

## بررسی نقش چیدمان دریچه های ورودی و خروجی و موقعیت منبع آلاینده در توزیع غلظت در اتاق های تمیز

غلامرضا مولایی منش<sup>۱</sup>، بهرنگ سجادی<sup>۲</sup>، محمد حسن سعیدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک؛ molaeimanesh@mech.sharif.edu

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک؛ sajadi@mech.sharif.edu

<sup>۳</sup> استاد، دانشگاه صنعتی شریف دانشکده مهندسی مکانیک؛ saman@sharif.edu

### چکیده

در این مقاله جریان هوای حاوی ذرات در اتاق‌های تمیز به صورت عددی، با استفاده از مدل آشفتگی k-ε استاندارد و رویکرد اویلری-اویلری مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی تأثیر دو متغیر چیدمان دریچه های ورودی و خروجی و موقعیت منبع آلاینده بر کارایی سیستم تهویه اتاق‌های تمیز به طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از نتایج بدست آمده معیارهایی جهت بهبود عملکرد اتاق های تمیز ارائه شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده تأثیر قابل توجه موقعیت منبع آلاینده بر نحوه انتخاب چیدمان دریچه‌های ورودی و خروجی در طراحی سیستم تهویه اتاق‌های تمیز می‌باشد.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی عددی، مدل آشفتگی k-ε استاندارد، رویکرد اویلری-اویلری، موقعیت منبع آلاینده، اتاق تمیز

### مقدمه

با گسترش روز افزون استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در تحلیل جریان حاوی ذرات، کاربرد این گونه روش‌ها جهت بهینه‌سازی عملکرد اتاق‌های تمیز افزایش چشم‌گیری یافته است. با این وجود، اغلب تلاش‌ها در این زمینه معطوف به نمونه‌های فاقد مانع داخلی [۱] بوده است و هندسه‌های پیچیده‌تر کمتر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. به علاوه اغلب این تحقیقات فاقد رویکرد لازم جهت طراحی مهندسی هستند [۲]. به طور کلی روش‌های به کار رفته در تحلیل جریان درون اتاق‌های تمیز را از دو جهت می‌توان ارزیابی نمود:

۱. روش مدل‌سازی آشفتگی: عمده روش‌های CFD که جهت مدل‌سازی جریان حاوی ذرات در اتاق‌های تمیز به کار گرفته شده‌اند، مبتنی بر استفاده از مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای می‌باشند [۳-۵]. در بین مدل‌های آشفتگی فوق، مدل k-ε استاندارد به دلیل نتایج نسبتاً مناسب، پایداری و سهولت اعمال، بیشترین کاربرد را داشته و گرچه مدل‌هایی نظیر k-ε RNG، k-ω و ... نیز به کار رفته‌اند، ولی نتایج موجود حاکی از آن است که مدل آشفتگی k-ε استاندارد دارای دقت کافی جهت مدل‌سازی جریان درون اتاق تمیز می‌باشد [۶].

۲. روش مدل‌سازی توزیع غلظت: عمده روش‌های مدل‌سازی توزیع غلظت به کار رفته در مدل‌سازی جریان در اتاق‌های تمیز اویلری-اویلری بوده [۴،۷] و روش‌های اویلری-لاگرانژی کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۸]. اگر چه روش‌های اویلری-لاگرانژی از دقت بالاتری برخوردارند، ولی نتایج موجود حاکی از آن است که روش‌های اویلری-اویلری از دقت کافی جهت مدل‌سازی جریان درون اتاق تمیز برخوردارند [۹]. لذا در این بررسی با توجه به حجم محاسباتی کمتر روش اویلری-اویلری، از این روش استفاده شده است.

یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار بر عملکرد اتاق‌های تمیز، چیدمان دریچه‌های ورودی و خروجی نسبت به یکدیگر می‌باشد. در عمده تلاش‌هایی که جهت بررسی این عامل صورت گرفته، تنها یک دریچه ورودی و یک دریچه خروجی برای هندسه مورد بررسی در نظر گرفته شده است. از آن جمله، چانگ و همکاران [۱۰] با بررسی دو حالت (الف) دریچه ورودی در سقف و دریچه خروجی در دیوار (آرایش متعامد) و (ب) هر دو دریچه در سقف یا در دیوار (آرایش موازی) به این نتیجه رسیدند که حالت اول بهتر می‌باشد.

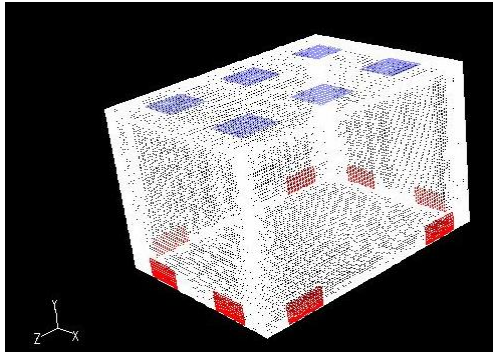
یکی دیگر از عوامل بسیار تأثیر گذار بر عملکرد اتاق های تمیز، موقعیت منبع آلاینده می‌باشد [۱۱،۱۲]. با توجه به اینکه در تلاش‌هایی که جهت بررسی اثر موقعیت منبع آلاینده صورت گرفته است، تأثیر موقعیت دریچه‌های ورودی و خروجی نسبت به یکدیگر بررسی نگردیده، در این مقاله با ارزیابی سه چیدمان دریچه های ورودی و خروجی که امکان قرار گرفتن منبع آلاینده در سه موقعیت هر یک از چیدمان ها وجود دارد، به بررسی هم‌زمان این دو عامل پرداخته شده است. با توجه به این که امروزه در اغلب اتاق‌های تمیز دریچه‌های ورودی در سقف و خروجی در دیواره تعبیه می‌شود، در این بررسی از ۲ دریچه ورودی در سقف و ۴ دریچه خروجی در دیواره استفاده شده است.

### معادلات حاکم

معادلات پیوستگی و مومنوم متوسط‌گیری شده زمانی در فرم اندیسی عبارتند از [۱۳]:  
(الف) معادله پیوستگی:

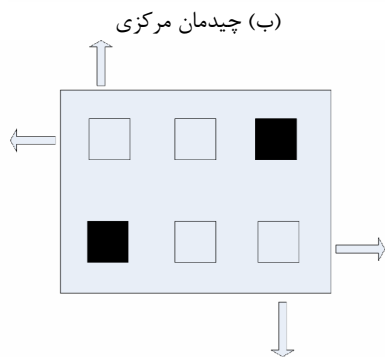
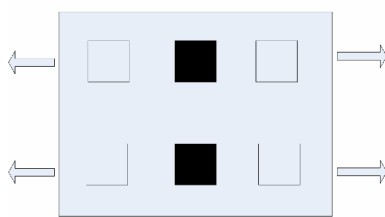
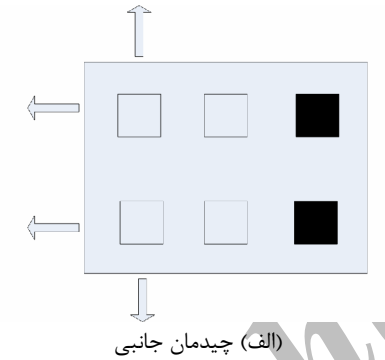
$$\frac{\partial V_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

استقلال حل از اندازه شبکه، شبکه‌ای با ابعاد متوسط ۰/۴ متر به عنوان بهترین اندازه تعیین گردید.



شکل ۱: هندسه مورد مطالعه

در هر یک از چیدمان‌های درپچه‌های ورودی و خروجی، مطابق شکل ۲، دو موقعیت برای ورودی و چهار موقعیت برای خروجی انتخاب شده است. همچنین مطابق شکل ۳، سه موقعیت راست، وسط و چپ در ارتفاع ۱/۶ متری از کف در صفحه تقارن طولی اتاق برای منبع آلاینده در نظر گرفته شده است به دلیل تقارن چیدمان‌های قطری و مرکزی، موقعیت راست و چپ برای آنها یکسان است. بنابراین در مجموع ۷ مدل مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۲: انواع چیدمان درپچه‌های ورودی و خروجی

که در این معادله  $V_i$ ها مؤلفه‌های سرعت میانگین می‌باشند.  
(ب) معادله مومنوم:

$$\frac{\partial(\rho V_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_i V_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

که در آن  $p$  فشار و  $\mu_{eff}$  لزجت مؤثر می‌باشد که برابر است با:

$$\mu_{eff} = \mu_t + \mu \quad (3)$$

که در آن  $\mu_t$  لزجت آشفتگی بوده و با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  استاندارد می‌توان نوشت:

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (4)$$

و  $k$  و  $\varepsilon$  به ترتیب انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال انرژی است.  
(ج) معادلات آشفتگی:

جهت محاسبه  $k$  و  $\varepsilon$ ، حل معادلات مربوطه به آنها ضروری است. معادلات فوق عبارت است از:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_1 P - c_2 \rho \varepsilon) \quad (6)$$

که  $P$  نرخ تولید انرژی جنبشی آشفتگی بوده و برابر است با:

$$P = -\rho u_i u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

که  $C_\mu$ ،  $c_1$ ،  $c_2$ ،  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  ثوابت تجربی بوده و به ترتیب عبارتند از ۰/۰۹، ۱/۴۴، ۱/۹۲، ۱/۰ و ۱/۳

از آنجا که مدل فوق تنها در اعداد رینولدز بالا معتبر است، در نزدیک جدار از توابع دیواره استفاده می‌گردد [۱۴].

(د) معادله غلظت:

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_j C)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_{C,eff} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + S_c \quad (8)$$

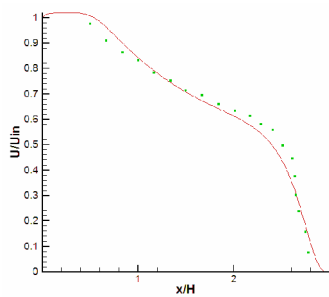
که  $S_c$  قدرت منبع و  $\Gamma_{C,eff}$  ضریب پخش مؤثر آشفتگی می‌باشد و برابر است با:

$$\Gamma_{C,eff} = \frac{\mu_{eff}}{Sc_{eff}} \quad (9)$$

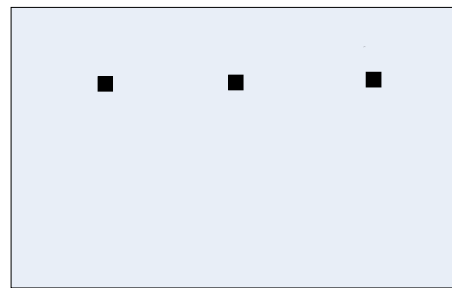
$Sc_{eff}$  عدد اشمیت مؤثر بوده و برابر ۱/۰ است.

### مدل‌های مورد بررسی

مطابق شکل ۱، هندسه‌ای که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته، اتاقی با ابعاد ۴×۳×۲ متر است که دارای ۶ موقعیت ۰/۶×۰/۶ در سقف برای درپچه‌های ورودی و ۸ موقعیت ۰/۳×۰/۶ در پایین دیوارهای جانبی برای درپچه‌های خروجی است. پس از ارزیابی



شکل ۳: سه موقعیت منبع آلاینده (راست، وسط و چپ)

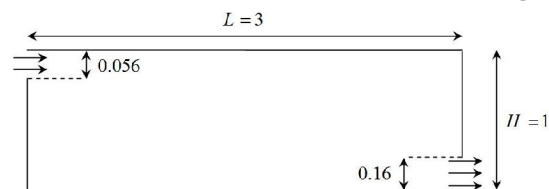


شکل ۳: سه موقعیت منبع آلاینده (راست، وسط و چپ)

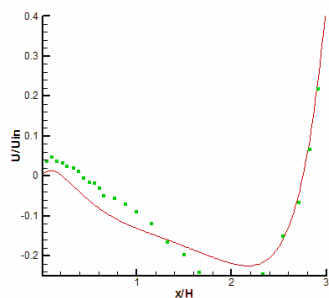
### روش عددی

در این بررسی از نرم افزار 6.3 Fluent [۱۵] جهت مدلسازی جریان استفاده گردیده است. الگوریتم مورد استفاده SIMPLE، روش ذخیره داده‌ها به صورت شبکه متمرکز و شبکه مورد استفاده از نوع ساختار یافته مکعبی می‌باشد. همچنین با استفاده از UDF محل و قدرت منبع آلاینده قابل تغییر می‌باشد. جهت بررسی صحت روش از داده‌های تجربی آقای نیلسون و همکاران [۱۶] استفاده شده است. هندسه مدل مورد بررسی در شکل ۴ نمایش داده شده که در آن دریچه ورودی برابر ۵۰۰۰ می‌باشد. نتایج حاصل از حل عددی با داده‌های تجربی در دو مقطع افقی  $y/H = 0.972$  و  $y/H = 0.28$  و مقایسه و در شکل ۵ ارائه گردیده است.

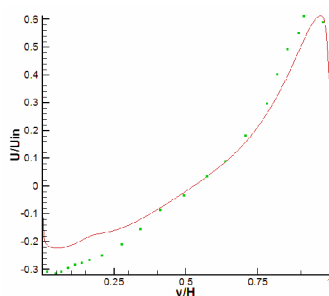
جهت حل عددی، ابتدا میدان جریان با اعمال شرایط مرزی سرعت ثابت ۵ m/s در ورودی و جریان توسعه یافته در خروجی به صورت پایا حل شده و سپس معادله غلظت با شرط اولیه  $C = 1$  در تمامی نقاط اتاق، شرط مرزی  $C_{in} = 0$  در ورودی و  $\partial C_{out} / \partial x_i = 0$  در خروجی‌ها به صورت گذرا حل گردیده است.



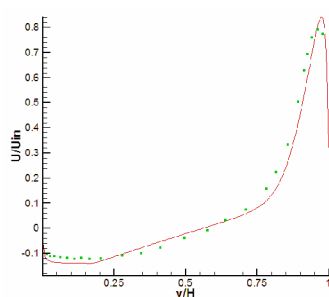
شکل ۴: هندسه مدل مورد بررسی توسط نیلسون و همکاران [۱۶]



شکل ۵: مقایسه نتایج مدلسازی عددی با داده‌های تجربی نیلسون و همکاران



شکل ۶: مقادیر η برحسب τ برای حالت فاقد منبع آلاینده



شکل ۶: مقادیر η برحسب τ برای حالت فاقد منبع آلاینده

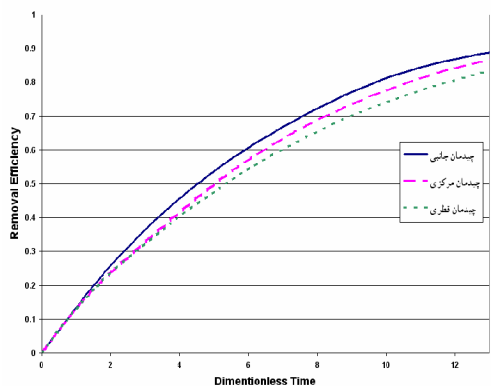
شکل ۵: مقایسه نتایج مدلسازی عددی با داده‌های تجربی نیلسون و همکاران

### نتایج

جهت ارزیابی کمی عملکرد مدل‌های مختلف از بازده حذف ذرات [۱۷] استفاده شده است. طبق تعریف، بازده حذف ذرات عبارتست از:

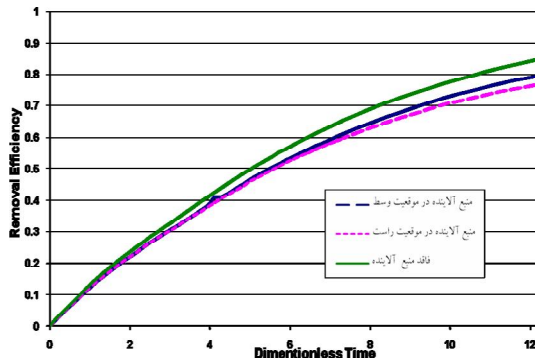
$$\eta = \frac{C_0 - C_m}{C_0 - C_{in}} \quad (10)$$

که در آن  $C_0$  غلظت اولیه،  $C_m$  میانگین غلظت و  $C_{in}$  غلظت هوای ورودی می‌باشد. جهت بررسی اثر موقعیت نسبی دریچه‌های ورودی و خروجی به تنهایی، مقادیر  $\eta$  برحسب  $\tau$  در شکل ۶ برای حالت فاقد منبع آلاینده نشان داده شده است.

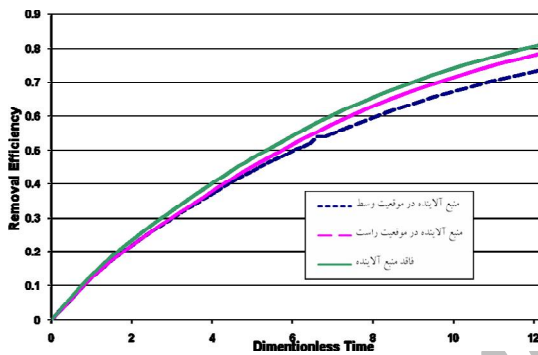


شکل ۶: مقادیر η برحسب τ برای حالت فاقد منبع آلاینده

به طور مشابه در شکل‌های ۹ و ۱۰ مقادیر  $\eta$  برحسب  $\tau$  برای دو موقعیت منبع آلاینده و نیز حالت فاقد منبع در چیدمان‌های مرکزی و قطری رسم گردیده است. مشابه چیدمان قبل در حالتی که منبع در زیر دریچه ورودی قرار دارد (به ترتیب موقعیت وسط و موقعیت راست)، میزان کاهش بازده حذف ذرات کمتر است.

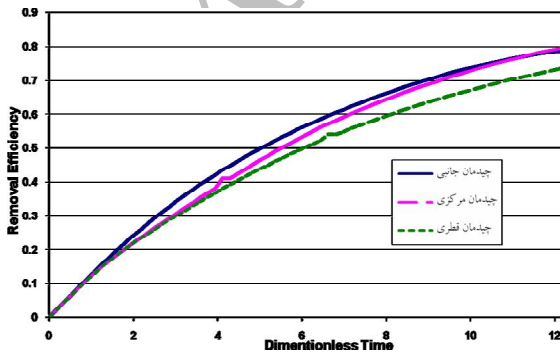


شکل ۹: مقادیر  $\eta$  برحسب  $\tau$  برای چیدمان مرکزی



شکل ۱۰: مقادیر  $\eta$  بر حسب  $\tau$  برای چیدمان قطری

برای درک بهتر اثر موقعیت منبع آلاینده بر بازده حذف ذرات مقادیر  $\eta$  برحسب  $\tau$  برای هر سه چیدمان در حالتی که منبع آلاینده در موقعیت وسط قرار دارد در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان گونه که پیدا است، در دراز مدت بازده چیدمان مرکزی بیشتر از سایر چیدمان‌ها است درحالی که در حالتی که منبع آلاینده وجود نداشت، بازده چیدمان جانبی بیشترین بود (شکل ۶).

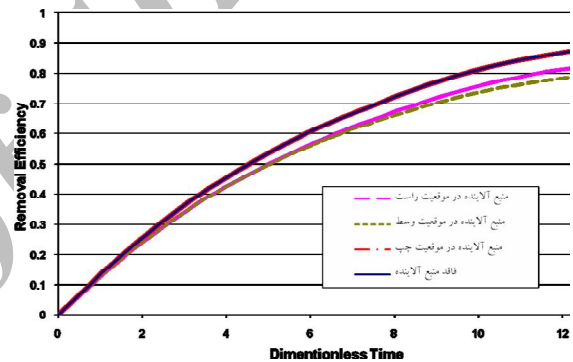


شکل ۱۱: مقادیر  $\eta$  برحسب  $\tau$  برای حالت منبع آلاینده در موقعیت وسط

نکته شایان ذکر آن است که با گذشت زمان، تمامی مدل‌ها به صورت پایا در خواهند آمد که کانتورهای غلظت برای هر سه چیدمان در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود.

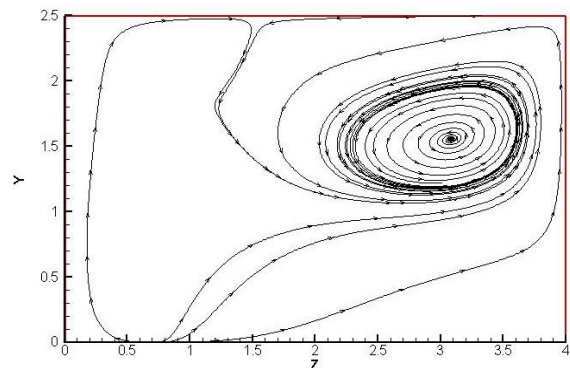
همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در این حالت، چیدمان جانبی دریچه‌ها بهترین بازده را دارا بوده و چیدمان قطری دریچه‌ها دارای کمترین بازده است. علت این امر ناشی از آن است که در چیدمان جانبی دریچه‌ها، طول مسیر بین ورودی و خروجی حداکثر بوده و جریان هوای ورودی فرصت بیشتری برای جابه جایی ذرات دارد، حال آنکه در چیدمان قطری دریچه‌ها، این طول حداقل است.

جهت بررسی اثر موقعیت منبع آلاینده، نخست چیدمان جانبی را در نظر گرفته و مقادیر  $\eta$  برحسب  $\tau$  برای سه موقعیت منبع آلاینده و نیز حالت فاقد منبع در شکل ۷ رسم گردیده است. همان گونه که انتظار می‌رود، با وجود منبع مقدار  $\eta$  کاهش می‌یابد. لیکن در حالتی که منبع زیر دریچه ورودی قرار گرفته است (موقعیت راست)، میزان این کاهش کمتر از حالتی است که منبع در موقعیت وسط قرار گرفته است. علت این امر ناشی از این حقیقت است که هر چه منبع به مسیر اصلی جریان درون اتاق نزدیکتر باشد، تأثیر آن در کاهش بازده حذف ذرت کمتر خواهد بود.

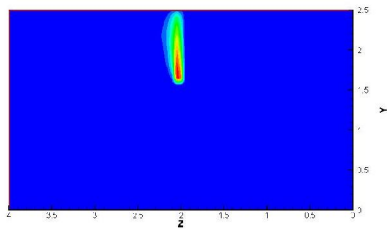


شکل ۷: مقادیر  $\eta$  برحسب  $\tau$  برای چیدمان جانبی

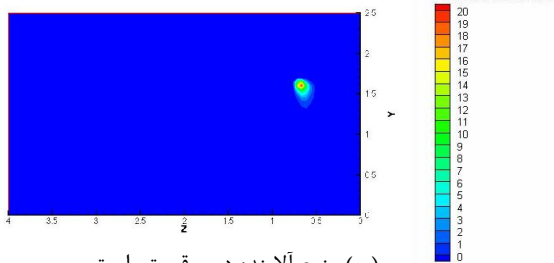
نکته قابل تأمل در شکل ۷ آن است که با وجود آن که موقعیت چپ از مسیر اصلی جریان بیشترین فاصله را دارد، ولی بازده حذف ذرات در آن بیشتر از دو حالت دیگر و تقریباً برابر با حالت فاقد منبع است. با رسم خطوط جریان در صفحه تقارن طولی اتاق (شکل ۸) علت این امر روشن می‌گردد. در واقع وجود گردابه‌ای در سمت چپ اتاق به دلیل ماهیت چرخشی خود آن قدر در پخش ذرات مؤثر است که تأثیر منبع آلاینده را به حداقل می‌رساند.



شکل ۸: خطوط جریان در صفحه تقارن طولی اتاق برای چیدمان جانبی

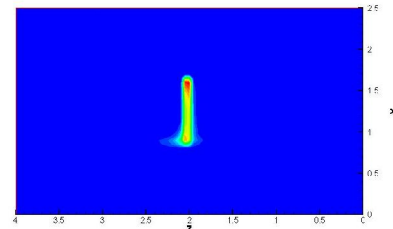


(الف) منبع آلاینده در موقعیت وسط

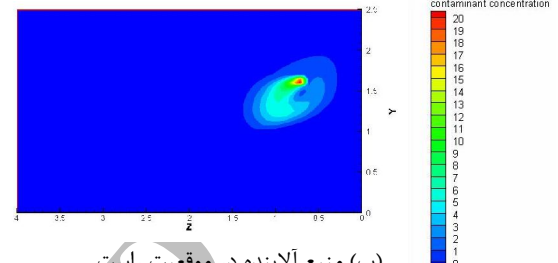


(ب) منبع آلاینده در موقعیت راست

شکل ۱۴: کانتورهای غلظت برای چیدمان قطری

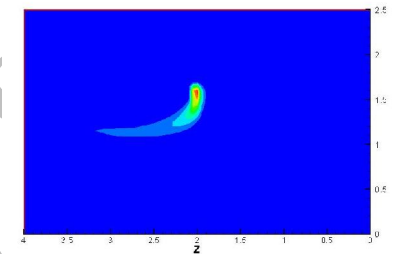


(الف) منبع آلاینده در موقعیت وسط

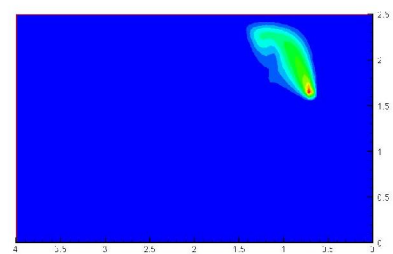


(ب) منبع آلاینده در موقعیت راست

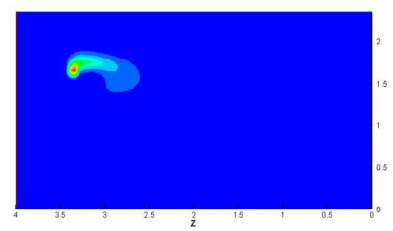
شکل ۱۲: کانتورهای غلظت برای چیدمان مرکزی



(الف) منبع آلاینده در موقعیت وسط



(ب) منبع آلاینده در موقعیت راست



(پ) منبع آلاینده در موقعیت چپ

شکل ۱۳: کانتورهای غلظت برای چیدمان جانبی

### نتیجه گیری و جمع بندی

چیدمان دریچه‌های ورودی و خروجی تأثیر بسزایی در کارایی اتاقهای تمیز دارد. به طور کلی هر چه فاصله دریچه‌های ورودی و خروجی بیشتر باشد، بازده حذف ذرات از اتاق تمیز بیشتر خواهد بود. البته تأثیر فاصله دریچه‌های ورودی و خروجی در کوتاه مدت خود را بیشتر نشان می‌دهد.

همچنین وجود منبع آلاینده در اتاق موجب کاهش بازده حذف ذرات می‌گردد. در برخی موارد تأثیر منبع آلاینده در عملکرد اتاقهای تمیز بسیار قابل توجه می‌باشد، به عنوان نمونه چیدمان جانبی در حالت بدون منبع آلاینده بیشترین بازده را داشت (شکل ۶)، حال آنکه چیدمان مرکزی در حالت قرار گرفتن منبع آلاینده در موقعیت وسط از بیشترین بازده در دراز مدت برخوردار بود (شکل ۱۱). متأسفانه جهت طراحی اتاقهای تمیز، در اغلب موارد محل دریچه با فرض خالی بودن اتاق انتخاب می‌شود، حال آن که وجود منبع آلاینده در اتاق می‌تواند تأثیر بسزایی در انتخاب محل دریچه داشته باشد.

### مراجع

- [1] Chung, K.C., "Three-dimensional analysis of airflow and contaminant particle transport in a partitioned enclosure", Building and Environment, Vol.34, pp.7-17, 1999.
- [2] Sajadi, B., "Numerical and experimental investigation of obstacle effects on the particle dispersion and deposition in conventional clean rooms", Ph.D. thesis proposal, 2008.
- [3] Kameel, R., Khalil, E.E., "Predictions of turbulence behavior using k-ε model in operating theatres", Proceedings of Roomvent 2002, 2002.
- [4] Cheong, K.W.D, Djunaedy, E., Poh, T.K., Tham, K.W., Sekhar, S.C., Wong, N.H., Ullah, M.B., "Measurements and computations of contaminant's distribution in an office environment", Building and Environment, Vol.38, pp.135-145, 2003.

همان گونه که در این شکل‌ها پیدا است، میدان جریان اطراف منبع آلاینده، تأثیر بسزایی بر نحوه توزیع غلظت اطراف منبع آلاینده دارد. همچنین تأثیر گردابه‌ها در افزایش پخش در شکل‌های فوق مشخص می‌باشد.

- [5] Rouaud, O., Havet, M., "Computation of the airflow in a pilot scale clean room using k- $\epsilon$  turbulence models", *International Journal of Refrigeration*, Vol.25, pp.351-361, 2002.
- [6] Tian, Z.F., Tu, J.Y., Yeoh, G.H., Yuen, R.K.K., "On the numerical study of contaminant particle concentration in indoor airflow", *Building and Environment*, Vol.41, pp.1504-1514, 2006.
- [7] Zhao, B., Guan, P., "Modeling particle dispersion in personalized ventilated room", *Building and Environment*, Vol.42, pp.1099-1109, 2007.
- [8] Rui, Z., Guangbei, T., Jihong, L., "Study on biological contaminant control strategies under different ventilation models in hospital operating room", *Building and Environment*, Vol.43, pp.793-803, 2008.
- [9] Loomans, M., and Lemaire, T., "Particle concentration calculations using CFD - a comparison", *Proceedings of Indoor Air 2002*, pp.153-156, 2002.
- [10] Chung, I-P., Dunn-Rankin, D., "Using numerical simulation to predict ventilation efficiency in a model room", *Energy and Buildings*, Vol.28, pp.43-50, 1998.
- [11] Yang, X., Srebric, J., Li, X., He, G., "Performance of three air distribution systems in VOC removal from an area source", *Building and Environment*, Vol 39, pp.1289-1299, 2004.
- [12] Mundt, E., "Non-buoyant pollutant sources and particles in displacement ventilation", *Building and Environment*, Vol 36, pp. 829-836, 2001
- [13] Hendijanifard, M., Saidi, M.H., Taeibi-Rahni, M., "The step effect and particle removal from an enclosure", *Proceedings of 8th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ESDA2006)*, 2006.
- [14] Wilcox, D.C., "Turbulence modeling for CFD", DCW Industries, 1993.
- [15] *Fluent 6.3 user's guide*, Fluent Inc., 2006.
- [16] Nielsen, P.V., Restivo, A., Whitelaw, J.H., "The velocity characteristics of ventilated rooms", *Journal of Fluid Engineering*, Vol.100, pp.291-298, 1978.
- [17] Lage, J.L., Bejan, A. and Anderson, R., "Removal of contaminant generated by a discrete source in a slot ventilated enclosure", *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol.35, pp.1169-1180, 1992.