 انرژی محسوس دریافتی اتاق سرد در حالت خاموش و روشن پرده‌ی هوایی

هوایی خاموش کاهش می‌یابد و انتقال حرارت بین دو محیط گرم و سرد کاهش می‌یابد، اما در حالت پرده‌ی هوایی روش رفتار نمودار خطی است و نرخ انتقال حرارت تقریباً ثابت می‌باشد.

عملکرد حرارتی پرده‌ی هوایی به سرعت جت خروجی وابسته می‌باشد. باتوجه به نمودار "شکل 6" در سرعت 5 متر بر ثانیه، پرده‌ی هوایی دارای بیشترین بازده می‌باشد. همان‌طور که در نمودار مذکور مشاهده می‌شود در سرعت‌های خیلی پایین پرده‌ی هوایی در زمان‌های اولیه حل، نه تنها از انتقال حرارت بین یخچال و محیط جلوگیری نمی‌کند بلکه باعث افزایش آن می‌شود. بدون وجود پرده‌ی هوایی جریانی که بین دو محیط ایجاد می‌شود، ناشی از اثر شناوری است. زمانی که سرعت جت ورودی اندک باشد، جریان اجباری شکل گرفته توسط پرده‌ی هوایی، جریان طبیعی را تقویت می‌کند [8].

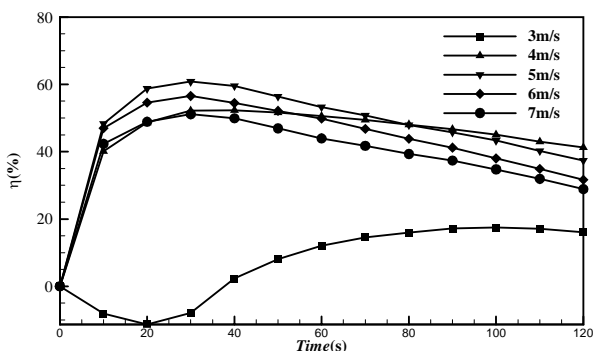


Fig 6. Comparison of air curtain thermal performances in different jet velocities

شکل 6 مقایسه‌ی عملکرد حرارتی پرده‌ی هوایی در سرعت‌های جت متفاوت

3- نتایج و بحث

به منظور ارزیابی عملکرد پرده‌ی هوایی در عایق‌بندی حرارتی محیط یخچال پارامتر بازده پرده‌ی هوایی به شکل رابطه (1) تعریف می‌شود [7].

$$\eta_{\text{therm}}(t) = \left(1 - \frac{Q(t)}{Q_{\text{off}}(t)} \right) \times 100 \quad (1)$$

در رابطه‌ی (1)، $Q(t)$ مقدار انرژی محسوس دریافتی محیط یخچال در حالت استفاده از پرده‌ی هوایی و $Q_{\text{off}}(t)$ مقدار انرژی محسوس دریافتی اتاق سرد در حالت عدم استفاده از پرده‌ی هوایی می‌باشد. η در رابطه‌ی (1) بیانگر بازده عملکرد پرده‌ی هوایی است. همان‌طور که در رابطه‌ی (1) مشاهده می‌شود، از حل نتایج حل عددی حالت پرده‌ی هوایی خاموش به عنوان مرجع برای محاسبه‌ی بازده پرده‌ی هوایی استفاده می‌شود. چگونگی محاسبه‌ی انرژی محسوس در ناحیه‌ی یخچال در رابطه‌ی (2) بیان شده است [7].

$$Q(t) = \int_V \rho(t) c_p (T(t) - T_{\text{init}}) dv \quad (2)$$

در رابطه‌ی (2) $\rho(t)$ ، c_p و $T(t)$ به ترتیب چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، دما و حجم لحظه‌ای و T_{init} دمای اولیه‌ی اتاق سرد می‌باشند. جهت بررسی عملکرد پرده‌ی هوایی در جلوگیری از ورودی محصولات سمی آتش به محیط خارج از ناحیه‌ی آتش سوزی همانند بازده عایق حرارتی، پارامتری به عنوان بازده پرده‌ی هوایی در جلوگیری از ورود آلودگی به ترتیب رابطه (3) تعریف می‌شود.

$$\eta_{\text{poll}}(t) = \left(1 - \frac{C_{\text{co}}(t)}{C_{\text{co,off}}(t)} \right) \times 100 \quad (3)$$

در رابطه‌ی (3)، $C_{\text{co}}(t)$ غلظت مولی منواکسیدکربن در صورت استفاده از پرده‌ی هوایی و $C_{\text{co,off}}(t)$ غلظت مولی منواکسیدکربن در حالت خاموش بودن پرده‌ی هوایی می‌باشد.

نتایج مساله‌ی مذکور برای دو کاربرد یعنی عایق حرارتی و عایق آلودگی به شکل جداگانه ارائه شده است. در حل عددی این مساله، پرده‌ی هوایی در محیط گرم و خارج از ا و محیط درگیر آتش‌سوزی قرار دارد.

همان‌طور که ذکر شد، یکی از کاربردهای پرده‌ی هوایی ایجاد یک عایق حرارتی آیرودینامیکی برای کاهش نرخ انتقال حرارت بین دو محیط می‌باشد. همان‌طور که در "شکل 3 و 4" مشاهده می‌شود، زمانی که پرده‌ی هوایی روشن می‌باشد اختلاط کمتری بین هوای دو محیط صورت می‌گیرد. با توجه به نمودار "شکل 5"، زمانی که پرده‌ی هوایی روشن می‌باشد، انرژی دریافتی محیط یخچال به مراتب کمتر از زمانی است که پرده‌ی هوایی خاموش می‌باشد. همان‌طور که در "شکل 5" بعد از گذشت زمان و به دلیل انتقال نرخ انتقال حرارت بالا و اختلاط هوای بین دو محیط، شیب نمودار حالت پرده‌ی

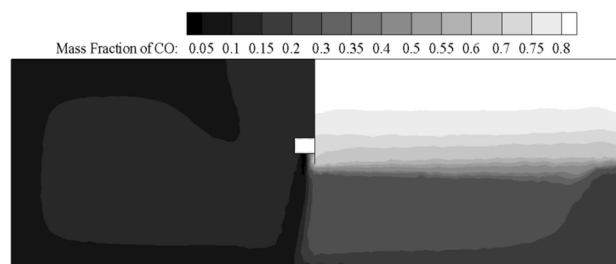


Fig 3. Distribution of temperature in z=3m plane with turned off air curtain

شکل 3 توزیع دما در صفحه‌ی z=3 متر با پرده‌ی هوایی خاموش

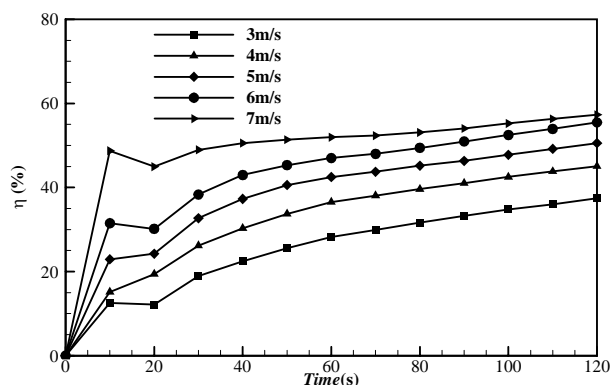


Fig 10. Comparison of air curtain pollution control in different jet velocities

شکل 10 مقایسه‌ی عملکرد کنترل آلودگی پرده‌ی هوایی در سرعت‌های جت متفاوت

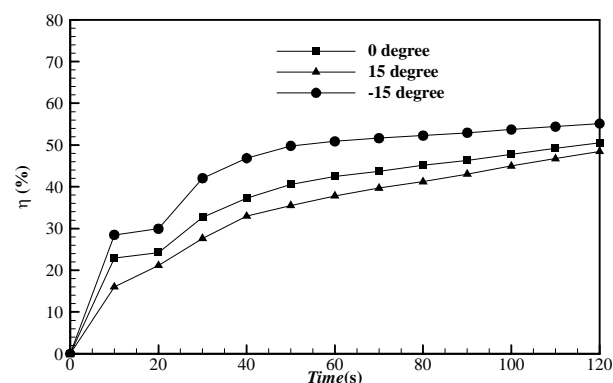


Fig 11. Comparison of air curtain pollution control in different jet angles

شکل 11 مقایسه‌ی عملکرد کنترل آلودگی پرده‌ی هوایی در زوایای متفاوت جت

برای مطالعه‌ی تأثیر انتقال گونه‌های شیمیایی آلوده از یک محیط به محیط حل عددی با شرایط مرزی و اولیه‌ی مذکور صورت گرفت. در این مساله تأثیر پرده‌ی هوایی بر انتقال جرم به واسطه‌ی اختلاف غلظت منواکسیدکربن در محیط آتش و محیط خنثی مورد بررسی قرار گرفته است. انتقال جرم در شرایط مساله به واسطه‌ی نفوذ جرم و جابه‌جایی صورت می‌گیرد که با توجه به اختلاف دمای بالای بین دو محیط مکانیزم جابه‌جایی در انتقال جرم تقویت می‌شود. با توجه به "اشکال 8 و 9"، در زمانی که پرده‌ی هوایی روشن می‌باشد، در ثانیه‌ی 1 حل مقدار منواکسیدکربن کمتری در محیط خنثی وجود دارد و این تجهیز نرخ انتقال گونه‌ی منواکسیدکربن را کاهش داده است.

سرعت جت خروجی پرده‌ی هوایی نیز بر عملکرد این تجهیز در جلوگیری از ورود آلودگی به محیط خنثی موثر می‌باشد. در "شکل 10" مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت بازده عملکرد پرده‌ی هوایی طبق رابطه‌ی (3) افزایش می‌یابد. در زمان‌های اولیه بازده ناگهان افزایش می‌یابد و به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد و سپس دچار افت می‌شود. سپس با گذشت زمان بازده با شیب ثابت افزایش می‌یابد. افزایش مجدد بازده نشان‌گر این موضوع است که مقدار غلظت منواکسید در محیط خنثی کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل خروج منواکسیدکربن از دریچه‌ی خروجی است. افزایش بازده بعد از کاهش موقت، نشانگر شروع تخلیه‌ی منواکسیدکربن می‌باشد. در نتیجه پرده‌ی هوایی به دو شکل از وجود گونه‌ی سمی منواکسیدکربن در محیط خنثی جلوگیری می‌کند، یکی با کاهش نرخ انتقال جرم و دیگری تخلیه‌ی

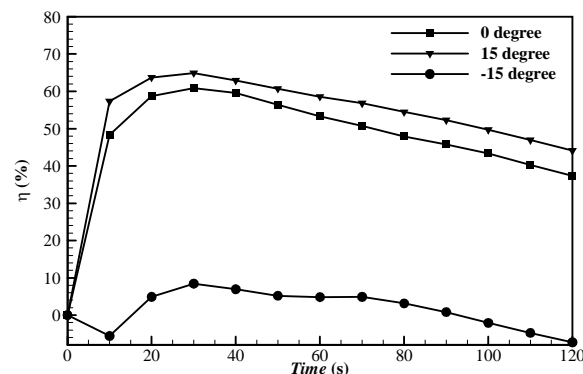


Fig 7. Comparison of air curtain thermal performances in different jet angles

شکل 7 مقایسه‌ی عملکرد حرارتی پرده‌ی هوایی زوایای متفاوت جت

همان‌طور که در نمودار "شکل 6" مشاهده می‌شود لزوماً افزایش سرعت ورودی جت باعث بهبود عملکرد پرده‌ی هوایی نمی‌شود و در سرعت‌های بالاتر از 5 متر بر ثانیه بازده پرده‌ی هوایی دچار افت می‌شود. مقدار ماکزیمم راندمان در تمامی سرعت‌های بیشتر از 3 متر بر ثانیه در نزدیکی ثانیه‌ی 30 ام اتفاق می‌افتد و سپس با گذشت زمان کاهش می‌یابد. در سرعت 4 متر بر ثانیه، با وجود بازده پایین‌تر ماکزیمم نسبت به سرعت 5 متر بر ثانیه، در زمان‌های بالاتر عملکرد بهتری نسبت به سرعت‌های دیگر دارد.

پارامتر دیگری که در عملکرد پرده‌ی هوایی تأثیر گذار است زاویه جت خروجی می‌باشد. برای بررسی این تأثیر در زوایای 0، 15 و -15 نتایج حل در سرعت 5 متر بر ثانیه جت در "شکل 7" با یکدیگر مقایسه شده‌اند. منظور از زاویه‌ی منفی، زمانی است که جهت خروجی به سمت ورودی محیط سرد متمایل شود. با توجه به نمودار "شکل 7" با متمایل کردن جت به سمت محیط گرم عملکرد پرده‌ی هوایی بهبود پیدا می‌کند و در صورتی که جت به سمت ورودی محیط یخچال متمایل شود عملکرد آن به شدت کاهش می‌یابد و حتی باعث دریافت بیشتر انرژی توسط محیط یخچال نسبت به حالت پرده‌ی هوایی خاموش می‌شود.

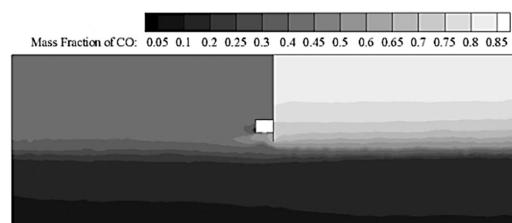


Fig 8. Distribution of Mass Fraction of CO in z=3m plane with turned off air curtain

شکل 8 توزیع کسر جرمی منواکسیدکربن در صفحه‌ی $z=3$ متر با پرده‌ی هوایی خاموش

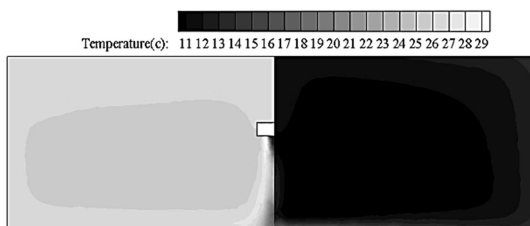


Fig 9. Distribution of Mass Fraction of CO in z=3m plane with turned on air curtain

شکل 9 توزیع کسر جرمی منواکسیدکربن در صفحه‌ی $z=3$ متر با پرده‌ی هوایی روشن

5- فهرست علائم

غلظت مولار ($\text{kmol}^1\text{m}^{-3}$)	C
ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت	C_p
انرژی محسوس دریافتی (kJ)	Q
دما (K)	T
زمان (s)	t
حجم (m^{-3})	V

علائم یونانی

بازده (%)	η
چگالی (kgm^{-3})	ρ

زیرنویس‌ها

مونواکسیدکربن	CO
اولیه	init
خاموش	off
آلودگی	poll

6- مراجع

- [1] A. M. Foster, M. J. Swain, R. Barrett, P. D'Agaro, L. P. Ketteringham, S. J. James, Three-dimensional effects of an air curtain used to restrict cold room infiltration, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 31, No. 6, pp. 1109-1123, 2007
- [2] T. Gil-Lopez, M. A. Galvez-Huerta, J. Castejon-Navas, V. Gomez-Garcia, Experimental analysis of energy savings and hygrothermal conditions improvement by means of air curtains in stores with intensive pedestrian traffic, *Energy and Buildings*, Vol. 67, pp. 608-615, 2013.
- [3] T. Gil-Lopez, J. Castejon-Navas, M. A. Galvez-Huerta, P. G. O'Donohoe, Energetic, environmental and economic analysis of climatic separation by means of air curtains in cold storage rooms, *Energy and Buildings*, Vol. 74, pp. 8-16, 2014.
- [4] G. Severino, J. C. Elicer-Cortés, A. Fuentes, Characterization of a diffusion flame inside a scale tunnel using double stream-twin jets air curtains, *Fire Safety Journal*, Vol. 62, pp. 264-271, 2013.
- [5] Y.-C. Shih, A.-S. Yang, C.-W. Lu, Using air curtain to control pollutant spreading for emergency management in a cleanroom, *Building and Environment*, Vol. 46, No. 5, pp. 1104-1114, 2011.
- [6] L. Oliveira, J. Costa, M. Carvalho, H. Gerhardt, C. Kramer, On aerodynamic sealing for industrial applications, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 37, No. 3, pp. 255-268, 1991.
- [7] J. C. Gonçalves, J. J. Costa, A. R. Figueiredo, A. M. G. Lopes, CFD modelling of aerodynamic sealing by vertical and horizontal air curtains, *Energy and Buildings*, Vol. 52, pp. 153-160, 2012.
- [8] J. J. Costa, L. A. Oliveira, M. C. G. Silva, Energy savings by aerodynamic sealing with a downward-blowing plane air curtain—A numerical approach, *Energy and Buildings*, Vol. 38, No. 10, pp. 1182-1193, 2006.

مونواکسیدکربن از محیط. با توجه به هر اندازه سرعت جت خروجی بیشتر باشد انتقال جرم نیز بین دو محیط کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش سرعت جت خروجی و تخلیه‌ی مونواکسیدکربن نیز سریع‌تر صورت می‌گیرد. در "شکل 11" تأثیر زاویه‌ی سرعت در جت خروجی بر بازده پرده‌ی هوایی نشان داده شده است. بر خلاف عملکرد عایق حرارتی در 120 ثانیه، در زاویه 15 درجه عملکرد پرده‌ی هوایی از بازده کمتری و در زاویه 15- درجه از بازده بیشتری نسبت به زاویه 0 درجه‌ی جت برخوردار است. اما در زاویه 15 درجه شیب افزایش ثانویه‌ی بازده بیشتر و در زاویه 15- درجه کمتر می‌باشد. این موضوع به دلیل افزایش جابه‌جایی در محیط خنثی در زاویه مثبت است و کاهش آن در زاویه منفی است.

4- نتیجه‌گیری

در تحلیل‌های انجام شده برای عایق‌بندی حرارتی اتاق سرد، مشخص شد که در سرعت 5 متر بر ثانیه و زاویه‌ی جت 15 درجه در شرایط مساله، حداکثر بازده به دست می‌آید. در نتایج دیده می‌شود که در تمامی سرعت‌های جت بالای 3 متر بر ثانیه، بعد از گذشت 30 ثانیه که بازده‌ی تجهیز به حداکثر مقدار خود می‌رسد، عملکرد پرده‌ی هوایی دچار افت می‌شود و در ادامه نیز با شیب منفی کاهش می‌یابد. برای زمان‌های بزرگتر از 90 ثانیه مشاهده شده که سرعت جت 4 متر بر ثانیه از افت شیب بازده کمتری نسبت به دیگر سرعت‌ها برخوردار است که این موضوع در استفاده‌ی بلند مدت می‌تواند قابل توجه باشد.

در کاربرد استفاده از پرده‌ی هوایی به عنوان کنترل‌کننده‌ی آلودگی، مشاهده شد که با افزایش سرعت بازده پرده‌ی هوایی در جلوگیری از گسترش آلودگی افزایش می‌یابد. در این شرایط بر خلاف کاربرد عایق حرارتی با گذشت زمان، بازده عملکردی تجهیز افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل تخلیه‌ی مونواکسیدکربن بعد از گسترش نسبی در اتاق خنثی اتفاق می‌افتد. با توجه به نتایج به دست آمده، مشخص شد که انحراف مثبت زاویه‌ی جت باعث کاهش عملکرد در زمان‌های آغازین می‌شود، اما به دلیل برقراری جابه‌جایی جرمی بهتر در اتاق خنثی، باعث تخلیه با نرخ بالاتر آلودگی از درپچه‌ی خروجی پرده‌ی هوایی می‌شود. با توجه به مطالب بیان شده، در زمان‌هایی که نیاز به کنترل سریع آلودگی می‌باشد استفاده از کانال خروجی در پرده‌ی هوایی و ورود هوای تازه، باعث تخلیه و عدم گسترش آلاینده‌ها می‌شود.

در مقایسه‌ی عملکرد پرده‌ی هوایی در اثر آن بر انتقال حرارت و انتقال جرم مشاهده شد که در زمانی که از پرده‌ی هوایی به عنوان عایق حرارتی استفاده می‌شود، سرعت پایین جت خروجی تجهیز می‌تواند باعث افزایش انتقال حرارت و در نتیجه عملکرد منفی آن شود. در مقابل در کنترل آلاینده‌ها در سرعت‌های پایین نیز عملکرد مثبت پرده‌ی هوایی مشاهده شد.