



## مقایسه عددی اثر زاویه پره ثابت و متغیر دیفیوزر بر جریان هوا و توزیع آلودگی در یک فضای تهویه شونده

جابر اسلامی<sup>۱</sup>، عباس عباسی<sup>۱\*</sup>، محمدحسن سعیدی<sup>۲</sup>، میثم سعیدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

<sup>۳</sup>گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۳۰ مرداد ۱۳۹۵

بازنگری: ۱۸ دی ۱۳۹۵

پذیرش: ۳ بهمن ۱۳۹۵

ارائه آنلاین: ۱۵ بهمن ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

دیفیوزر سقفی چهارطرفه  
دینامیک سیالات محاسباتی  
کارایی سیستم تهویه  
توزیع ذرات

**چکیده:** با توجه به استفاده روز افزون سیستم‌های تهویه مطبوع در صنایع مختلف از جمله اتاق‌های تمیز، نیاز به طراحی بهینه تجهیزات مورد استفاده در این سیستم‌ها جهت مصرف انرژی کمتر و توزیع آلودگی مناسب‌تر، بیش از پیش احساس می‌شود. در این مقاله اثر زاویه دیفیوزر سقفی چهارطرفه بر کارایی سیستم تهویه به صورت عددی با رویکرد اوبلی-لاگرانژی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق، توزیع ذرات آلاینده بصورت یکنواخت در اتاق در نظر گرفته شده و اتاق بدون دیفیوزر و اتاق با دیفیوزر با زاویه‌های ۳۰، ۹۰ و ۹۰ تا ۹۰ درجه به عنوان مدل‌های مورد بررسی انتخاب شده است. تأثیر واضحی که جهت دیفیوزر بر میدان سرعت اتاق می‌گذارد، منجر به تغییر در توزیع پراکندگی ذرات آلاینده می‌شود. در این مطالعه نشان داده می‌شود، دیفیوزر با زاویه پره ۳۰ و ۹۰-۳۰ درجه با سرعت بالاتری آلودگی را کاهش می‌دهد. همچنین اتاق بدون دیفیوزر و دیفیوزر با زاویه پره ۹۰ درجه که جریان هوا را بصورت عمودی پرتاب می‌کند، دارای نشست کمتر ذرات بر روی کف اتاق بوده و منجر به نسبت خروج به نشست بالاتری می‌شود. همچنین با توجه به الگوهای جریان مشاهده می‌شود، در زوایای ۳۰ و ۹۰-۳۰ درجه جریان هوای اتاق، ذرات آلاینده را از گوشه‌های اتاق جاروب می‌کند، ولی در اتاق بدون دیفیوزر و یا با دیفیوزر با زاویه ۹۰ درجه الگوهای جریان تأثیر بسزایی در خروج ذرات از گوشه‌های اتاق نداشته و بیشتر در محدوده وسط اتاق مؤثر می‌باشند.

### ۱- مقدمه

امروزه دیفیوزرهای سقفی به عنوان یک ابزار مکانیکی جهت کنترل مشخصات هوای ورودی و توزیع آلودگی در فضاهای تهویه‌شونده به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. با توجه به کاربری مورد نظر، طراحان سیستم تهویه از انواع دیفیوزرهای سقفی از جمله دیفیوزر سقفی دوطرفه، دوطرفه کنجی، چهار طرفه مستطیلی، چهار طرفه مربعی و یا دیفیوزرهای چرخشی استفاده می‌کنند. درک صحیح و عمیق از توزیع جریان و نحوه پخش و انتشار ذرات آلاینده در این گونه فضاها برای طراحان تأسیسات مکانیکی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به طور واضح مشخص می‌باشد که الگوهای جریان در این فضاها تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله جانمایی هندسی دیفیوزرهای ورودی و خروجی در فضاهای تهویه شونده [۲]، حجم هوای ورودی، موقعیت موانع موجود در اتاق، حضور پرسنل و حرکت آنها [۳] و همچنین طراحی شکل هندسی دیفیوزرهای ورودی [۴] می‌باشد. دیفیوزرهای سقفی چهارطرفه مربعی یکی از مرسوم‌ترین دیفیوزرهای مورد استفاده در این گونه فضاها می‌باشند و مدل‌سازی عددی دیفیوزرهای ورودی، می‌تواند منجر به تحقیق دقیق‌تر و واقع بینانه‌تری در مورد الگوی های جریان ایجاد شده در فضاهای داخلی شود [۵].

روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی یکی از سودمندترین و

مناسب‌ترین روش‌های پیش‌بینی الگوهای جریان هوا در فضاهای داخلی می‌باشند. در دهه‌های اخیر روش‌های عددی در برابر هزینه‌های بالای تحقیقات تجربی بیشتر مورد توجه قرار گرفته و با توجه به پیشرفت روز افزون تجهیزات محاسباتی کامپیوتری، دینامیک سیالات محاسباتی کاربرد ویژه‌ای جهت مدل‌سازی توزیع جریان، دما، فشار و آلودگی در فضاهای تهویه‌شونده پیدا کرده است. البته لازم به ذکر است، روش‌های مدل‌سازی عددی نیاز به نتایج تجربی معتبر جهت اعتباربخشی و انتخاب مدل مناسب آشفته‌گی دارند [۶].

برای مدل‌سازی عددی دیفیوزرهای ورودی، روش‌های مختلفی توسعه یافته است [۷]. روش ساده برای در نظر گرفتن اثر دیفیوزر مدل‌سازی یک شیار مستطیلی ساده است که روش متداول نامیده می‌شود [۸]. در این روش سرعت عمودی بر دیفیوزر از تقسیم دبی هوای ورودی بر مساحت دیفیوزر ورودی به دست می‌آید. نیلسن [۴] دو روش مدل جعبه و مدل سرعت را توسعه داده است. در روش مدل جعبه، دیفیوزر با یک جعبه فرضی مدل می‌شود و تمام شرط‌های مرزی دیفیوزر در سطوح جعبه لحاظ می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد با مدل جعبه می‌توان به نتایج خوبی دست یافت، با این حال اندازه‌گیری‌های جزئی‌تری برای تعریف سرعت در سطوح جعبه لازم می‌باشد. مدل سرعت نسبت به مدل جعبه اندازه‌گیری‌های کمتری لازم دارد که برای برخی نقاط از روش‌های متداول استفاده می‌کند. اگر

پره‌های صفر تا ۵۰ درجه در یک اتاق نمونه مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله گزارش شده است که با افزایش زاویه پره، جریان اختلاطی قوی‌تری در مرکز اتاق و گردابه‌های قوی‌تری در گوشه‌های اتاق به وجود می‌آیند. چن و همکاران [۱۳] اثر هندسه نوع خاصی از دیفیوزر چند شکافه، که عمدتاً در وسایل نقلیه استفاده می‌شود، بر نشست ذرات نزدیک دیفیوزر مورد بررسی قرار دادند. با افزایش نسبت مساحت باز به دیواره در دیفیوزر و همچنین در زوایای بزرگ‌تر از ۴۵ درجه، کاهش نشست ذرات در نزدیک دیفیوزر گزارش گردید.

اگرچه در پژوهش‌های قبلی مطالعاتی بر روی اثر زاویه پره در انواع مختلف دیفیوزرها از جمله چرخشی، خطی اسلات و چهارطرفه مربعی بر الگوی جریان و توزیع آلاینده‌ها در فضاها تهویه شونده انجام گرفته است، ولی تا کنون بررسی اثر زاویه پره متغیر دیفیوزر چهارطرفه سقفی و مطالعه توأمان میدان جریان و ذرات آلاینده انجام نشده است. در این مقاله راندمان خروج ذرات آلاینده و همچنین سرعت خروج آلاینده‌ها برای دیفیوزر با زاویه متغیر در مقابل دیفیوزر های زاویه ثابت مورد مقایسه قرار می‌گیرد. از نتایج این تحقیق می‌توان در طراحی دیفیوزرهایی با راندمان بالاتر بهره برد.

## ۲- معادلات حاکم و روش حل

عموماً جریان در فضاها تهویه شونده دارای ماهیت سه بعدی و آشفته می‌باشد. از آنجایی که غلظت ذرات در فضای اتاق کم می‌باشد بنابراین الگوی جریان هوای اتاق تحت تأثیر غلظت ذرات قرار نمی‌گیرد [۱۳]. برای شبیه سازی الگوی جریان از معادلات متوسط‌گیری شده رینولدزی نویر استوکس استفاده شده است. در مطالعات گذشته [۱۴] مورد تأیید قرار گرفته است، که مدل آشفتگی آر-ان - جی کی - اپسیلون برای شبیه‌سازی عددی جریان‌های داخلی مناسب می‌باشد. برای جریان ایزوترمال و با در نظر گرفتن فرضیه بوسینسک معادلات حاکم به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\vec{V}\phi - \Gamma_{\phi}\text{grad}\phi) = S_{\phi} \quad (1)$$

در معادله (۱)،  $\phi$  به عنوان متغیر وابسته،  $\vec{V}$  بیانگر بردار سرعت،  $S_{\phi}$  ترم منبع و  $\Gamma_{\phi}$  ضریب پخش مؤثر می‌باشد. متغیرهای به کار رفته در معادلات پیوستگی، ممنتوم و آشفتگی در جدول ۱ به نمایش در آمده است. اطلاعات بیشتر در مورد ثابت‌های به کار رفته در جدول ۱، در مقاله یاخوت و همکاران [۱۵] گزارش شده است.

برای مدل‌سازی جریان آلودگی در اتاق‌ها معمولاً از دو روش لاگرانژی و اوپلری با توجه به نوع مطالعه مورد بررسی، استفاده می‌شود. تحقیقات زیادی در مورد مقایسه این روش‌ها انجام شده است، که چندین تحقیق به این نتیجه رسیدند که روش لاگرانژی روش دقیق‌تری از روش اوپلری برای پیش بینی توزیع و پراکندگی غلظت ذرات در فضای اتاق می‌باشد [۱۶]. در این مقاله با توجه به کم بودن تعداد ذرات و نیاز به اطلاعات جزئی در مورد توزیع ذرات در مناطق حساس، از روش لاگرانژی برای بررسی توزیع ذرات

چه در برخی از مطالعات گذشته از روش‌های ۱- متداول، ۲- مدل جعبه، ۳- مدل سرعت و ۴- مدل ممنتوم برای بررسی استفاده شده است ولی یکی از معایب مهم این روش‌ها نیاز به نتایج تجربی برای مدل‌سازی جریان در اطراف دیفیوزر می‌باشد. با این وجود، با سرعت روز افزون توان محاسباتی رایانه‌ها می‌توان از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی جهت مدل‌سازی عددی جریان اطراف دیفیوزر استفاده نمود.

سجادی و همکاران [۹] در تحقیق خود، اثر پارامترهای هندسی (زاویه تیغه و نسبت طول به عرض) نوع خاصی از دیفیوزر های چرخشی را روی بازدهی تهویه مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که توزیع جریان حاصل از زاویه تیغه دیفیوزر ورودی به طور ویژه به زاویه تیغه بستگی دارد و برای زاویه‌های ۳۰ تا ۳۵ درجه اثر چشمگیرتری دارد.

جونیدی و چیانگ [۷] پنج مدل مختلف برای مدل‌سازی دیفیوزر سقفی چهارطرفه را با مدل آشفتگی آر-ان - جی کی - اپسیلون<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار دادند و به این مهم دست یافتند که روش مدل‌کردن دیفیوزر ورودی تأثیر بسزایی روی پروفایل جریان ورودی و در نتیجه روی میدان جریان اتاق دارد و علاوه بر آن گزارش کردند که مدل آر-ان - جی کی - اپسیلون برای مدل‌سازی دیفیوزر از مدل استاندارد کی - اپسیلون<sup>۲</sup> بهتر می‌باشد.

آلمانسا و همکاران [۶] توزیع جریان در اطراف یک دیفیوزر مرسوم تهویه (مدل شطرنجی) را مورد بررسی عددی قرار دادند و برای معتبر سازی نتایج عددی و آشکارسازی جریان سیال از آزمایشات تجربی سرعت سنجی سیم داغ<sup>۳</sup> و روش سرعت‌سنجی تصویر ذرات<sup>۴</sup> استفاده نمودند.

سبریک و چن [۱۰] برای هشت مدل مختلف دیفیوزر ورودی به دنبال یافتن روش مدل‌سازی مناسبی برای مدل‌کردن جریان و دما بودند. آن‌ها دو مدل جعبه و ممنتوم را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که روش جعبه برای اکثر دیفیوزرها مناسب می‌باشد ولی روش ممنتوم فقط برای بعضی از دیفیوزرها کاربرد دارد.

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در کارهای گذشته در مورد دیفیوزرها انجام شده است، در مورد زاویه پره می‌باشد، که در شکل‌گیری الگوی جریان توسط دیفیوزر ورودی تأثیر بسزایی دارد. توکلی و حسینی [۱۱] اثر زاویه پره دیفیوزر چرخشی روی مشخصات آشفتگی جریان و انتقال جرم را با روش شبیه‌سازی گردابه ای بزرگ<sup>۵</sup>، برای زاویه پره‌های بین ۴۵ تا ۶۵ درجه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که زاویه پره بالاتر برای خروج هوای آلوده مناسب‌تر می‌باشد و با زاویه پره ۵۰ درجه کیفیت هوای بهتری در ناحیه مرکزی به وجود می‌آید.

کوهادرالگو و همکاران [۱۲]، اثر زاویه عمودی یک دیفیوزر خطی اسلات دیواری را بر روی مشخصات جریان برای دیفیوزر با زاویه متغیر با زاویه

- 1 RNG k-ε
- 2 Standard k-ε
- 3 Hot wire anemometry
- 4 Particle image velocimetry
- 5 Large eddy simulation

جدول ۱: ضرایب ترم‌های منبع معادله (۱)

Table 1. Source term coefficients of Eq. (1)

معادله	$\varphi$	$\Gamma_\varphi$	$S_\varphi$
پیوستگی	1	-	-
ممتوم	$V$	$\mu_{eff}$	$-\nabla p$
انرژی جنبشی آشفستگی	$k$	$\mu_{eff}/\sigma_k$	$P_k - \rho\varepsilon$
اتلاف انرژی جنبشی آشفستگی	$\varepsilon$	$\mu_{eff}/\sigma_\varepsilon$	$\varepsilon(C_1P_k - C_2\varepsilon)/k$

جدول ۲: مقدار ضریب لغزش برای قطرهای مختلف

Table 2. Cunningham correction factor

$d_p(\mu m)$	$C_c$
۱	۱/۱۵
۵	۱/۰۳
۱۰	۱/۰۱

انرژی جنبشی آشفستگی و همچنین عدد تصادفی  $G$  با استفاده از زمان مرگ گردابه و زمان عبور ذرات بدست می‌آید.

### ۳- هندسه و مشخصات حل عددی

شکل هندسی اتاق تهویه شونده مورد بررسی در شکل ۱ به نمایش درآمده است. همان طور که در شکل مشخص می‌باشد، اتاق مورد نظر که مکعب مربعی به ضلع ۳ متر است دارای یک دیفیوزر ورودی چهار طرفه مربعی در مرکز سقف به ضلع ۶۰ سانتی‌متر می‌باشد که شش پره خروجی به سمت هر جهت دارد. سه زاویه پره ۳۰، ۹۰ و یک حالت ابتکاری زاویه از ۳۰ تا ۹۰ که در این پژوهش دیفیوزر با زاویه ۳۰-۹۰ نامیده می‌شود، استفاده می‌کنیم.

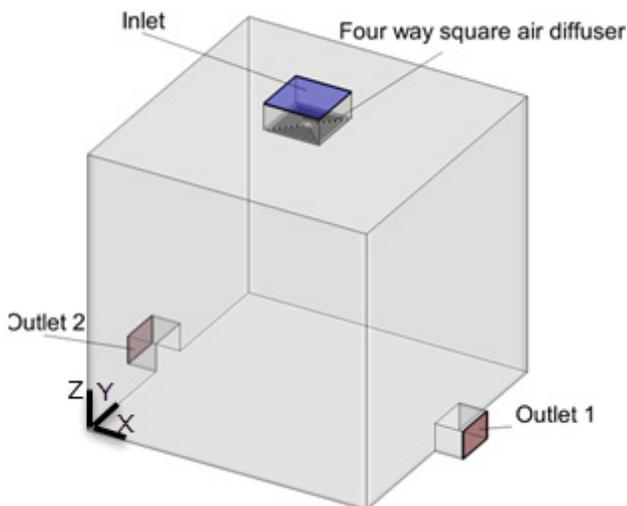


Fig. 1. Geometry of ventilated room

شکل ۱: نمای هندسی اتاق تهویه شونده

آلاینده استفاده شده است. با فرض ناچیز بودن حجم ذرات تزریق شده به داخل سیال و کوچک بودن اندازه ذرات، تأثیر ذرات بر فاز سیال قابل صرف‌نظر بوده و رویکرد اوایلر-لاگرانژی با تعامل (کوپلینگ) یک طرفه مناسب می‌باشد. در این روش از اثر ذرات بر میدان جریان صرف نظر می‌شود و فقط تأثیر فاز سیال بر فاز ذرات در نظر گرفته می‌شود. این روش ردیابی ذرات بر مبنای انتگرال‌گیری از معادله نیروهای حاکم بر یک ذره به صورت ذیل می‌باشد:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{(u_f - u_p)}{\tau_{relax}} + \frac{g(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} + F_{other} \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $u_p$  سرعت ذره و  $u_f$  سرعت سیال و  $\rho_p$  چگالی ذره و  $\rho_f$  چگالی سیال و  $g$  شتاب گرانش می‌باشد.  $du_p/dt$  و  $(u_f - u_p)/\tau_{relax}$  به ترتیب بیانگر نیروی اینرسی و پسا بر واحد جرم برای ذره می‌باشد. ترم  $g(\rho_p - \rho_f)/\rho_p$  بیانگر نیروی گرانش و شناوری می‌باشد.

در معادله بالا  $F_{other}$  بیانگر دیگر نیروهای اضافی حاکم بر ذره از جمله برونی، سفمن و ترموفورتیک می‌باشد که در این بررسی با توجه به قطر نسبتاً بزرگ ذره ناچیز در نظر گرفته می‌شود. نیروهای بست و جرم مجازی و فشار نیز در مقابل نیروی پسا ناچیز در نظر گرفته می‌شود [۲].  $\tau_{relax}$  نیز به صورت معکوس ضریب آرامش بر اساس معادله (۳) تعریف می‌شود:

$$\tau_{relax} = \frac{\rho_p d_p^2 C_c}{18\mu} \quad (3)$$

که در این معادله  $d_p$  قطر ذره و  $\mu$  ویسکوزیته مولکولی و  $C_c$  ضریب لغزش می‌باشد که بر اساس معادله (۴) بیان می‌شود [۱۷]:

$$C_c = 1 + 2Kn \left[ 1.257 + 0.4 \exp\left(\frac{-1.1}{2Kn}\right) \right] \quad (4)$$

در معادله (۴)،  $Kn$  بیانگر عدد بی بعد نادنسن می‌باشد، که به صورت نسبت  $\lambda/d_p$  بیان می‌شود. مقدار  $\lambda$  و یا ضریب پویس آزاد هوا ۶۸ نانومتر در شرایط استاندارد اتمسفری می‌باشد. با توجه به انتخاب قطرهای ۱، ۵ و ۱۰ میکرون مقدار ضریب لغزش در جدول ۲ گزارش شده است.

طبق مطالعه ژنگ و چن [۱۸]، در پژوهش اخیر نیز از مدل دی آر دبلیو<sup>۱</sup> برای لحاظ کردن اثر نیروهای آشفستگی و مدل‌سازی نوسانات لحظه‌ای سرعت بر مسیر حرکت ذرات استفاده شده است. از این‌رو نوسانات سرعت با معادله (۵)، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u_i' = G \sqrt{u_i'^2} \quad (5)$$

در معادله (۵)،  $G$  عدد اتفاقی گوسین و  $\sqrt{u_i'^2}$  مجذور مربعات نوسانات سرعت در جهات مختلف می‌باشد. برای مدل آشفستگی  $k$ - $\varepsilon$  مجذور مربعات برای نوسانات سرعت برابر  $2k/3$  می‌باشد. که در این رابطه همان مقدار  $k$

1 Discrete random walk (DRW) model

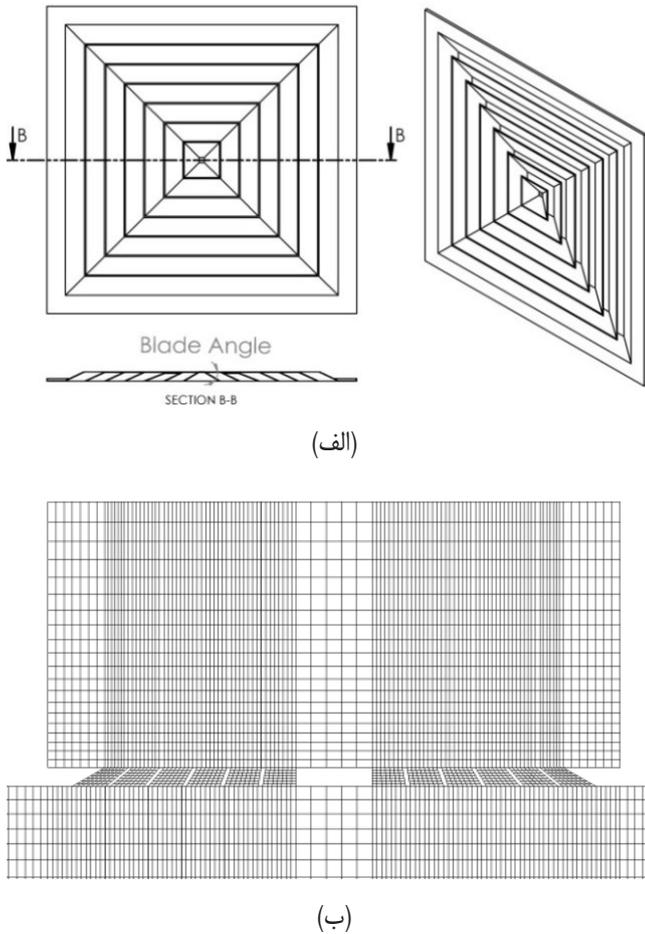


Fig. 2. Four-way ceiling diffuser, a) schematic, b) grids

شکل ۲: دیفیوزر سقفی چهارطرفه مربعی  
(الف طرح‌واره و ب) شبکه بندی

طور پیوسته از ورودی تزریق می‌شوند، ردیابی شده است. مقایسه بین نتایج تجربی و مدل‌سازی عددی میدان غلظت نرمالایز شده در شکل ۵ به نمایش در آمده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، تطابق نسبتاً خوبی با میانگین خطای نسبی  $16/3\%$  صحت نتایج عددی را در پیش بینی توزیع آلاینده‌ها تأیید می‌کند.

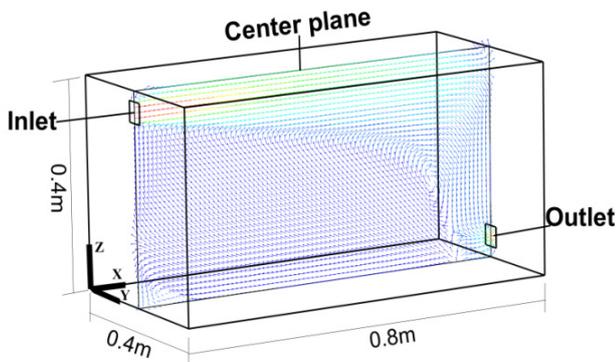


Fig. 3. Geometry of room used for the validation

شکل ۳: نمای هندسی اتاق مورد استفاده در صحت‌سنجی نتایج

برای بررسی اثر حضور دیفیوزر، حالت بدون حضور دیفیوزر هم مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه زاویه دیفیوزر از سقف محاسبه می‌شود بدین معنی که دیفیوزر با زاویه  $90^\circ$  درجه بصورت کاملاً عمودی هوا را به پایین می‌فرستد. قبل از دیفیوزر و در بالای اتاق جعبه‌ای مکعبی به قاعده  $60 \times 60$  سانتی‌متر و ارتفاع  $30$  سانتی‌متر تعبیه شده است تا شرط مرزی سرعت هوای مشخص  $0/21$  متر بر ثانیه به بالای این جعبه اعمال گردد. برای هدایت ذرات آلاینده به سمت کانال برگشت هوا نیز دو دیفیوزر خروجی به طول و ارتفاع  $45$  و  $30$  سانتی‌متر با شرط مرزی خروجی در دیوارهای جانبی در نظر گرفته شده است. برای کاهش اثر شرط مرزی بر داخل به داخل اتاق، دیفیوزرهای خروجی به عمق  $30$  سانتی‌متر بیرون از اتاق قرار داده شده است. برای شبیه‌سازی عددی از نسخه تجاری نرم‌افزار فلوئنت<sup>۱</sup>  $17$  استفاده شده است. شرط مرزی دیوار برای هوا عدم لغزش و برای ذرات در کف، نشست و در سقف و دیوارهای جانبی، شرط انعکاس جهت مطالعه در نظر گرفته می‌شود. تعداد ذرات برخورد کرده به کف اتاق (نشسته) و همچنین ذرات خارج شده از دیفیوزرهای خروجی در زمان‌های مختلف حل ذخیره می‌شود. در ابتدا تعداد یک میلیون ذره آلاینده با قطرهای  $1$ ،  $5$  و  $10$  میکرون و چگالی  $1000$  کیلوگرم بر متر مکعب با فاصله  $5$  سانتی‌متری از یکدیگر در کل اتاق قرار داده شده تا با اثر پذیری از میدان جریان جابه‌جا شده و اتاق تمیز گردد. استقلال شبکه‌بندی با توجه به کار قبلی نویسندگان [۱۹] و حجم نزدیک دو اتاق با بزرگترین اندازه مش  $10$  سانتی‌متر مورد اطمینان می‌باشد. برای بررسی دقیق‌تر جریان اطراف دیفیوزر از مش‌های ریزتری استفاده شده است که در نهایت تعداد مش به یک میلیون می‌رسد به نحوی که اندازه آن در کنار دیوار  $10$  سانتی‌متر و در نزدیک پره  $0/5$  سانتی‌متر می‌باشد. شکل ۲ طرح‌واره دیفیوزر و شبکه‌بندی را نشان می‌دهد.

#### ۴- بررسی صحت حل عددی

برای صحت‌سنجی مطالعه حاضر، سرعت در جهت  $x$  و غلظت نرمال به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته و با نتایج تجربی چن و همکاران [۱۵] مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل ۳ به نمایش در آمده است، ابعاد اتاق مورد مطالعه، دارای طول  $0/8$  متر و عرض  $0/4$  متر و ارتفاع  $0/4$  متر می‌باشد. هوای تازه از ورودی به عرض  $0/4$  متر و ارتفاع  $0/4$  متر تعبیه شده در دیوار جانبی وارد اتاق شده و از دیفیوزر خروجی به همین ابعاد از اتاق خارج می‌شود.

با توجه به  $10$  بار تعداد تعویض هوا در ساعت، سرعت ورودی  $0/225$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج عددی سرعت در جهت  $x$  در شکل ۴، برای سه موقعیت مختلف  $x=0/2m$ ،  $x=0/6m$  و  $x=0/2m$  بر تطابق خوب نتایج تجربی و عددی و صحت روش عددی به کار گرفته شده دلالت دارد. برای صحت‌سنجی نتایج، غلظت نرمالایز شده لاگرانژی، تعداد  $60000$  ذره با قطر  $10$  میکرون و چگالی  $1400$  کیلوگرم بر متر مکعب که به

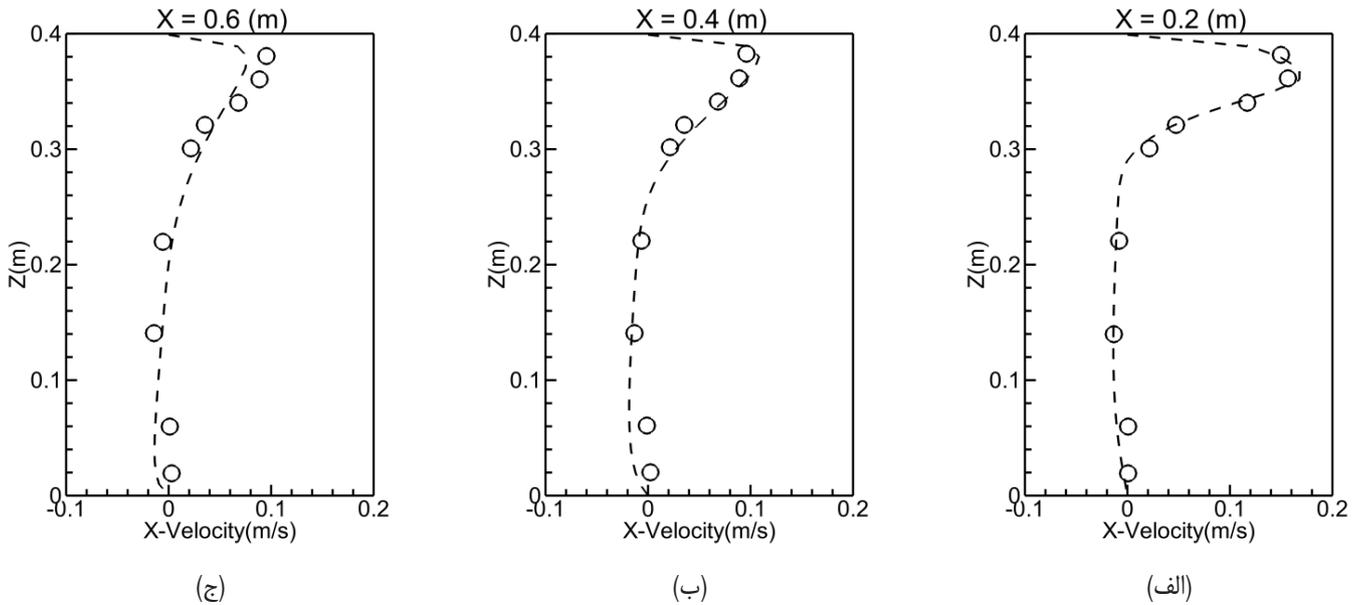


Fig. 4. Air velocity profile at different length sections

شکل ۴: توزیع سرعت هوا در طول‌های مختلف صفحه میانی در کار عددی حاضر (---) و نتایج تجربی (○) [۱۵]

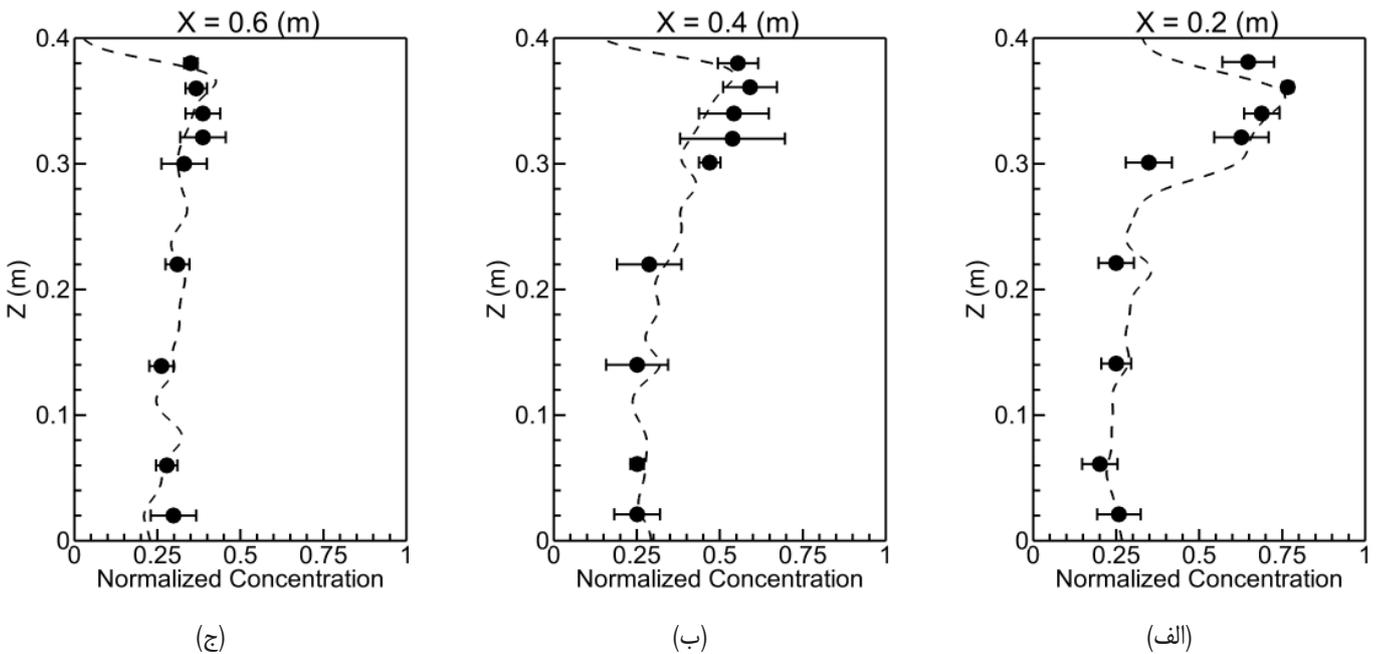


Fig. 5. Normalized averaged contaminant concentration distribution

شکل ۵: توزیع متوسط غلظت نرمال آلاینده‌گی در طول‌های مختلف صفحه میانی در کار عددی حاضر (---) و نتایج تجربی (●) [۱۵]

## ۵- نتایج و بحث

را ادامه می‌دهد. در حالت با پره‌های ۳۰ درجه منحرف شدن جریان هوای ورودی به سمت دیوارهای جانبی اتاق دیده شده و گردش هوا با حرکت بالاسو در وسط مشهودتر است.

در هندسه ۳۰-۹۰ درجه که پره‌های دیفیوزر از ۹۰ درجه در وسط تا ۳۰ درجه در کناره‌ها تغییر می‌کند، تفاوت جریان خروجی از پره‌های مختلف مشاهده می‌گردد. به واسطه ثابت فرض شدن ارتفاع پره‌ها (۲۰ میلی‌متر) در زاویه‌های بین ۳۰ تا ۹۰ درجه احتمال جهت‌گیری ناقص در زاویه‌های بزرگ‌تر مشاهده می‌شود. در شکل ۶ به وضوح دیده می‌شود که دیفیوزر با

نقش دیفیوزر در جریان ورودی اتاق، جهت دادن به هوا می‌باشد. توزیع و بردار سرعت هوای ورودی به اتاق در چهار حالت مورد بررسی در شکل ۶ نمایش داده شده است. در حالت بدون دیفیوزر، جریان هوا بدون مقاومت به صورت عمودی از جعبه هوا به اتاق وارد می‌شود. همان‌طور که به طور واضح مشخص می‌باشد، با تعبیه شدن دیفیوزر و در نظر گرفتن اثر آن، جهت جریان به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت‌تر از حالت بدون دیفیوزر می‌باشد. در حالت دیفیوزر ۹۰ درجه هوا با گذر از پره‌های تعبیه شده تقریباً مسیر عمودی خود

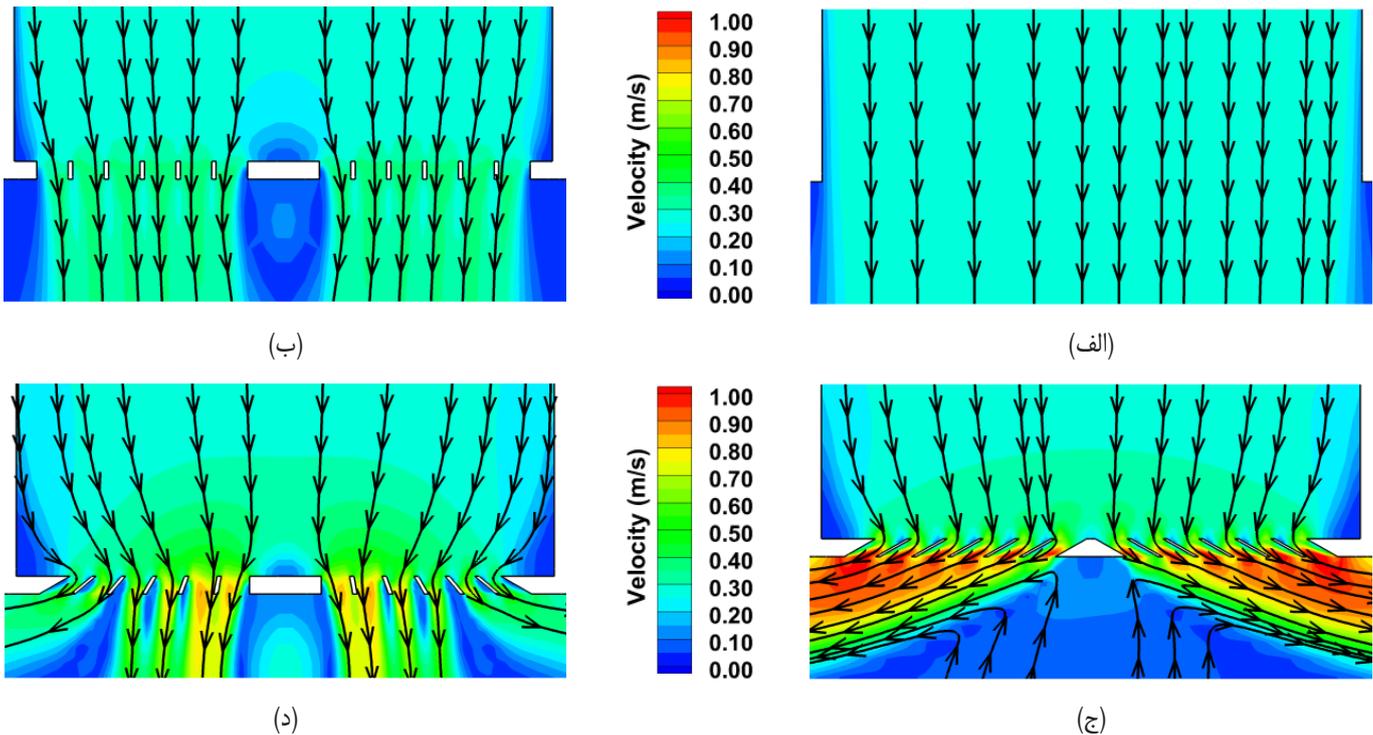


Fig. 6. Stream line and velocity distribution from inlet for a) W/O, b)90, c)30 and d) 30-90 degree diffuser angle

شکل ۶: خطوط جریان و توزیع سرعت هوای ورودی به فضای تهویه شونده. (الف) بدون دیفیوزر، (ب) ۹۰ درجه، (ج) ۳۰ درجه، (د) ۳۰-۹۰ درجه

توجه در نمایش توزیع غلظت مشاهده شود.

با توجه به فرض قرارگیری منظم ذرات در اتاق، با گذر زمان توزیع یکسان از بین رفته و ذرات تحت تأثیر جریان هوای ورودی در سراسر اتاق منتشر می‌شوند. شکل ۸ توزیع سرعت هوا و غلظت ذرات را در زمان ۱۰ ثانیه پس از شروع انتشار ذرات، بر روی محور افقی  $X$  در فاصله ۲۰ سانتی متری از سقف نشان می‌دهد.

عامل اصلی حرکت ذرات، مقدار و جهت جریان هوای دیفیوزر ورودی اتاق می‌باشد و با توجه به شکل ۸ (الف) که مقدار سرعت هوا را نشان می‌دهد، پره ۳۰ درجه هوا را به سمت طرفین، پره ۹۰ درجه به سمت مرکز و پره ۳۰-۹۰ حالت بین آن‌ها می‌باشد. مزیت پره ۳۰ درجه در پخش بیشتر هوا در سطحی بزرگ‌تر نزدیک سقف نسبت به پره ۹۰ درجه که پایین خود را تحت تأثیر قرار می‌دهد، قابل مشاهده است. اگرچه این نمودار تنها در یک ارتفاع و زمان خاص می‌باشد ولی همان‌طور که پیش‌بینی می‌شود دیفیوزر ۳۰-۹۰ حالت میانی دوپره از جنبه توزیع سرعت هوا می‌باشد که هم ناحیه پایین آن و هم ناحیه دورتر از مرکز را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اختلاف در میدان جریان منجر به تفاوت در نرخ کاهش آلاینده‌گی و همچنین نسبت خروج به نشست خواهد شد.

در شکل ۸ (ب) تا حدودی تأثیر نوع دیفیوزر ورودی بر روی غلظت ذرات در ارتفاع و زمان مذکور مشاهده می‌شود که در پره ۳۰ درجه به واسطه سرعت هوای کمتر غلظت ذرات بیشتر در مرکز و غلظت کمتر در ناحیه دورتر وجود دارد. این رفتار در پره ۹۰ درجه برعکس بوده و دیفیوزر ۳۰-۹۰ رفتار میانه‌ای از خود نشان می‌دهد.

زاویه پره ۳۰ و ۹۰ درجه به خوبی جهت جریان را ایجاد کرده ولی به واسطه کم بودن ارتفاع پره، دیفیوزر با زاویه متغیر ۳۰-۹۰ درجه جهت‌گیری مناسب خود را ایجاد نکرده است. با توجه به الگوهای جریان نمایش داده شده در شکل ۶ انتظار می‌رود، حالت بدون دیفیوزر و دیفیوزر با زاویه ۹۰ درجه بیشترین تأثیر خود را در خروج آلودگی از وسط اتاق را دارند و در خروج ذرات از گوشه‌های اتاق مؤثر نیستند. در زوایای ۳۰ و ۳۰-۹۰ درجه انتظار می‌رود الگوهای جریان غلظت ذرات آلاینده را از گوشه‌های اتاق جاروب کند.

برای درک بهتر از اثر زاویه دیفیوزر بر توزیع غلظت ذرات، در شکل ۷ توزیع غلظت ذرات آلاینده در زمان ۱۰ ثانیه، که نشان‌دهنده میزان و گسترش آلاینده‌گی در اتاق می‌باشد، برای چهار حالت مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نواحی با سرعت بالای هوا که در راستای زاویه دیفیوزر ورودی هوا قرار دارند، کاهش آلاینده‌گی مشخص‌تر است. این اثر که به علت غالب بودن جابه‌جایی بر پخش قابل توجیه می‌باشد، باعث تفاوت توزیع آلاینده‌ها در اتاق در زمان‌های مختلف و همچنین تفاوت در نرخ خروج و نشست ذرات می‌شود.

توزیع غلظت به خوبی نشان می‌دهد که با توجه به کشیده‌شدن جریان هوا به سمت دیوارهای جانبی اتاق در زوایای ۳۰ و ۳۰-۹۰ درجه سرعت خروج بهتری نسبت به حالت بدون دیفیوزر و دیفیوزر با زاویه ۹۰ درجه داشته باشیم. البته در نمایش توزیع غلظت یک سری غیر یکنواختی دیده می‌شود که علت غیر یکنواختی توزیع در بعضی ناحیه‌ها به خصوص در زیر دیفیوزر، کوچک بودن سلول‌های محاسباتی به واسطه گرادین سرعت بالا و هندسه دیفیوزر می‌باشد که سبب می‌شود در بعضی سلول‌های همسایه اختلاف قابل

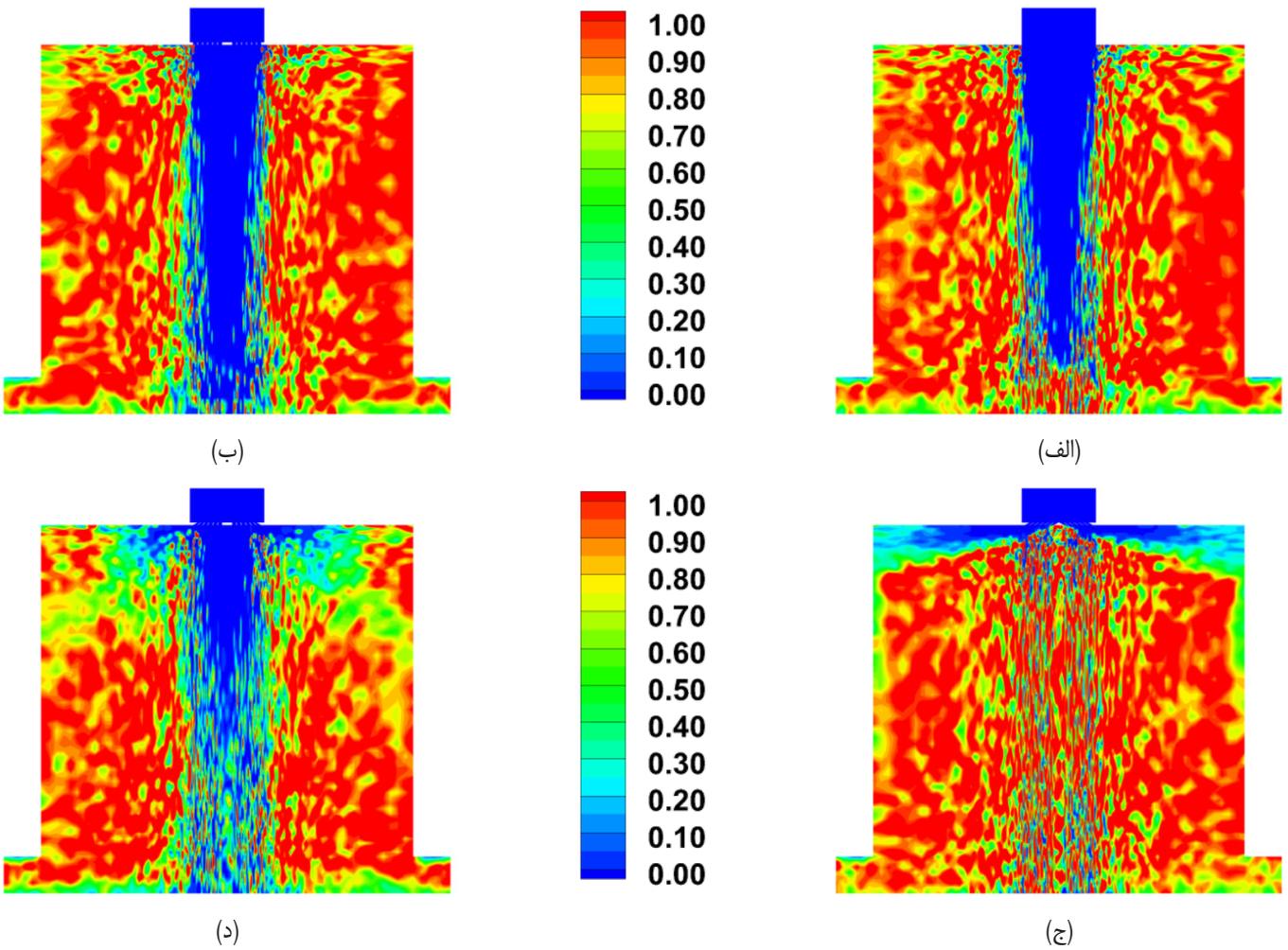


Fig. 7. Contaminant concentration contour at time 10s in the configuration of a) W/O, b)90, c)30 and d) 30-90 degree diffuser angle  
 شکل ۷: توزیع غلظت نرمالایز شده آلاینده‌ها در زمان ۱۰ ثانیه، (الف) بدون دیفیوزر، (ب) ۹۰ درجه، (ج) ۳۰ درجه، (د) دیفیوزر ۳۰-۹۰ درجه

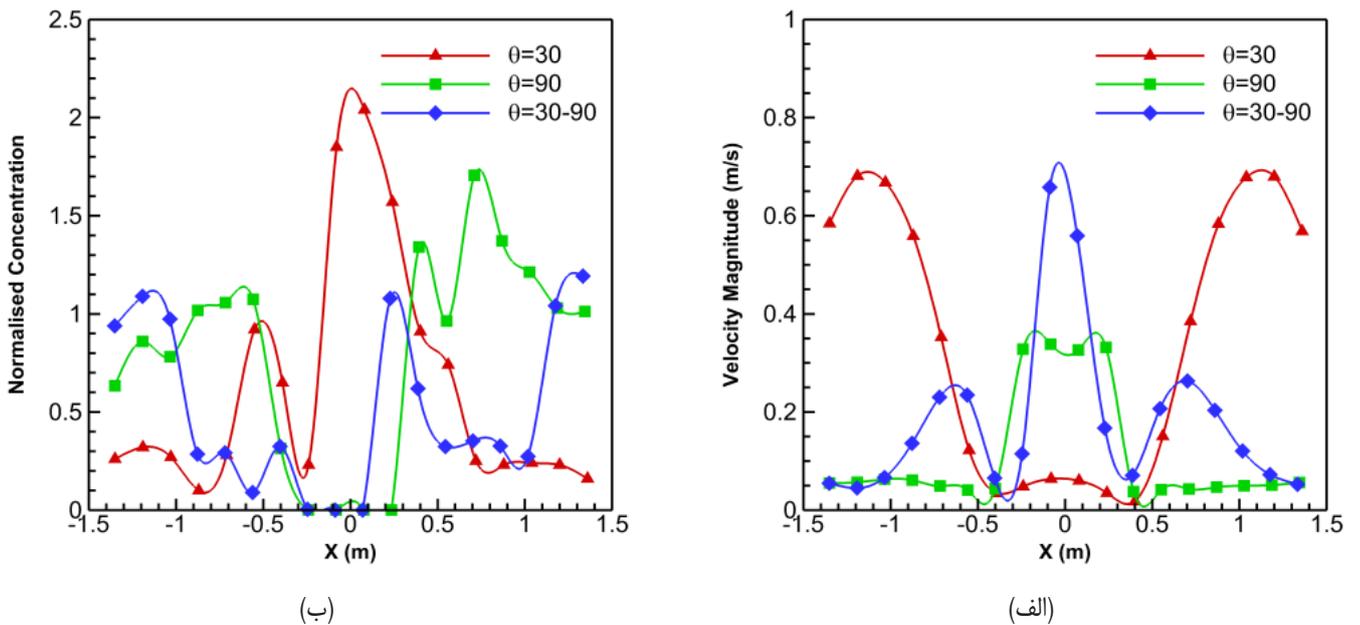
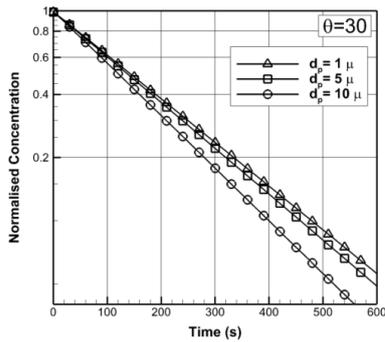


Fig. 8. Velocity profile and normalized concentration in the middle of the room at height of 280 cm for diffusers with different angles  
 شکل ۸: توزیع سرعت و غلظت نرمالایز شده در وسط اتاق و در ارتفاع ۲۸۰ سانتی متری برای دیفیوزرها با زوایای مختلف

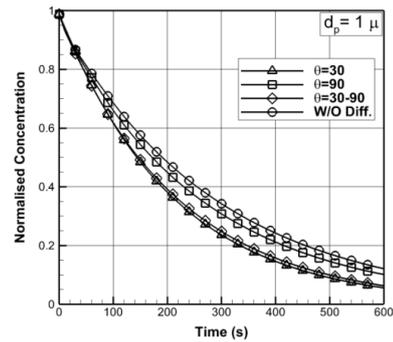
جدول ۳: درصد ذرات نشست کرده و خارج شده و نسبت خروج به نشست در زمان ۶۰۰ ثانیه

Table 3. The percentage of particles exited, deposited and the ratio at 600 seconds

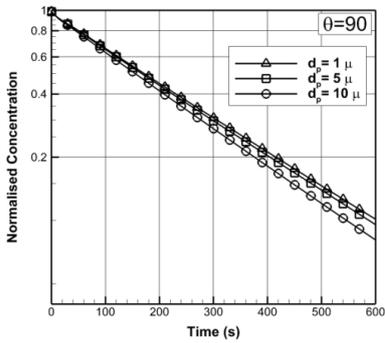
۳۰-۹۰		۳۰		۹۰		W/O Diff.		W/O Diff.		قطر ذره (میکرومتر)		
خروج به نشست	خروج	نشست	خروج به نشست	خروج	نشست	خروج به نشست	خروج	نشست				
۱/۷۷	۵۹/۸۰٪	۳۳/۸۲٪	۱/۷۸	۶۰/۳۸٪	۳۳/۹۸٪	۲/۲۱	۶۱/۸۲٪	۲۷/۹۷٪	۲/۶۲	۶۳/۵۵٪	۲۴/۲۵٪	۱
۱/۷۰	۵۹/۲۸٪	۳۴/۸۱٪	۱/۶۵	۵۹/۲۴٪	۳۵/۸۵٪	۲/۱۶	۶۱/۷۶٪	۲۸/۶۲٪	۲/۵۴	۶۳/۶۲٪	۲۵/۰۶٪	۵
۱/۵۱	۵۷/۲۲٪	۳۸/۰۱٪	۱/۳۱	۵۴/۸۸٪	۴۱/۹۷٪	۲/۰۰	۶۱/۲۱٪	۳۰/۶۶٪	۲/۲۵	۶۲/۹۲٪	۲۸/۰۲٪	۱۰



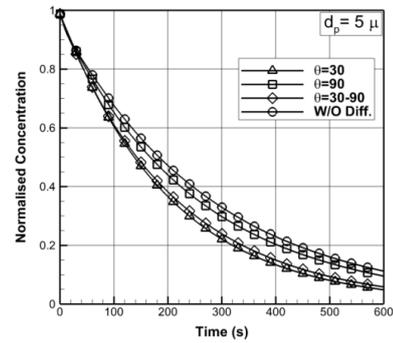
(الف)



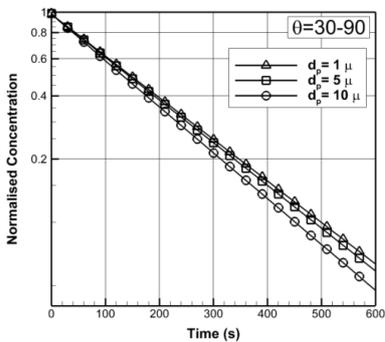
(الف)



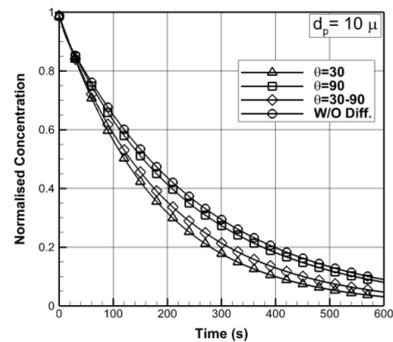
(ب)



(ب)



(ج)



(ج)

Fig. 10. Normalized concentration versus time of different configurations

شکل ۱۰: غلظت نرمال ذرات بر حسب زمان در قطرهای مختلف ذرات با دیفیوزر ۳۰، ۹۰ و ۳۰-۹۰ درجه

Fig. 9. Normalized concentration versus time of different particle diameter

شکل ۹: غلظت نرمال ذرات بر حسب زمان در هندسه‌های مختلف با قطر ذرات ۱، ۵ و ۱۰ میکرومتر

و توزیع غلظت ذرات برای زوایای مختلف، نتایج ذیل به دست آمد:

- بیشترین مقدار سرعت هوا در اتاق بدون دیفیوزر و دیفیوزر با زاویه ۹۰ درجه، در نواحی زیر دیفیوزر و برای دیفیوزر با زاویه ۳۰ درجه در نواحی کنار دیوارها مشاهده می‌شود که تأثیر مستقیم بر توزیع آلاینده‌ها می‌گذارد.
- از نقطه نظر نسبت خروج به نشست، حالت بدون دیفیوزر و دیفیوزر با زاویه ۹۰ درجه و از نقطه نظر نرخ کاهش ذرات آلاینده، دیفیوزر با زاویه ۳۰ و ۹۰-۳۰ درجه عملکرد مناسب‌تری دارند.
- بر اساس نسبت خروج به نشست، دیفیوزر ۹۰-۳۰ شرایط مناسب‌تری نسبت به دیفیوزر با زاویه ۳۰ درجه دارد.
- مقایسه قطرهای مختلف ذره (۱، ۵ و ۱۰ میکرون) نشان می‌دهد که، برای تمام زوایای پره، به علت حاکم شدن اثر نیروی گرانش، با افزایش قطر ذره درصد نشست زیاد شده و درصد خروج کاهش می‌یابد.

## منابع

- [1] R.H. Mohammed, A simplified method for modeling of round and square ceiling diffusers, *Energy and Buildings*, 64 (2013) 473-482.
- [2] B. Zhao, Y. Zhang, X. Li, X. Yang, D. Huang, Comparison of indoor aerosol particle concentration and deposition in different ventilated rooms by numerical method, *Building and Environment*, 39(1) (2004) 1-8.
- [3] J. Wang, T.T. Chow, Numerical investigation of influence of human walking on dispersion and deposition of expiratory droplets in airborne infection isolation room, *Building and Environment*, 46(10) (2011) 1993-2002.
- [4] P.V. Nielsen, *Description of supply openings in numerical models for room air distribution*, ASHRAE Transactions. Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, 1991.
- [5] H. Xu, J. Niu, A new method of CFD simulation of airflow characteristics of swirling floor diffusers, *Building simulation*, (2003) 429-1434.
- [6] J.J. Martinez-Almansa, A. Fernandez-Gutierrez, L. Parras, C. del Pino, Numerical and experimental study of a HVAC wall diffuser, *Building and Environment*, 80 (2014) 1-10.
- [7] E., Djunaedy, K.W.D. Cheong, Development of a simplified technique of modelling four-way ceiling air supply diffuser, *Building and Environment*, 37(4) (2002) 393-403.
- [8] Y. Huo, F. Haghigat, J. Zhang, C. Shaw, A systematic approach to describe the air terminal device in CFD simulation for room air distribution analysis, *Building*

مقایسه میزان خروج ذرات در طول زمان با تعریف غلظت متوسط ذرات در کل اتاق در هر زمان قابل انجام می‌باشد. این پارامتر با غلظت اولیه ذرات در اتاق بی بعد شده و با عنوان غلظت نرمال معرفی می‌گردد. شکل ۹ نحوه تغییر غلظت نرمال ذرات را در طول زمان برای قطرهای ۱، ۵ و ۱۰ میکرون جهت مقایسه هندسه‌های مختلف مورد مطالعه، به تصویر می‌کشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای تمامی قطرهای، نرخ کاهش ذرات اولیه در اتاق به نحوی است که مقدار ذرات موجود در اتاق به صورت نمایی با زمان کاهش می‌یابد به این صورت که در ابتدا مقدار کاهش بیشتر بوده و با گذر زمان کمتر شده و به صفر میل می‌کند. از آنجا که رفتار منحنی‌ها به صورت نمایی می‌باشند، در شکل ۱۰ این پارامتر به صورت نمایی به جهت مقایسه نرخ کاهش آلاینده‌ها در قطرهای مختلف مورد مطالعه نمایش داده شده است. بنابر مقایسه صورت گرفته در این شکل‌ها، دیفیوزر با زاویه پره ۳۰ و ۹۰-۳۰ درجه با سرعت بالاتری نسبت به حالت بدون دیفیوزر و دیفیوزر با زاویه ۹۰ درجه، قادر به کاهش آلاینده‌ها در اتاق هستند، که می‌تواند ناشی از در بر گرفتن فضای بیشتری از اتاق بواسطه جهت خروج هوا از دیفیوزر باشد. برای تمامی قطرهای حالت بدون دیفیوزر کمترین و دیفیوزر با زاویه پره ۳۰ درجه بیشترین نرخ خروج ذرات را در میان حالات مورد مطالعه نشان می‌دهد. علاوه بر این، برای مقایسه اثر قطر ذره، جدول ۳، درصد ذرات نشست کرده و خارج شده و همچنین نسبت خروج به نشست را در زمان ۶۰۰ ثانیه برای هندسه‌های مختلف و قطر ذرات ۱، ۵ و ۱۰ میکرومتر نشان می‌دهد. برای تمام زوایای پره، به علت حاکم شدن اثر نیروی گرانش، با افزایش قطر ذره درصد نشست افزایش و درصد خروج کاهش می‌یابد. البته زاویه پره‌ای مناسب می‌باشد که دارای سرعت خروج بالاتر بوده و همچنین درصد ذرات خارج شده بیشتر و ذرات نشست کرده کمتر (نسبت خروج به نشست بالاتر) باشد. براساس جدول ۳، با افزایش قطر از ۱ تا ۱۰ میکرون درصد خروج به نشست برای تمامی هندسه‌ها کم می‌شود و این مهم به علت آن است که با افزایش قطر، اثر نیروی گرانش زیاد شده و ذرات تمایل به نشست بیشتری دارند. همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد، نرخ تخلیه آلودگی در اتاق با دیفیوزر با زاویه پره ۳۰ و ۹۰-۳۰ درجه نسبت به حالت بدون دیفیوزر و دیفیوزر با زاویه ۹۰ درجه، بیشتر است. مقایسه نسبت خروج به نشست بین دیفیوزر با زاویه پره ۳۰ و ۹۰-۳۰ درجه نشان می‌دهد، برای قطر ۱ میکرون این نسبت برابر ولی برای قطر ۵ و ۱۰ میکرون، دیفیوزر با زاویه پره ۹۰-۳۰ تقریباً ۳ و ۱۵ درصد بیشتر از دیفیوزر با زاویه پره ۳۰ درجه می‌باشد.

## ۶- جمع بندی

جهت مدل‌سازی عددی اثر زاویه دیفیوزر سقفی چهار طرفه مربعی بر انتشار و توزیع ذرات آلاینده در یک اتاق آلوده، جریان دوفاز گاز-ذره با رویکرد اولپری-لاگرانژی بر روی سیستم تهویه مورد بررسی قرار گرفته است. جهت این مهم، اتاق تهویه شونده بدون دیفیوزر و با دیفیوزر با زاویه‌های پره ۳۰، ۹۰، ۹۰-۳۰ درجه مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس مقایسه الگوهای جریان

- Part B Fundamentals*, 28(3) (1995) 353-369.
- [15] V. Yakhot, S.A. Orszag, S. Thangam, T.B. Gatski, C.G. Speziale, Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7) (1992) 1510.
- [16] S. Sadrizadeh, A. Tammelin, P. Ekolind, S. Holmberg, Influence of staff number and internal constellation on surgical site infection in an operating room, *Particuology*, 13 (2014) 42-51.
- [17] Ansys Fluent 15.0, Ansys Inc., 2013.
- [18] F. Chen, S.C.M. Yu, A.C.K. Lai, Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model, *Atmospheric Environment*, 40(2) (2006) 357-367.
- [19] J. Eslami, A. Abbassi, M.H. Saidi, M. Bahrami, Effect of supply/exhaust diffuser configurations on the contaminant distribution in ultra clean environments: Eulerian and Lagrangian approaches, *Energy and Buildings*, 127 (2016) 648-657.
- and Environment*, 35(6) (2000) 563-576.
- [9] B. Sajadi, M.H. Saidi, A. Mohebbian, Numerical investigation of the swirling air diffuser: Parametric study and optimization, *Energy and Buildings*, 43(6) (2011) 1329-1333.
- [10] J. Srebric, Q. Chen, Simplified numerical models for complex air supply diffusers, *HVAC and R Research*, 8(3) (2002) 277-294.
- [11] E. Tavakoli, R. Hosseini, Large eddysimulation of turbulent flow and mass transfer in far-field of swirl diffusers, *Energy and Buildings*, 59 (2013) 194-202.
- [12] S. Burhan Cuhadaroglu, A CFD analysis of air distributing performance of a new type HVAC diffuser, *CLIMAMED*, (2015).
- [13] K., Zhong, X., Yang, Y. Kang, Effects of ventilation strategies and source locations on indoor particle deposition, *Building and Environment*, 45(3), (2010) 655-662.
- [14] Q. Chen, Comparison of different k-epsilon models for indoor air flow computations, *Numerical Heat Transfer*,

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

J. Eslami, A. Abbassi, M. H. Saidi, M. Saidi, Numerical Comparison of the Effect of Constant and Variable Angle Air Diffuser on the Flow Field and Contaminant Dispersion in a Ventilated Room, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(4) (2018) 873-882.

DOI: 10.22060/mej.2017.11901.5212

