



## تأثیرات زاویه پاشش جت پرده هوایی بر کیفیت هوای داخل و آسایش حرارتی ساکنان در یک اتاق فشار مثبت

سید علیرضا ذوالفقاری<sup>1\*</sup>، علی براتی ماژان<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

\* بیرجند، صندوق پستی 97175/376، zolfaghari@birjand.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

در این تحقیق، تأثیرات زاویه خروجی از جت پرده هوایی، بر درزبندی آیرودینامیکی اتاقی با سیستم تهویه فشار مثبت مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، از مدلسازی جریان، انتقال حرارت و پخش گونه‌ها به کمک حلگر عددی این قوم استفاده شده است. نتایج حاکی از آن است که زاویه پاشش جت، اثرات قابل توجهی بر توزیع پارامترهایی از جمله دما، غلظت آلاینده‌ها و نیز شاخص احساس حرارتی افراد دارد. به طوری که با تغییر زاویه پاشش جت از +10 درجه (به سمت داخل) به -10 درجه (به سمت خارج)، متوسط اختلاف دمای محیط داخل تا 2/5 درجه سلسیوس کاهش می‌یابد. همچنین، همین میزان تغییر در زاویه پاشش جت، باعث می‌شود تا متوسط غلظت آلاینده‌های محیط داخل با کاهشی قابل توجه، از 5ppm به 25ppm برسد. از طرفی نتایج نشان داد که به ازای زاویه -10 درجه برای پاشش جت پرده هوایی، متوسط شاخص احساس حرارتی افراد در فضای داخل به سمت احساس خنک سوق پیدا می‌کند. در نتیجه، زاویه پاشش مذکور باعث می‌شود که شرایط فضای داخل، تأثیر کمتری از محیط گرم بیرون بپذیرد. به عبارت دیگر، در زاویه پاشش نزدیک به -10 درجه، دستگاه پرده هوایی عملکرد مناسب‌تری را در جداسازی حرارتی و آیرودینامیکی دو محیط داخلی و خارجی از خود نشان می‌دهد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 01 دی 1393  
پذیرش: 16 دی 1393  
ارائه در سایت: 22 دی 1393  
کلید واژگان:  
دستگاه پرده هوایی  
زاویه پاشش جت  
آسایش حرارتی  
کیفیت هوای داخل

## Effects of air curtain's jet discharge angle on indoor air quality and occupants' thermal comfort in a positive pressure room

Seyed Alireza Zolfaghari\*, Ali Baratimajan

Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

\* P.O.B. 97175/376 Birjand, Iran, zolfaghari@birjand.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 22 December 2014  
Accepted 06 January 2015  
Available Online 12 January 2015

Keywords:  
Air curtain device  
jet discharge angle  
thermal comfort  
indoor air quality

### ABSTRACT

In this study, the effects of discharge angle from an air curtain's jet have been investigated on aerodynamic sealing of a room with positive pressure ventilation system. For this reason, the modeling of flow, heat transfer and species diffusion has been performed by using OpenFoam® numerical solver. The results show that the jet discharge angle has significant effects on the distribution of parameters such as temperature, concentration of pollutants and occupants' thermal sensation index. So, by varying the jet discharge angle from +10° (towards the indoor space) to -10° (towards the outdoor space), the average temperature difference between two spaces is reduced to 2.5°C. Also, the mentioned varying in discharge angle causes a significant reduction in the mean concentration of pollutants at the indoor space, from 25ppm to 5ppm. On the other hand, the results indicated that for the discharge angle of -10°, the average of occupant's thermal sensation index is shifting to the cool feeling. Therefore, the mentioned discharge angle can reduce the impacts of outdoor warm conditions on the indoor's. In other words, the discharge angle of -10° demonstrates the best performance of the air curtain device in thermal and aerodynamic separating of two indoor and outdoor spaces.

### 1- مقدمه

می‌باشد. از آنجایی که استفاده از درب در فضاهای پر تردد می‌تواند تا حدی موجب مختل شدن روند ورود و خروج سریع افراد شود، لذا مهندسان و طراحان برای چنین فضاهایی، استفاده از روش هواپندگی آیرودینامیکی مسیر تردد افراد به کمک دستگاه پرده هوایی را پیشنهاد می‌کنند. این دستگاه، معمولاً در فضای بالای درب‌های ورودی ساختمان‌های پر رفت آمد به منظور کاهش اتلاف حرارت و کاهش انتشار آلودگی نصب می‌شوند. به طور کلی، دستگاه پرده هوایی از یک یا دو دمنده افقی یا عمودی تشکیل می‌شود و هوا

اتلافات حرارتی ناشی از نفوذ هوا، معمولاً بخش قابل توجهی از اتلافات حرارتی ساختمان را به خود اختصاص می‌دهد. این اتلافات حرارتی اغلب از بازوها، به ویژه درب ورودی ساختمان‌ها اتفاق می‌افتد. این در حالی است که در ساختمان‌هایی که تردد افراد در آن‌ها نسبتاً زیاد است، هواپندگی درز-های ورودی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. بر این اساس، راه حل اولیه برای جلوگیری از اتلاف حرارتی اینگونه فضاها، استفاده از درب‌های فیزیکی

Please cite this article using:

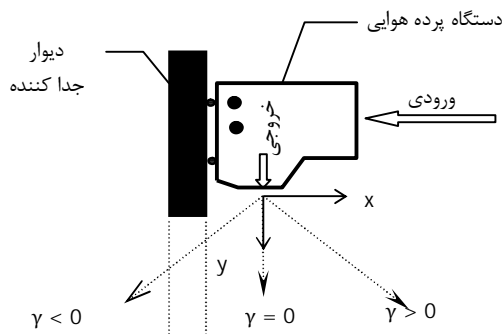
S.A.R. Zolfaghari, A. Baratimajan, Effects of air curtain's jet discharge angle on indoor air quality and occupants' thermal comfort in a positive pressure room, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 35-41, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

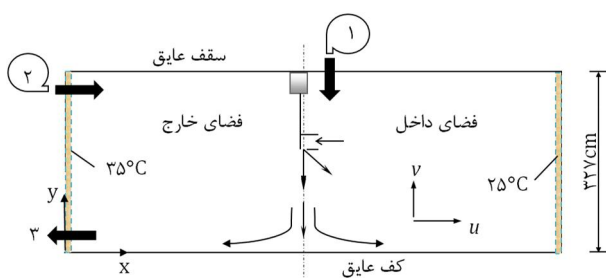
## 2- فضای نمونه

همانطور که در شکل 1 مشاهده می‌شود، دستگاه پرده هوایی شامل یک مجرای ورودی و یک مجرای خروجی با سطح مقطع کوچک‌تر می‌باشد. هوا از مجرای ورودی مکش شده و از مجرای خروجی با سرعت نسبتاً زیاد و زاویه مناسب به بیرون دستگاه پرتاب می‌شود. مطابق شکل 2، فضای نمونه مورد بررسی در تحقیق حاضر، شامل اتاقی به ابعاد  $12 \times 6$  مترمربع و ارتفاع  $3/27$  می‌باشد. این اتاق به وسیله یک دیوار جداکننده و یک درب ورودی، به طور مساوی به دو قسمت تقسیم شده است. دستگاه پرده هوایی بر بالای درب ورودی طوری نصب شده است که فاصله جت خروجی دستگاه تا کف زمین 2 متر می‌باشد. همچنین، هوا از محل خروجی دستگاه پرده هوایی با سرعت 7 متر بر ثانیه وارد فضا می‌شود. لازم به ذکر است که هندسه فوق، منطبق بر هندسه فضای نمونه مورد بررسی توسط کاستا و همکارانش [4] انتخاب شده است.

همانطور که در شکل 2 مشاهده می‌شود، علاوه بر دو مجرای ورودی و خروجی دستگاه پرده هوایی، سه دریچه دیگر نیز در فضای نمونه وجود دارند. به طوری که از دریچه شماره 1، هوای تازه و تهویه شده به فضای سمت راست (محیط داخل) وارد می‌شود و از دریچه شماره 2، هوای گرم به فضای سمت چپ (محیط بیرون) تخلیه می‌شود. همچنین، دریچه شماره 3 برای خروج هوا از فضای نمونه تعبیه شده است. شایان ذکر است که با وجود این دریچه‌ها می‌توان شرایط حرارتی سمت داخل و خارج و نیز میزان اختلاف فشار میان دو محیط را کنترل نمود. بر این اساس، هوا از دریچه شماره 1 با دمای  $25^\circ\text{C}$ ، فشار نسبی  $10\text{Pa}$  و نرخ تعویض هوای واحد وارد فضای نمونه می‌شود. همچنین، به منظور شبیه‌سازی فضای خارج، هوا از دریچه شماره 2، با دمای  $35^\circ\text{C}$  و فشار نسبی  $5\text{Pa}$  به سمت دیگر فضای نمونه وارد می‌شود. علاوه بر این، طبق شرایط مفروض در تحقیق کاستا و همکارانش [4]، دمای دیوار عمودی اتاق سمت راست ثابت و برابر  $25^\circ\text{C}$  و دمای دیوار عمودی اتاق سمت چپ ثابت و برابر  $35^\circ\text{C}$  در نظر گرفته شده است. ضمن اینکه سقف و کف اتاق‌ها عایق فرض شده‌اند. در شکل 3، جزئیات مربوط به جانمایی و هندسه دستگاه پرده هوایی نسبت به مبدأ مختصات و بر حسب سانتیمتر نشان داده شده است.



شکل 1 طرحواره دستگاه پرده هوایی



شکل 2 طرحواره فضای نمونه به همراه شرایط مرزی

را از یک مجرای بزرگ (ورودی دستگاه) مکش کرده و با سرعت زیاد از یک مجرای بسیار کوچک‌تر (خروجی دستگاه) به صورت جت به محیط تخلیه می‌کند. ایده ساخت دستگاه پرده هوایی برای اولین بار در سال 1904، توسط کمل<sup>1</sup> به ثبت رسید و در سال 1956، شرکت مینیویل<sup>2</sup> دستگاه پرده هوایی را بعنوان یک محصول تجاری به اروپا برد [1]. از آن زمان تا به امروز، عملکرد مؤثر دستگاه‌های پرده هوایی در زمینه کاهش مصرف انرژی، باعث گسترش روزافزون استفاده از این دستگاه‌ها شده است. از سوی دیگر، طراحی صحیح دستگاه‌های پرده هوایی می‌تواند تأثیرات چشمگیری بر ارتقای شرایط آسایش حرارتی ساکنان و نیز کیفیت هوای داخل داشته باشد.

با توجه به اهمیت موضوع، محققان زیادی به پژوهش در زمینه عملکرد دستگاه‌های پرده هوایی پرداخته‌اند. در سال 2002، سیرن [2,3] با استفاده از یک مدل ساده دو بعدی به ارائه یک حل تحلیلی از جریان جت سیال خروجی از یک دستگاه پرده هوایی عمودی پرداخت. این تحقیق منجر به تعیین برخی پارامترهای تأثیرگذار در طراحی دستگاه پرده هوایی شد. در سال 2006، کاستا و همکارانش [4] با استفاده از یک حل عددی دو بعدی، میزان تأثیرات پارامترهای هندسی و دینامیکی دستگاه‌های پرده هوایی را بر کاهش مصرف انرژی و نیز کارایی این دستگاه‌ها مورد بررسی قرار دادند. تحقیق ایشان در نهایت منجر به تعیین مقدار بهینه برای پارامتر نسبت ارتفاع درب به عرض شکاف عبور هوا (خروجی دستگاه پرده هوایی) و نیز زاویه جت خروجی بمنظور کاهش مصرف انرژی شد. در همین سال، نتنو و همکارانش [5] در تحقیقی تجربی و با بهره‌گیری از یک دماسنج مادون قرمز، به مطالعه عملکرد یک دستگاه پرده هوایی در حالت ناپایا پرداختند. ایشان در نهایت به پارامترهای ارتفاع درب، اختلاف دمای دو محیط، سرعت جت و زاویه پاشش اولیه جت برای به حداقل رساندن میزان مصرف انرژی اشاره کردند. همچنین، گونکالوز و همکارانش [6] در سال 2012 به حل عددی یک فضای سه بعدی همراه با پرده هوایی پرداختند و نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند. ایشان نهایتاً در تحقیق خود، زاویه تخلیه بهینه برای جت سیال را تعیین نمودند.

اگر چه تحقیقات زیادی در زمینه بررسی عملکرد دستگاه‌های پرده هوایی صورت پذیرفته است، ولی تا کنون مطالعه جامعی در زمینه ارزیابی تأثیر اختلاف فشار هوا میان فضای داخل و بیرون، بر الگوی ایجاد شده توسط جت خروجی از دستگاه پرده هوایی انجام نشده است. همچنین، تأثیرات متقابل سرعت و زاویه خروجی از دستگاه پرده هوایی بر آسایش حرارتی افراد و میزان انتشار آلاینده‌های موجود در یک فضا به طور همزمان مورد بررسی قرار نگرفته است. این در حالی است که در ساختمان‌های دارای سیستم تهویه وزشی، فضای داخل تحت فشار مثبت قرار می‌گیرد و همین امر موجب تغییر الگوی پاشش جت پرده هوایی و در نتیجه، متأثر شدن شرایط آسایش حرارتی افراد و نیز میزان انتشار آلاینده‌ها می‌شود. بنابراین، طراحی زاویه و سرعت مناسب برای دستگاه‌های پرده هوایی می‌بایستی به گونه‌ای صورت پذیرد که ضمن در نظر گرفتن اثرات اختلاف فشار میان محیط داخل و خارج، بتواند شرایط مطلوب آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل را با صرف کمترین میزان مصرف انرژی فراهم نماید. بر این اساس، در تحقیق حاضر اثرات زاویه پاشش دستگاه پرده هوایی بر جداسازی ایرودینامیکی حرارتی دو فضای غیر هم فشار به منظور دست یافتن به شرایط آسایش حرارتی و کیفیت هوای مطلوب مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

1- Kimmel  
2- Minivell

عامل فردی (میزان کار افراد، نرخ متابولیک<sup>2</sup> و میزان پوشش)، احساس حرارتی افراد را در قالب شاخص میانگین رأی پیش‌بینی شده (PMV<sup>3</sup>) برای ساکنان به صورت روابط (9) و (10) بیان می‌کند.

$$\begin{aligned} PMV = & (0.028 + 0.303 \exp(-0.036M))(M - W) \\ & - 0.00305(5733 - 6.99(M - W) - P_a) \\ & - 0.42((M - W) - 58.15) \\ & - 1.7 \times 10^{-5}M(5867 - P_a) \\ & - 0.0014M(34 - T_a) - f_{cl}h_t(T_{cl} - T_o) \end{aligned} \quad (9)$$

و

$$T_{cl} = T_{sk} - f_{cl}I_{cl}h_t(T_{cl} - T_o) \quad (10)$$

که  $T_{sk}$  دمای سطح پوست افراد (°C) است و به کمک رابطه (11) قابل محاسبه است [10]:

$$T_{sk} = 35.7 - 0.0275(M - W) \quad (11)$$

همچنین  $M$  نرخ متابولیک افراد ( $W/m^2$ )،  $W$  نرخ کار خارجی افراد ( $W/m^2$ )،  $P_a$  فشار بخار هوا (Pa)،  $T_a$  دمای هوا (°C)،  $T_{cl}$  دمای سطح لباس (°C)،  $T_o$  دمای عملکردی (°C)،  $I_{cl}$  مقاومت حرارتی لباس ( $m^2K/W$ )،  $f_{cl}$  فاکتور سطح لباس (بی‌بعد) و  $h_t$  ضریب انتقال حرارت کلی روی سطح لباس ( $W/m^2K$ ) می‌باشد. جزئیات بیشتر در مورد نحوه تعیین پارامترهای فوق، در استاندارد ایزو 7730 [9] و استاندارد 14384 سازمان ملی استاندارد ایران [11] ارائه شده است.

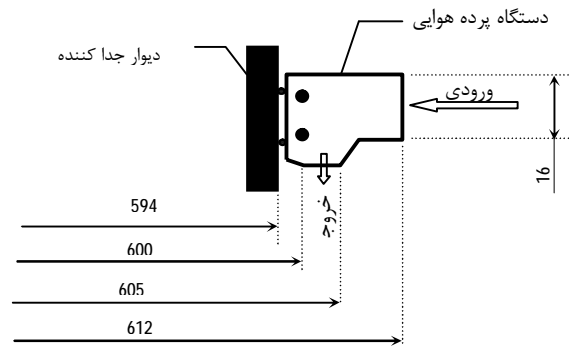
شایان ذکر است که شاخص میانگین رأی پیش‌بینی شده (PMV)، بیانگر احساس حرارتی افراد نسبت به محیط است. بر این اساس، این شاخص طبق مقیاس پیشنهاد شده توسط اشرفی [8] اعدادی در بازه -3 تا +3 را شامل می‌شود و هر عدد صحیح در این بازه بیانگر یک احساس حرارتی تعریف شده است. به طوری که +3 بیان‌کننده احساس حرارتی داغ، +2 گرم، +1 کمی گرم، 0 خنثی، -1 کمی خنک، -2 خنک و -3 سرد می‌باشد. همچنین، استاندارد ایزو 7730 [9]، محدوده  $-0/5 < PMV < 0/5$  را بعنوان محدوده قابل قبول برای آسایش حرارتی معرفی می‌کند.

در این تحقیق سعی شده است تا با مدل‌سازی دو بعدی و حل معادلات حاکم در یک فضای نمونه دارای دستگاه پرده هوایی، اثرات زاویه پاشش جت بر توزیع سرعت، دما، الگوی انتشار آلاینده‌ها و نیز شرایط آسایش حرارتی افراد مورد تحلیل و ارزیابی قرار گیرد.

#### 4- روش حل و اعتبارسنجی

##### 4-1- روش حل

در این تحقیق از رویکرد دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی فضای نمونه استفاده شده است. برای این منظور، از نسخه 2.2.2 حلگر اپن فوم<sup>4</sup> برای انجام محاسبات و حل معادلات حاکم بهره گرفته شده است. حلگر اپن فوم یک جعبه ابزار دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد که قادر به تحلیل عددی طیف وسیعی از مسائل مختلف است. در این تحقیق، از بسته حل «بویانت بوزینسک سیمپل فوم<sup>5</sup>» در حلگر اپن فوم استفاده شده است. این بسته، از روش عددی حجم محدود برای حل دستگاه‌های معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بهره برده و معادلات پیوستگی، بقای تکانه خطی، انرژی و معادلات مربوط به جریان‌های آشفته را به صورت جفت شده حل می‌کند. از آنجایی که در این تحقیق، می‌خواهیم تا کیفیت هوای داخل و میزان انتشار آلاینده‌ها را نیز مورد بررسی قرار دهیم، لذا می‌بایستی معادلات غلظت گونه نیز به حلگر فوق افزوده شود.



شکل 3 جانمایی دستگاه پرده هوایی در فضای نمونه

#### 3- معادلات حاکم

در این تحقیق، معادلات حاکم شامل دو بخش معادلات مربوط به جریان و انتقال حرارت و معادلات مربوط به احساس حرارتی افراد می‌باشد. معادلات حاکم بر جریان پایا و غیر قابل تراکم با فرض ثابت بودن خواص سیال شامل معادلات (1) تا (3) است:

معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

معادله بقای تکانه خطی

$$\rho (\vec{v} \cdot \nabla \vec{v}) = -\nabla P + \mu_{eff} \nabla^2 \vec{v} + \vec{S} \quad (2)$$

معادله انرژی

$$\vec{v} \cdot \nabla T = \alpha_{eff} \nabla^2 T + S_T \quad (3)$$

که

$$\vec{v} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \quad (4)$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\hat{i} + \frac{\partial}{\partial y}\hat{j} + \frac{\partial}{\partial z}\hat{k} \quad (5)$$

همچنین، گیبانگر نیروهای حجمی (شناوری) وارد بر سیال است و به کمک تقریب بوزینسک محاسبه می‌شود (رابطه (6)).

$$\vec{S} = \rho g [1 - \beta(T - T_{ref})] \quad (6)$$

که  $\beta$  ضریب انبساط حجمی ( $K^{-1}$ ) و  $g$  بردار شتاب گرانش زمین ( $m.s^{-2}$ ) است. همچنین،  $\mu_{eff}$  ضریب لزجت مؤثر سیال است که شامل لزجت سیال و لزجت اغتشاشی سیال می‌باشد که بصورت رابطه (7) می‌باشد.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (7)$$

که لزجت اغتشاشی سیال به کمک مدل دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  استاندارد محاسبه می‌گردد. همچنین معادله غلظت گونه برای تعیین نحوه توزیع آلاینده‌ها در فضای نمونه بصورت (8) می‌باشد.

$$\rho (\vec{v} \cdot \nabla C) = D \nabla^2 C \quad (8)$$

که  $C$  جزء جرمی گونه و  $D$  ضریب نفوذ گونه ( $m^2.s^{-1}$ ) است.

بخش دوم معادلات حاکم، شامل معادلات مربوط به بدن و شرایط آسایش حرارتی افراد می‌باشد. در این تحقیق، به منظور ارزیابی احساس حرارتی افراد از مدل آسایش حرارتی فنگر [7] استفاده می‌شود. شایان ذکر است که مدل آسایش حرارتی فنگر، یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های تحلیلی آسایش حرارتی به حساب می‌آید و از آن در استانداردهای اشرفی 55 [8] و ایزو 7730 [9] به عنوان مدل استاندارد آسایش حرارتی یاد شده است. مدل فنگر با نوشتن معادلات انرژی برای بدن و با در نظر گرفتن هفت عامل سراسری مؤثر بر شرایط حرارتی بدن شامل چهار عامل محیطی (دمای هوا، دمای متوسط تابشی<sup>1</sup>، رطوبت نسبی و سرعت جریان هوا) و سه

2- Metabolic Rate

3- Predicted Mean Vote

4- Open foam

5- buoyant Boussinesq Simple Foam

1- Mean Radiant Temperature

آلاینده‌ها در مکان‌های مختلف (فواصل 1، 3، 5، 7، 9، 11 متری از دیوار سمت چپ) استخراج گردید. به عنوان نمونه، شکل 4 توزیع دما را در فاصله 3 متری از دیوار سمت چپ به ازای شبکه‌های محاسباتی مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، به ازای تغییر تعداد گره‌های محاسباتی از 19913 به 41444 تغییر چندانی در جواب‌ها حاصل نشده است. بنابراین، شبکه‌ای با 19913 گره به عنوان شبکه مناسب برای ادامه محاسبات انتخاب می‌شود. همچنین به منظور دستیابی به دقت مناسب و صرفه‌جویی در زمان حل، تراکم شبکه محاسباتی در نواحی نزدیک به جت هوا، درپچه‌ها و نیز دیوارها که در آن‌ها گرادیان کمیت‌ها بیشتر است، افزایش یافته است.

### 3-3- اعتبارسنجی حل

در این تحقیق برای اعتبارسنجی نتایج حل، از مقایسه نتایج حلگر عددی این فوم با نتایج کاستا و همکارانش [4] استفاده شده است. در شکل‌های 5 و 6 مقایسه‌ای میان نتایج تابع جریان بدون بعد حلگر عددی این فوم و نتایج کاستا و همکارانش [4] نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج تحقیق حاضر همخوانی نسبتاً قابل قبولی را با نتایج کاستا و همکارانش [4] نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، به ازای سرعت 3 متر بر ثانیه، جت هوای خروجی از دستگاه نمی‌تواند تمام فضای اتاق را متأثر نماید و در نتیجه، دو گردابه مجزا در فضای داخلی اتاق تشکیل می‌شود. در واقع، گردابه تشکیل شده در نزدیکی دیوار سرد، بیشتر از اینکه از جت هوا تأثیر پذیرفته باشد، متأثر از جریان ناشی از جابه‌جایی طبیعی در نزدیک دیوار است. این در حالی است که با افزایش سرعت جت هوا به 6/8 متر بر ثانیه، کل فضای اتاق تحت تأثیر جریان ورشی جت قرار می‌گیرد و در فضای داخلی تنها یک گردابه تشکیل می‌شود.

### 5- نتایج

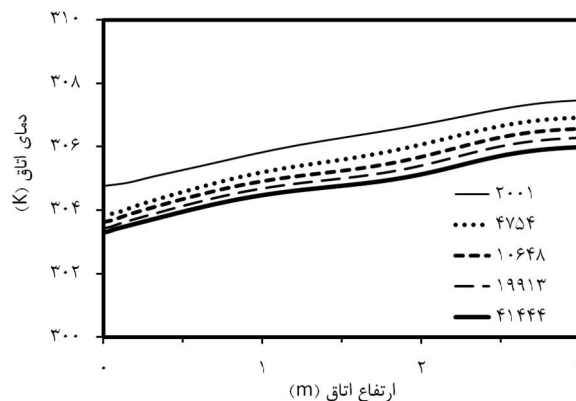
همانطور که پیشتر اشاره شد، در تحقیق حاضر، میزان تأثیرگذاری زاویه پاشش جت دستگاه پرده هوایی بر عواملی از جمله توزیع سرعت، توزیع دما، نحوه انتشار آلاینده‌ها و آسایش حرارتی بطور همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه، نتایج حاصل این بررسی‌ها به تفکیک ارائه می‌شود.

#### 5-1- ارزیابی سرعت

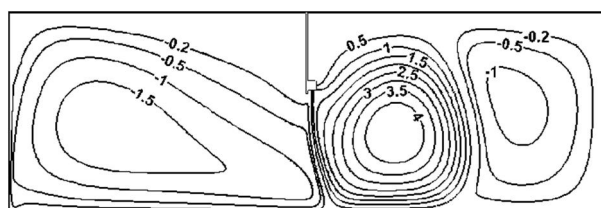
در شکل 7، نمودارهای توزیع سرعت در فضای نمونه به ازای زوایای پاشش صفر، 10 و 10- درجه نشان داده شده است. همچنین، شکل 8 توزیع سرعت در ارتفاع 1/1 متری از کف را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که در استانداردهای آسایش حرارتی، ارتفاع 1/1 متری از کف اتاق بعنوان یک ارتفاع استاندارد برای بررسی شرایط حرارتی محیط پیشنهاد شده است. همانطور که در شکل 8 مشاهده می‌شود، با تغییر زاویه از 20 به 20- درجه، مقادیر اندازه سرعت در فضای نمونه کاهش می‌یابد؛ به طوری که مقادیر سرعت در زاویه 20- درجه کمترین میزان را دارد.

#### 5-2- ارزیابی دما

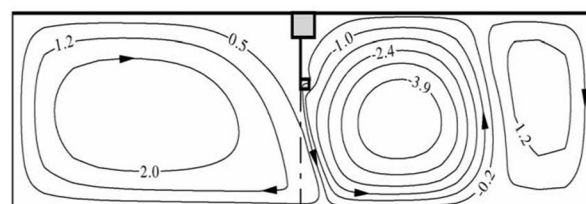
شکل 9 نتایج توزیع دمای هوا در فضای نمونه به ازای زوایای پاشش مختلف را نشان می‌دهد. لازم به یادآوری است که در شکل، نیمه سمت راست فضای نمونه نشان دهنده محیط داخلی (تهویه شده) و نیمه سمت چپ نشان دهنده محیط خارجی (تهویه نشده) است. بر این اساس، در اثر وجود سیستم تهویه فشار مثبت در محیط داخلی، اندازه فشار در ورودی مجرای 1 نسبت به ورودی مجرای 2، به اندازه 10 پاسکال بیشتر است.



شکل 4 بررسی استقلال شبکه در فضای حل

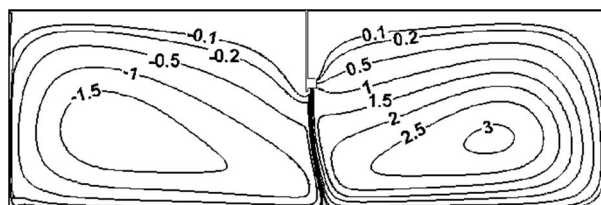


(الف) تحقیق حاضر

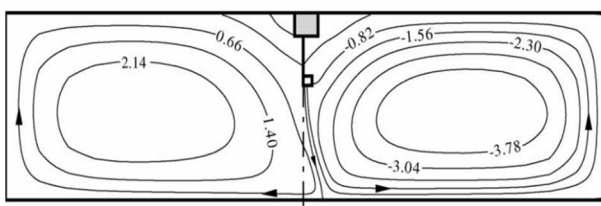


(ب) تحقیق کاستا و همکاران

شکل 5 تابع جریان در فضای نمونه با سرعت جت 3 متر بر ثانیه و زاویه پاشش 0 درجه نسبت به خط عمود؛ (الف) تحقیق حاضر، (ب) تحقیق کاستا و همکارانش



(الف) تحقیق حاضر



(ب) تحقیق کاستا و همکارانش

شکل 6 تابع جریان در فضای نمونه با سرعت جت 6/8 متر بر ثانیه و زاویه پاشش صفر درجه نسبت به خط عمود؛ (الف) تحقیق حاضر، (ب) تحقیق کاستا و همکارانش

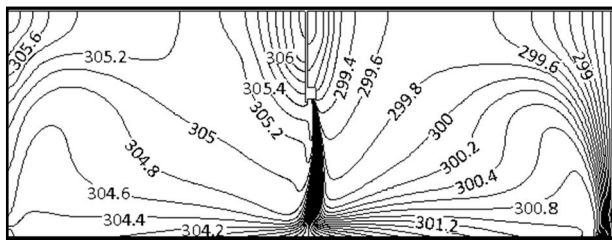
### 2-4- شبکه‌بندی و بررسی استقلال حل از شبکه

به منظور انتخاب شبکه مناسب برای شبیه‌سازی عددی مسئله، لازم است که ابتدا استقلال حل از شبکه مورد بررسی قرار گیرد. از این رو، مسئله با شبکه‌هایی با 2001، 4754، 10648، 19913 و 41444 گره محاسباتی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. برای این منظور، توزیع پارامترهایی از جمله سرعت، دما و غلظت

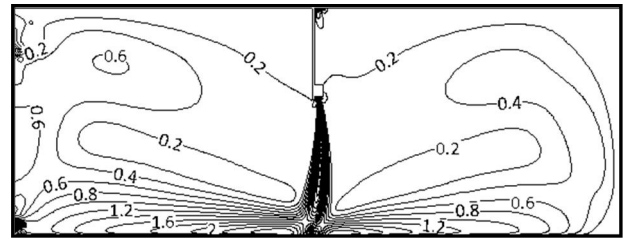
این اساس، هر چه پارامتر بی بعد  $\theta$  بزرگتر باشد، میزان کارایی دستگاه پرده هوایی در جداسازی حرارتی دو محیط بیشتر خواهد بود. در شکل 11 متوسط دمای اتاق داخل در ارتفاع 1/1 متری را بر حسب زاویه پاشش جت هوا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید با کاهش زاویه از 20 درجه به سمت زوایای منفی، دمای بدون بعد افزایش می‌یابد؛ بطوری که در زاویه -10 درجه، پارامتر دمای بدون بعد در بالاترین مقدار قرار می‌گیرد. بر این اساس، عملکرد دستگاه پرده هوایی در جداسازی حرارتی دو محیط، به ازای زوایای پاشش منفی (رو به خارج) در مقایسه با زوایای مثبت به مراتب بهتر است.

### 3-5- ارزیابی غلظت آلاینده‌ها

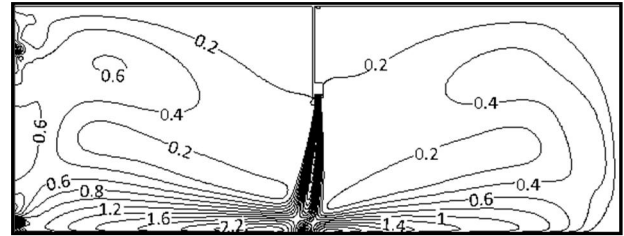
شکل 12 نحوه توزیع غلظت آلاینده‌ها را در طول اتاق نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، اختلاف غلظت آلاینده‌ها در دو قسمت فضای نمونه به ازای زوایای مثبت، نسبت به زوایای منفی کمتر می‌باشد.



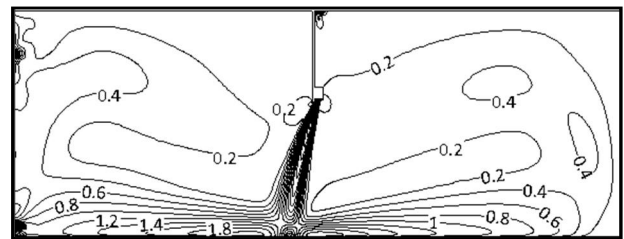
(الف)



(ب)

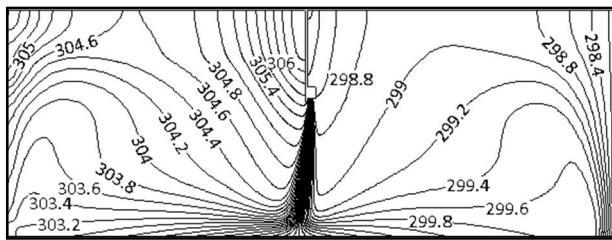


(پ)

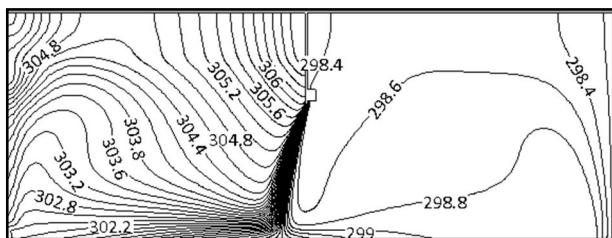


(پ)

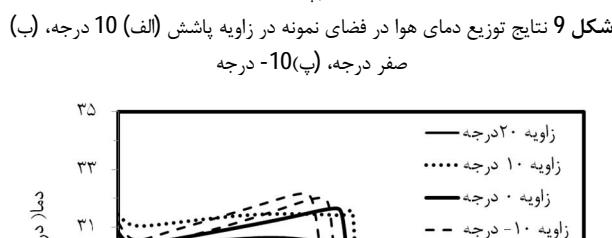
شکل 7 نتایج توزیع سرعت هوا در فضای نمونه در زاویه پاشش (الف) 10 درجه، (ب) صفر درجه، (پ) -10 درجه، (پ) -20 درجه



(الف)



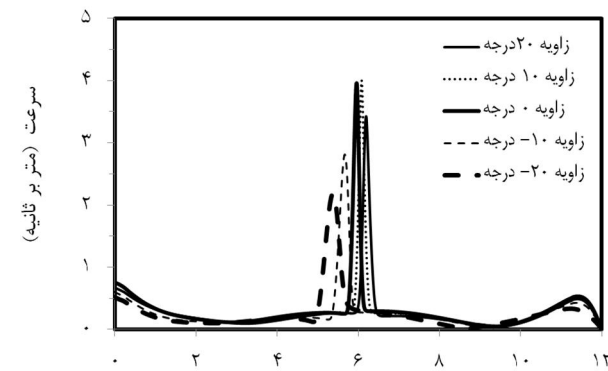
(ب)



(پ)



(پ)



طول اتاق (م)

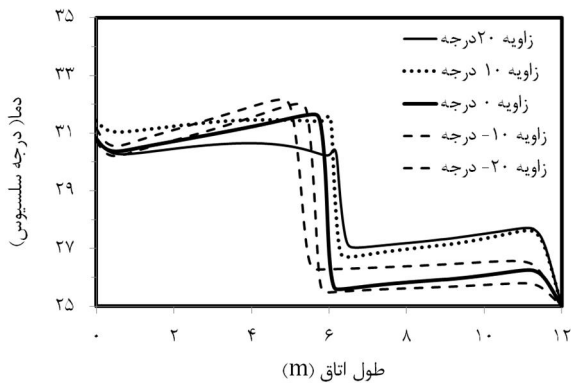
شکل 8 اثرات تغییر زاویه پاشش جت دستگاه پرده هوایی بر توزیع سرعت

همین تفاوت در اندازه فشار باعث می‌شود که حتی در زاویه پاشش صفر نیز، جت خروجی از دستگاه پرده هوایی تا حدی به سمت محیط خارجی منحرف شود.

در شکل 10 اثرات تغییر زاویه بر توزیع دمای اتاق در ارتفاع 1/1 متری از کف اتاق نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که به ازای زوایای منفی (زوایای رو به خارج)، میزان تغییرات دما در فضای داخلی کاهش می‌یابد. بمنظور ارزیابی میزان کارایی حرارتی دستگاه پرده هوایی، پارامتر دمای بی‌بعد مطابق رابطه (12) تعریف می‌شود:

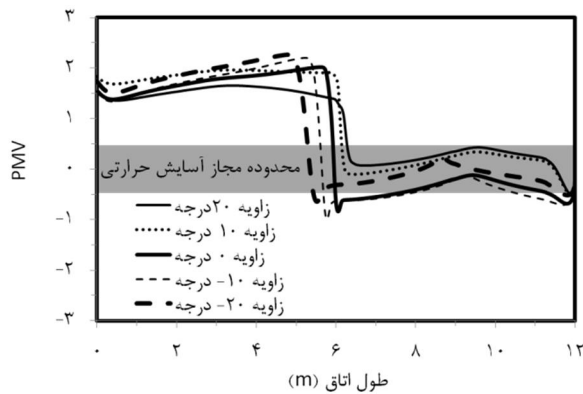
$$\theta = \frac{\bar{T}_{\text{outdoor}} - \bar{T}_{\text{indoor}}}{\Delta T_{\text{max}}} \quad (12)$$

که  $\theta$  دمای بی‌بعد،  $\bar{T}_{\text{outdoor}}$  دمای متوسط محیط خارج (نیمه سمت چپ فضای نمونه)،  $\bar{T}_{\text{indoor}}$  دمای متوسط محیط داخل (نیمه سمت راست فضای نمونه) و  $\Delta T_{\text{max}}$  حداکثر اختلاف دمای میان محیط خارج و داخل است. بر



طول اتاق (م)

شکل 10 توزیع دما در فضای نمونه بر اثر تغییرات زاویه



شکل 14 توزیع شاخص احساس حرارتی افراد (PMV) در فضای نمونه به ازای زوایای مختلف برای پاشش جت پرده هوایی

#### 4-5- ارزیابی شرایط آسایش حرارتی افراد

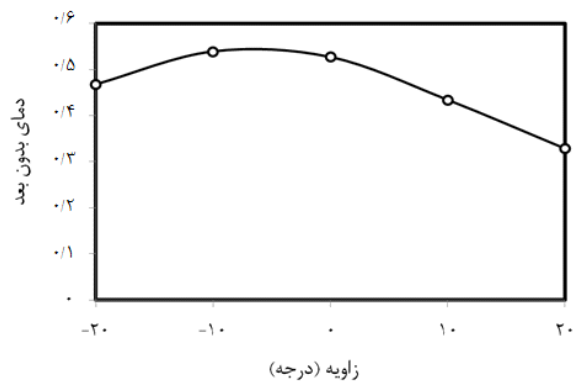
در این تحقیق، به منظور ارزیابی احساس حرارتی افراد در فضای نمونه، شاخص میانگین آرای افراد (PMV) به ازای زوایای مختلف برای پاشش جت پرده هوایی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، به منظور مشخص شدن محدوده مجاز آسایش حرارتی در نمودارها، از نوار خاکستری رنگ استفاده شده است. همانطور که در شکل 14 ملاحظه می‌شود، شاخص احساس حرارتی افراد در فضای داخل (نیمه سمت راست فضای نمونه) به ازای همه زوایای پاشش در محدوده مجاز آسایش حرارتی واقع شده است. با این وجود، زوایای پاشش 10- و صفر درجه نسبت به سایر زوایای پاشش، محیط داخل را در شرایط خنک‌تری نگه داشته‌اند و همین امر از عملکرد مناسب دستگاه پرده هوایی تحت این شرایط حکایت دارد.

#### 6- نتیجه گیری

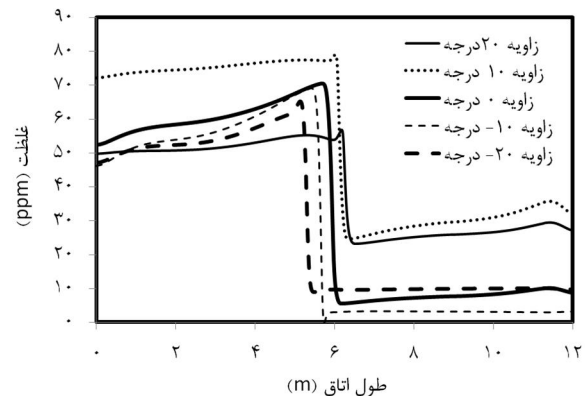
در تحقیق حاضر، تأثیر تغییر زاویه جت هوای خروجی از دهانه دستگاه پرده هوایی، بر جداسازی آیرودینامیکی و حرارتی دو محیط مجاور غیرهم‌فشار جهت جلوگیری از انتشار آلاینده‌ها، کاهش مصرف انرژی و تأمین شرایط آسایش حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که زاویه پاشش جت، تأثیر قابل توجهی بر توزیع پارامترهایی از جمله دما، غلظت آلاینده‌ها و نیز شاخص احساس حرارتی افراد دارد. به طوری که با تغییر زاویه پاشش جت از +10 درجه (به سمت داخل) به -10 درجه (به سمت خارج)، متوسط اختلاف دمای محیط داخل تا 2/5 درجه سلسیوس کاهش می‌یابد. همچنین، همین میزان تغییر در زاویه پاشش جت، باعث می‌شود تا متوسط غلظت آلاینده‌های محیط داخل با کاهشی قابل توجه، از 25ppm به 5ppm برسد. از طرفی نتایج نشان داد که برای افزایش کارایی دستگاه پرده هوایی در زمینه جداسازی حرارتی و آیرودینامیکی دو فضای مجاور، بهتر است که زاویه پاشش جت هوا به میزان اندکی (حدود 10 درجه) به سمت محیط خارج انحراف داشته باشد. این امر باعث خواهد شد تا فضای داخل، تأثیر کمتری از محیط بیرون بپذیرد.

#### 7- فهرست علائم

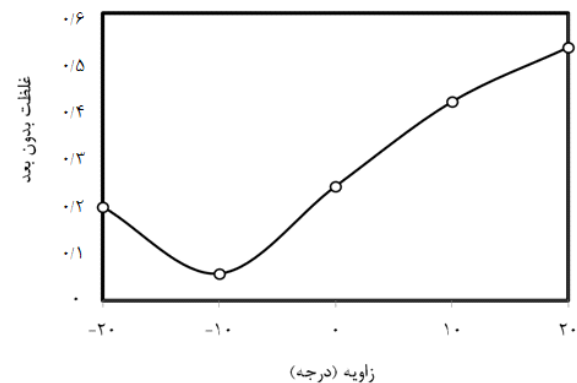
C	غلظت آلاینده (ppm)
$\bar{C}$	متوسط غلظت آلاینده (ppm)
D	ضریب نفوذ آلاینده ( $m^2 \cdot s^{-1}$ )
$f_{cl}$	فاکتور لباس، (بدون بعد)
$h_c$	ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )



شکل 11 اثرات تغییر زاویه بر متوسط دمای بدون پرده در ارتفاع 1/1 متر



شکل 12 اثرات تغییر زاویه بر الگوی تغییرات غلظت بدون پرده



شکل 13 متوسط غلظت بدون پرده در ارتفاع 1/1 متر

این اختلاف در زاویه 20 درجه کمترین مقدار را در بین دیگر زوایا دارد. همچنین، به منظور ارزیابی کارایی دستگاه پرده هوایی در جداسازی دو محیط از نظر انتشار آلاینده‌ها، پارامتر بی‌بعد  $\eta$  بصورت (13) تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{\bar{C}_{indoor}}{\bar{C}_{outdoor}} \quad (13)$$

که  $\bar{C}_{indoor}$  متوسط غلظت آلاینده‌های موجود در داخل ساختمان (نیمه سمت راست فضای نمونه) و  $\bar{C}_{outdoor}$  متوسط غلظت آلاینده‌ها در محیط خارج (نیمه سمت چپ فضای نمونه) می‌باشد. بدیهی است که هر چه پارامتر  $\eta$  مقدار کمتری داشته باشد، کارایی دستگاه پرده هوایی در جداسازی دو محیط از نظر انتشار آلاینده‌ها بیشتر خواهد بود. شکل 13 مقدار پارامتر  $\eta$  را بر حسب زاویه پاشش جت نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر زاویه پاشش از زوایای داخلی به سمت زوایای خارجی، پارامتر  $\eta$  کاهش یافته و در نتیجه کارایی دستگاه پرده هوایی بهبود می‌یابد و به ازای زاویه 10- درجه، بیشترین کارایی مشاهده می‌شود.

## 8- مراجع

- [1] Miniveil-Inc. *A Brief History of the Air Curtain* Accessed 12 May 2014; <http://www.miniveil.com>.
- [2] K. Sirén, Technical dimensioning of a vertically upwards blowing air curtain—part I, *Energy and Buildings*, Vol. 35, No. 7, pp. 681-695, 2003.
- [3] K. Sirén, Technical dimensioning of a vertically upwards-blowing air curtain—part II, *Energy and Buildings*, Vol. 35, No. 7, pp. 697-705, 2003.
- [4] 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.
- [5] L. P. C. Neto, M. C. G. Silva, J. J. Costa, On the use of infrared thermography in studies with air curtain devices, *Energy and Buildings*, Vol. 38, No. 10, pp. 1194-1199, 2006.
- [6] 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, No. 0, pp. 153-160, 2012.
- [7] P. O. Fanger, *Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering*, New York: McGraw-Hill, 1970.
- [8] ANSI/ASHRAE, Standard 55-2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2010.
- [9] ISO7730, Moderate thermal environments—Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort, International Standards Organization, 1994.
- [10] ASHRAE, Handbook of fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2001.
- [11] ISIRI-14384, Determination of thermal comfort PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, Institute of Standards and Industrial Research of Iran, 2012. (In Persian)

$I_{cl}$	مقاومت حرارتی لباس ( $m^2KW^{-1}$ )
$M$	نرخ متابولیک یا تولید حرارت در بدن ( $W.m^{-2}$ )
$p$	فشار (kPa)
PMV	شاخص میانگین آرای افراد، (بی بعد)
$s$	جمله چشمه
$T$	دمای سطح لباس ( $^{\circ}C$ )
$T_o$	دمای عملکردی ( $^{\circ}C$ )
$V$	سرعت ( $ms^{-1}$ )
$W$	نرخ کار خارجی افراد ( $W.m^{-2}$ )
$x$	جهت های مختصاتی
$y$	جهت های مختصاتی
$z$	جهت های مختصاتی

## علائم یونانی

$\alpha$	ضریب نفوذ ( $kg.m^{-3}$ )
$\beta$	ضریب انبساط حجمی ( $K^{-1}$ )
$\gamma$	زاویه تخلیه جت (درجه)
$\eta$	پارامتر غلظت بدون بعد
$\theta$	پارامتر دمای بدون بعد
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $kg.m^{-3}$ )

## زیر نویس ها

$a$	مربوط به هوا
$cl$	مربوط به لباس
$eff$	مؤثر
indoor	محیط داخل
max	مقدار ماکزیمم
outdoor	محیط خارج
sk	سطح پوست
$t$	مربوط به اغتشاش