



اعتبار سنجی مدل شبیه‌سازی الگوی جریان هوا در اتاق‌های پاک: مطالعه موردی در صنعت دارویی

ذیح الله دمیری^۱، رسول یاراحمدی^{۲*}، میترا رشیدی^۳

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۸

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۲۸

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۲۰

چکیده

زمینه و هدف: غلظت ذرات هوابرد درون اتاق پاک به دلیل ایفای نقش مهم در تولید داروها و محصولات با تکنولوژی بالا، تحت کنترل می‌باشد. الگوی جریان هوا یکی از پارامترهای مهم و مؤثر در غلظت ذرات و توزیع آلودگی درون اتاق‌های پاک می‌باشد، از این‌رو، شبیه‌سازی دقیق جریان هوا درون اتاق‌های پاک حائز اهمیت می‌باشد. بنابراین در این مطالعه ارزیابی و شبیه‌سازی الگوی جریان هوا در اتاق‌های پاک مورد بررسی قرار گرفت.

روش بررسی: مطالعه حاضر یک پژوهش تجربی-کاربردی است که در سال ۱۳۹۴ در یک صنعت دارویی انجام شد. روش انجام کار در این مطالعه، بررسی تعیین الگوی جریان هوا در اتاق پاک می‌باشد. در این مطالعه، ۳ اتاق پاک مربوط به ۳ کلاس پاکیزگی C, B و D مورد بررسی قرار گرفت. سپس، بهمنظور تعیین بردارهای سرعت، الگوی جریان هوا در اتاق پاک، با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسبه‌ای (CFD) شبیه‌سازی گردید.

یافته‌ها: یافته‌های این مطالعه نشان داد که سرعت جریان هوای اندازه‌گیری شده در مدل تجربی، در فواصل افقی و عمودی مختلف با سرعت‌های جریان هوا پیش‌بینی شده توسط نرم افزار Fluent در شرایط مشابه و در فواصل بیکسان بسیار نزدیک به هم می‌باشد. همچنین کانتورهای سرعت جریان هوا برای ۳ کلاس پاکیزگی تعیین گردید. بعلاوه، نتایج سنجش غلظت ذرات در اتاق‌های پاک، نشان داد که میانگین تراکم آلودگی ذرات در سه کلاس پاکیزگی، پایین‌تر از حد مجاز استاندارد ایزو ۱۴۶۴۴ (سال ۲۰۰۵) می‌باشد.

نتیجه‌گیری: این مطالعه نشان داد که مدل آشفتگی K-4 RNG مناسب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی الگوی جریان هوا در اتاق پاک می‌باشد. همچنین وجود ابزار و تجهیزات موجود در اتاق پاک بر الگوی جریان هوا و در نهایت بر راندمان حذف ذرات در اتاق پاک تأثیر می‌گذارد.

کلیدواژه‌ها: مدل آشفتگی K-4 RNG، اتاق پاک، جریان هوا، فلوئنت.

دارد(۳). منابع تولید آلودگی در اتاق‌های پاک به دو دسته منابع خارجی و داخلی تقسیم‌بندی می‌گردد. این آلودگی‌ها معمولاً ذرات، میکرووار گانیسم‌های زنده، آلودگی‌های گازی و سایر آلودگی‌های میکرونی موجود در محیط‌های طبیعی می‌باشند. اما مهم‌ترین منابع تولید آلودگی در اتاق‌های پاک، منابع داخلی می‌باشد. این آلودگی‌ها را می‌توان از طریق فیلتراسیون جریان هوای ورودی، تنظیم فشار هوا و همچنین جلوگیری از نشتی فیلترها کنترل نمود(۴). این منابع آلودگی شامل پرسنل مستقر در اتاق پاک، فرآیند و واکنش‌های پروسه تولید و ابزار آلات و دستگاه‌های تولید می‌باشند. در اتاق‌های پاکی که محصولات حساس به آلودگی‌های میکرونی تولید می‌شود باید میان انسان و محصول یک مانع ایجاد گردد تا آلودگی ناشی از

مقدمه
اتاق‌های پاک محیط‌هایی هستند که در آن‌ها غلظت ذرات هوابرد و چندین پارامتر مهم دیگر نظریه دما، فشار و رطوبت تحت کنترل می‌باشد. این اتاق‌ها به نحوی ساخته و مورد استفاده قرار می‌گیرند که تولید و بقاء ذرات در درون آن‌ها به حداقل برسد (۱). اتاق‌های پاک برای به حداقل رساندن آلودگی و غلظت ذرات موجود در هوا استفاده می‌گردد و در داروسازی، تجهیزات پزشکی، مواد غذایی و صنایع دیگر کاربرد دارد (۲). افراد حاضر در محیط کار نیز از خود ذراتی ساطع می‌کنند که ناشی از پوست بدن، وسائل آرایشی و بهداشتی مورد استفاده و همچنین بخارات ناشی از تنفس می‌باشد. غلظت ذرات هوابرد در اتاق‌های پاک، به نوع فعالیتی که در اتاق پاک انجام می‌گیرد بستگی

۱- کارشناس ارشد بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

۲- (نویسنده مسئول) عضو مرکز تحقیقات آلودگی هوا، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

۳- کارشناس ارشد بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران.

روش‌ها و تکنیک‌های علمی و به روز پایش، ارزیابی و کنترل می‌گردد (۱۱-۱۳). الگوی جریان هوا در اتاق‌های پاک یکی از پارامترهای مهم است که در غلظت ذرات و توزیع آلودگی نقش دارد و لازم است که جریان هوا به طور دقیق الگوسازی شود که این امر نیاز به صرف زمان و هزینه دارد و به طور دقیق نیز ممکن است رخ ندهد. بنابراین استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی^۳ برای الگوسازی جریان هوا می‌تواند باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه شود (۱۴). حل یک مسئله به روش CFD شامل دو مرحله اصلی است. ابتدا کل فضای سیال به اجزای کوچک (مش)^۴ تقسیم می‌شود، آنگاه معادله‌های مشتقات جزئی بیانگر جریان بر تمام این مشاهدها اعمال می‌شود. مدل‌های بسیاری برای مدل کردن آشفتگی در جریان‌های آشفته ارائه شده است (۱۵). یکی از معترض‌ترین مدل‌های ارائه شده، مدل k-e است که کارایی آن در مدل‌سازی جریان‌های متلاطم اثبات رسیده است. مدل RNG k-e یک نمونه اصلاح شده این مدل می‌باشد (۱۶). این مدل متداول‌ترین مدل آشفتگی است که به علت اقتصادی بودن و دقت مناسب برای دامنه وسیعی از جریان‌های آشفته کاربرد دارد. در سال ۲۰۱۳ مطالعه‌ای با عنوان کاربرد CFD در طراحی اتاق‌های پاک توسط چن و همکارانش انجام شد و به این نتیجه رسیدند که ریتن‌های دیواری راند مان بالاتری در حذف ذرات دارد (۱۷). مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۰۲ تحت عنوان محاسبه جریان هوا در یک اتاق تمیز در مقیاس پایلوت با استفاده از مدل‌های توربولانس K-e RNG نشان داد که مدل K-e برای محاسبه جریان هوا در اتاق‌های پاک مناسب است (۱۸). توماس کوهن الگوی جریان هوا و آلودگی ذرات را در یک اتاق پاک مورد مطالعه قرار داد و به این نتیجه رسید که غلظت ذرات موجود در اتاق پاک به مقدار بسیار زیاد وابسته به الگوی جریان هوا اتاق پاک می‌باشد (۱۹). در سال

پرسنل بر محصولات اثر سوء بر جای نگذارد. جداسازی اپراتور از محصولات می‌تواند توسط گارمنت‌ها صورت گیرد. این لباس‌ها به نحوی طراحی می‌گردد که از رهاسازی ذرات تولیدشده توسط بدن انسان تا حد امکان جلوگیری به عمل آورد لذا یکی از راه‌های مؤثر در کنترل آلودگی‌های ایجاد شده توسط انسان می‌باشد (۵). مسیر اصلی انتقال آلودگی میکروبی به انسان در اتاق پاک از طریق تماس با سطوح آلوده می‌باشد (۶). یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در اتاق پاک مربوط به آلودگی‌های ناشی از ذرات می‌باشد. به منظور حل این مشکل، بسیاری از شرکت‌های تولیدکننده برای کنترل ذرات موجود در اتاق پاک محصولات خود را با سیستم‌های توزیع کننده هوا تطبیق می‌دهند (۷). آلودگی ممکن است توسط ذرات موجود در فضای باز و همچنین توسط فعالیت فیزیکی اپراتور ایجاد شود. بنابراین انسان منبع اصلی آلودگی در یک اتاق تمیز می‌باشد، انتخاب اشتباہ جنس پارچه، نوع و شکل گارمنت ممکن است اثرات منفی در برنا مهربانی سیستم داشته باشد. جنس لباس کار در اتاق پاک از نوع پلی استر می‌باشد اما گاهی لباس کار از جنس لیف ذراتی از خود آزاد می‌کنند و باعث آلوده شدن اتاق‌های پاک به ذرات می‌باشد (۸). نرخ پراکندگی آلودگی از پرسنل و ماشین آلات موجود در اتاق پاک به تأثیر توزیع کننده‌های هوا، میزان رقیق‌سازی آلودگی توسط جریان هوا موجود در اتاق پاک و همچنین تنوع غلظت هوایی دارد (۹). انتخاب الگوی جریان هوا، مرحله‌ای مهم در طراحی اتاق‌های پاک می‌باشد زیرا جریان هوا و نحوه انتشار آن مهم‌ترین عامل در کنترل ذرات هوایی می‌باشد (۱۰). الگوی جریان هوا در اتاق پاک می‌تواند متلاطم^۱ و تک‌سویه^۲ (لایه‌ای) باشد. در جریان توربولانسی توده‌ی هوا ورودی به اتاق دارای سرعت‌های متفاوت و در جهات مختلف می‌باشد. ذرات موجود در هوا از طریق گردش در جهات مختلف خارج می‌شوند و آلودگی‌های گازی از طریق

^۳ Computational Fluid Dynamics

^۴ Mesh

^۱ NonUni directional flow

^۲ Uni directional flow



۳- پمپ تزریق با فشار مثبت^۵
 مارک: DOP SOLUTIONS. UK بمنظور
 تزریق جریان آئروسل های تولیدشده^۶
 ۴- دستگاه شمارش گر ذرات^۷
 مارک: CLIMET – USA بمنظور اندازه گیری
 غلظت ذرات.

اولین پارامترهای عملکردی اتاق پاک، تست هواگذر می‌باشد. استفاده از دستگاه هود قرائت مستقیم بهترین روش برای اندازه گیری هواگذر، حجم و سرعت جریان هوای ورودی به اتاق پاک می‌باشد. دهانه‌ی هود باید به نحوی بر روی قاب فیلتر قرار گیرد تا تمامی جریان هوای خروجی از فیلتر را اندازه گیری نماید (۳). همچنین میزان نرخ توزیع جریان هوا در اتاق پاک از رابطه زیر بدست می‌آید.

(۱)

$$\text{Rate of Air Change} = \frac{Q}{V}$$

Q: کل حجم هوای ورودی به اتاق پاک بر حسب V: حجم اتاق پاک (m³) (۲۳).

برای تعیین الگوی جریان هوا در اتاق پاک مربوطه ابتدا با استفاده از تکنیک CFD^۸ نرم افزار فلوئنت الگوی جریان هوا شبیه سازی گردید و سپس نتایج حاصل از شبیه سازی الگوی جریان هوا با نمایش الگوی جریان در اتاق پاک به صورت عملی مقایسه کیفی گردید تا بتوان الگوی جریان هوا را در اتاق پاک نشان داد. برای شبیه سازی جریان هوا با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسبه ای، ابتدا باید هندسه اتاق پاک را به صورت ۲ بعدی در نرم افزار گمبیت (Gambit) رسم گردد و سپس هندسه اتاق پاک را به عنوان ورودی به نرم افزار فلوئنت انتقال داد و سپس آن را شبیه سازی کرد. پس از شبیه سازی الگوی جریان هوا در اتاق پاک با استفاده از نرم افزار فلوئنت، درنهایت الگوی جریان هوا را به صورت عملی

۲۰۰۵ مطالعه‌ای تحت عنوان بررسی عددی در انتشار ذرات در اتاق‌های پاک توسط جانهو^۹ و همکارانش انجام شد. نتایج نشان داد که حالت تهويه، محل منبع ذرات و نرخ توزیع هوا می‌تواند توزیع ذرات در یک اتاق تمیز را تحت تأثیر قرار دهد (۲۰). در سال ۲۰۱۰ مطالعه‌ای تحت عنوان تأثیر چیدمان تهويه در حذف ذرات در اتاق‌های پاک توسط تونگ^{۱۰} و همکارانش انجام شد و نتایج نشان داد که نرخ حذف ذرات در اتاق پاک به طور قابل توجهی به تجهیزات و مساحت پوشش داده شده توسط تجهیزات، طراحی تهويه، و اندازه ذرات بستگی دارد (۲۱).

هدف از این مطالعه ارزیابی تست‌های سرعت و هواگذر ورودی، تعیین الگوی جریان هوا و بررسی غلظت و تعداد ذرات هوابرد در اتاق‌های پاک مطابق با استاندارد ISO ۱۴۶۴۴ و همچنین مدل سازی و اعتبار بخشی الگوی جریان هوا در اتاق‌های پاک با استفاده از ابزار RNG k-e Fluent و مدل آشفتگی RNG در یک صنعت دارویی در داخل کشور می‌باشد (۲۲).

روش بررسی

مطالعه حاضر یک پژوهش تجربی-کاربردی می‌باشد که در سال ۱۳۹۴ در یک صنعت دارویی انجام شد. روش انجام کار در این مطالعه بررسی تعیین الگوی جریان هوا در اتاق پاک می‌باشد.

تجهیزات مورد استفاده در این مطالعه به شرح زیر بود:

۱- دستگاه هود قرائت مستقیم^{۱۱}
 مارک: KIMO – FRANCE بمنظور اندازه گیری هواگذر و سرعت جریان هوا
 ۲- دستگاه آئروسل جنراتور^{۱۲}
 مارک: DOP SOLUTIONS. UK بمنظور تولید ذرات زیر میکرونی برای تعیین الگوی جریان هوا در اتاق پاک

⁵ Positive injection pump

⁶ Particle counter

⁷ Computational Fluid Dynamics

¹ Jun Wu

² Tung Y-C

³ Direct Reading Hood

⁴ Aerosol generator

برای کلاس بندی اتاق پاک، باید نمونه های کافی از جریان هوای اتاق پاک گرفته شود و تعداد و اندازه ذرات موجود در آن مشخص گردد. تعداد نقاط نمونه برداری از جریان هوا با توجه به مساحت اتاق پاک و سطح پاکیزگی آن تعیین می گردد. هرچه اتاق پاک ابعاد بزرگتر و پاکیزگی بالاتری داشته باشد، نقاط اندازه گیری نیز به مراتب بیشتر می شود. روش تعیین تعداد نقاط نمونه برداری با استفاده از استاندارد ISO ۱۴۶۴۴-۱ رابطه زیر محاسبه شد.

$$N_L = \sqrt{A} \quad (3)$$

N_L : حداقل نقاط نمونه برداری؛ مساحت اتاق پاک یا محیط کنترل شده (بر حسب m^2)
تعداد ذرات در هر نقطه بر حسب تعداد ذره در هر متر مکعب هوا سنجش می گردد. همچنین نمونه ها در ارتفاعی که کار انجام می شود، تهیه می گردد. در نهایت تعداد ذرات سنجش شده با مقدار استاندارد ISO ۱۴۶۴۴ مقایسه می گردد (۱، ۲۴).

در این مطالعه ۳ اتاق پاک مربوط به کلاس های پاکیزگی C.B D مورد بررسی قرار گرفت. هندسه آن ها به صورت ۲ بعدی رسماً گردید. توزیع کننده های هوا^۳ در سقف قرار دارند و هوا را به صورت توربلانس وارد اتاق پاک می کنند و خروجی^۳ هوا بر روی دیوار و در فاصله ۲۰ سانتیمتری از کف اتاق پاک قرار دارند. تعداد مس ها برای کلاس پاکیزگی B برابر ۹۶۱۷، برای کلاس پاکیزگی C برابر ۵۹۶۹ و برای کلاس پاکیزگی D برابر ۲۴۰۶ می باشد. در اتاق پاک با کلاس پاکیزگی B دو دستگاه و در اتاق پاک کلاس پاکیزگی C یک دستگاه موجود می باشد و اتاق پاک کلاس پاکیزگی D هیچ ابزار و تجهیزاتی موجود نمی باشد که یکی از دلایل انتخاب این اتاق پاک بررسی و تأثیر ابزار و تجهیزات بر روی الگوی جریان هوا و همچنین راندمان حذف ذرات می باشد.

یافته ها

مقدار سرعت جریان هوا در فوایل مختلف برای ۳

و با استفاده از آئروسل هایی که آلودگی نداشته باشد، نمایش می دهیم (۳).

آئروسل ها توسط دستگاه آئروسل جنراتور تولید می گردد و تزریق جریان آئروسل های بوسیله لوله های افشاره^۱ در دهانه فیلتر در داخل اتاق پاک صورت می گیرد. فرآیند نمایش الگوی جریان هوا نیز به صورت عملی توسط دوربین فیلم برداری ضبط می گردد. در نهایت نتایج حاصل از شبیه سازی با استفاده از نرم افزار فلوئنت با نتایج حاصل از نمایش الگوی جریان هوا به صورت عملی، به طور کیفی مقایسه می گردد و الگوی جریان هوا در اتاق پاک تعیین می گردد (۳).

مهم ترین تستی که برای ارزیابی کیفیت هوا و طبقه بندی اتاق های پاک انجام می گیرد، تست شمارش ذرات هوایبرد می باشد. قبل از اینکه این تست را در اتاق پاک بتوان انجام داد باید تست نشتی فیلتر ها انجام شده باشد و نتایج قابل قبولی ارائه داده باشد تا بتوان تست شمارش ذرات بعنوان تست نهایی انجام داد. غلظت ذرات هوایبرد در اتاق های پاک در سه وضعیت مختلف اندازه گیری می شود که در استاندارد ISO ۱۴۶۴۴ بدین صورت تعریف می شود: در هنگام ساخت، در حال استراحت و در حال کار.

در این مطالعه، اندازه گیری غلظت ذرات هوایبرد در شرایط در حال استراحت و مطابق با استاندارد ISO ۱۴۶۴۴ انجام شد. تعیین کلاس اتاق پاک در استاندارد ISO ۱۴۶۴۴-۱ از طریق معادله زیر صورت می گیرد.

(2)

$$C_n = 10^N \times \left(\frac{0.1}{D} \right)^{2.08}$$

C_n : حداکثر غلظت قابل قبول از ذرات هوایبرد (بر حسب تعداد ذرات در هر متر مکعب هوا)

N: عدد کلاس بندی استاندارد ISO از ۱ تا ۹

D: اندازه ذره مورد نظر بر حسب میکرومتر.

0/1: عدد ثابت.

³ Return

¹Sprague pipes

² Supply air



آزمون رگرسیون از طریق اختلاف R^2 حاصل از معادله خط بین دو نمودار، در مورد میزان همگرایی نتایج آزمایشگاهی و فلوئنت قضاوت شد.

در شکل شماره ۱ نمودار مقایسه سرعت جریان هوا در فاصله عمودی ثابت $z = 0$ و در فواصل مختلف افقی بین مدل آزمایشگاهی و فلوئنت (کلاس پاکیزگی B) نشان داده شده است. نتایج آزمون همبستگی، با ضریب همبستگی $0.93 / 0.90$ درصد نشان دهنده وجود همبستگی مناسب نتایج فلوئنت و آزمایشگاهی در فاصله ذکر شده می‌باشد. همچنین اختلاف ضرائب R^2 بین نمودار آزمایشگاهی و فلوئنت، نشان دهنده $0.09 / 0.08$ اختلاف می‌باشد.

در شکل شماره ۲ نمودار مقایسه سرعت جریان هوا در فاصله عمودی ثابت $z = 1/5$ و در فواصل مختلف افقی بین مدل آزمایشگاهی و فلوئنت (کلاس پاکیزگی C) را نشان می‌هد. نتایج آزمون همبستگی، با ضریب همبستگی $0.94 / 0.90$ درصد نشان دهنده وجود همبستگی مناسب نتایج فلوئنت و آزمایشگاهی در فاصله ذکر شده می‌باشد. اختلاف ضرائب R^2 بین

اتاق پاک در ۳ مرحله اندازه گیری گردید و در نهایت میانگین سرعت در آن نقطه به عنوان مبنا در نظر گرفته شد که مقادیر آن در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

مقدار کل هواگذر ورودی و خروجی و همچنین نرخ توزیع جریان هوا در اتاق پاک با توجه به مساحت اتاق پاک مورد بررسی قرار گرفت و در جدول شماره ۲ ذکر شده است.

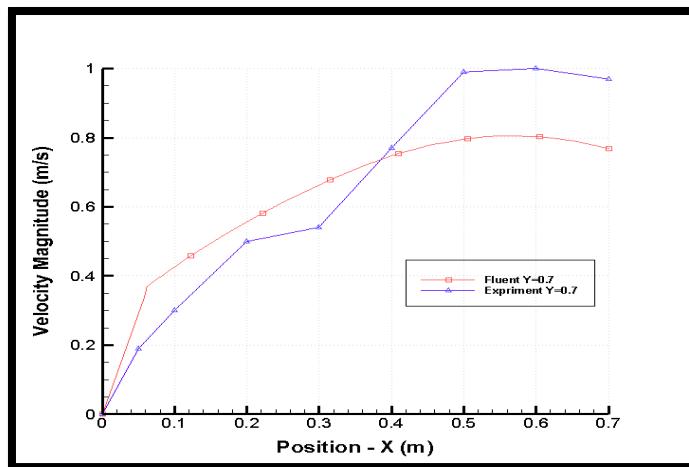
همگرایی نتایج حاصل از پیش بینی های فلوئنت با نتایج آزمایشگاهی، به منظور اعتبار سنجی مدل در نظر گرفته شد. برای این منظور، سرعت جریان هوا اندازه گیری شده در مدل تجربی، در فواصل افقی و عمودی مختلف با سرعت های جریان هوا پیش بینی شده تو سط نرم افزار فلوئنت در شرایط مشابه و در فواصل یکسان با مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت به منظور تعیین همگرایی بین نتایج شبیه سازی فلوئنت و آزمایشگاهی، آزمون همبستگی و تحلیل رگرسیون خطی برای هر کدام از نمودارهای الگوی جریان هوا انجام گرفت. در آزمون همبستگی، ضریب 2 و در

جدول ۱- مقادیر سرعت جریان هوا اندازه گیری شده در فواصل مختلف برای سه کلاس پاکیزگی

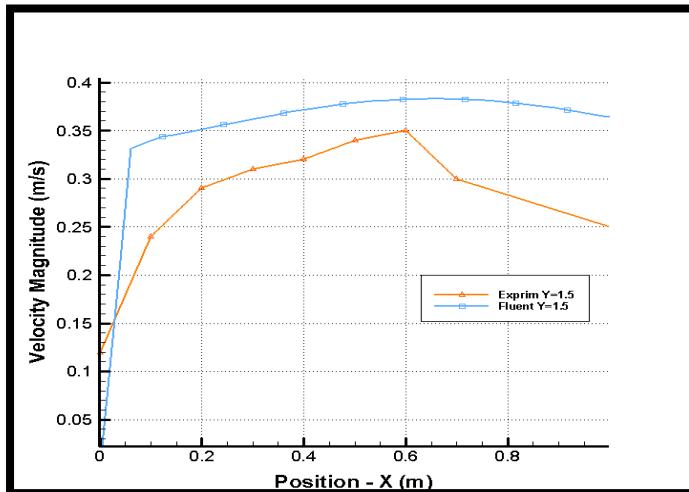
تعداد نقاط اندازه گیری	ارتفاع اندازه گیری (برحسب متر)	میانگین سرعت (m/s ± SD)	ارتفاع اندازه گیری (برحسب متر)	میانگین سرعت (m/s ± SD)	ارتفاع اندازه گیری (برحسب متر)	میانگین سرعت (m/s ± SD)	ارتفاع اندازه گیری (برحسب متر)	میانگین سرعت (m/s ± SD)
	کلاس B	کلاس C	کلاس C	کلاس C	کلاس B	کلاس B	کلاس B	کلاس D
۱	۰/۰۵ (±۰/۰۱)	۲	۰/۱۲ (±۰/۰۷)	۰	۰	۰	۰	۰/۴۵ (±۰/۰۱)
۲	۰/۰۶ (±۰/۰۵)	۲/۱	۰/۲۴ (±۰/۰۴)	۰/۱	۰/۱۹ (±۰/۰۴)	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۷ (±۰/۰۲)
۳	۰/۰۷ (±۰/۰۴)	۲/۲	۰/۲۹ (±۰/۰۹)	۰/۲	۰/۰۳ (±۰/۰۲)	۰/۱	۰/۱	۰/۰۷ (±۰/۰۲)
۴	۰/۰۸ (±۰/۰۵)	۲/۳	۰/۳۱ (±۰/۱)	۰/۳	۰/۰۵ (±۰/۰۴)	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۷ (±۰/۰۴)
۵	۰/۰۸ (±۰/۰۴)	۲/۶	۰/۳۲ (±۰/۱۲)	۰/۴	۰/۰۴ (±۰/۰۴)	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۷ (±۰/۰۳)
۶	۰/۰۹ (±۰/۰۳)	۲/۷	۰/۳۴ (±۰/۰۲۵)	۰/۵	۰/۰۷۷ (±۰/۰۷)	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۷ (±۰/۰۲)
۷	۰/۰۹ (±۰/۰۶)	۲/۸	۰/۳۵ (±۰/۰۱)	۰/۶	۰/۰۹۹ (±۰/۰۹)	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۷ (±۰/۰۶)
۸	۰/۱ (±۰/۰۷)	۲/۹	۰/۳ (±۰/۰۲)	۰/۷	۱ (±۰/۰۵)	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۷ (±۰/۰۱)
۹	۰/۰۵ (±۰/۰۱)	۳	۰/۰۲۵ (±۰/۰۶)	۱	۱/۱ (±۰/۰۶)	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۵ (±۰/۰۱)

جدول ۲- مشخصات اتاق های پاک مورد بررسی

نام کلاس پاکیزگی	پارامترهای عملکردی	تعداد ورودی	تعداد خروجی	هوایگر ورودی (m ³ /hr)	هوایگر خروجی (m ³ /hr)	حجم اتاق پاک (m ³)	نرخ توزیع هوا در هر ساعت
B		۵	۴	۴۱۶۰	۴۰۵۶	۴۹	۸۵
C		۳	۴	۲۱۲۰	۲۲۰۳	۴۳	۴۹
D		۶	۴	۲۸۸۰	۳۰۳۶	۶۵	۴۵



شکل ۱- مقایسه مقدار سرعت جریان هوا در فاصله ثابت $y=0.7$ بین مدل آزمایشگاهی و فلوئنت (کلاس پاکیزگی B)



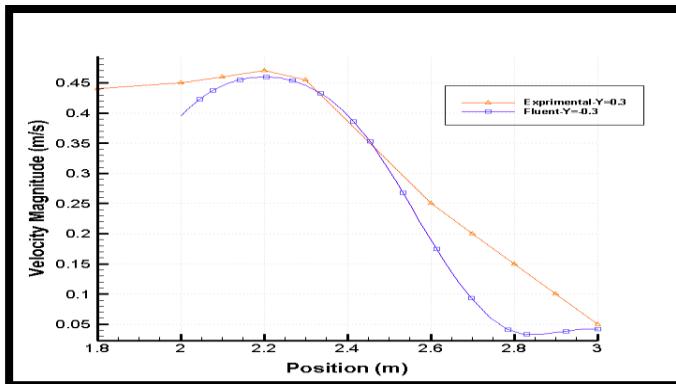
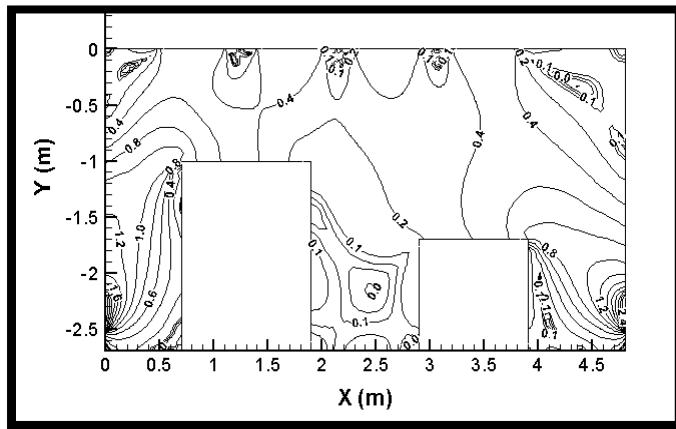
شکل ۲- مقایسه مقدار سرعت جریان هوا در فاصله ثابت $y=1.5$ بین مدل آزمایشگاهی و فلوئنت (کلاس پاکیزگی C)

فواصل افقی مختلف بین مدل آزمایشگاهی و فلوئنت نیز محاسبه گردید. اختلاف ضرائب R^2 بین نمودار آزمایشگاهی و فلوئنت، نشان دهنده ۰.۰۵٪ اختلاف می باشد.

در شکل شماره ۴ کانتور های سرعت جریان هوا برای کلاس های پاکیزگی B نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است در ورودی جریان هوا کانتور سرعت با مقدار کمتر و در خروجی ها کانتور های سرعت، افزایش بیشتری را نشان می دهد که ناشی از افزایش میزان سرعت جریان هوا هنگام خروج

نمودار آزمایشگاهی و فلوئنت، نشان دهنده ۰.۱۴۵٪ اختلاف می باشد.

در شکل شماره ۳ نمودار مقایسه سرعت جریان هوا در فاصله عمودی ثابت $y=0.3$ و در فواصل مختلف افقی بین مدل آزمایشگاهی و فلوئنت برای کلاس پاکیزگی D نشان داده شده است. نتایج آزمون همبستگی، با ضریب همبستگی ۰.۹۸ درصد نشان دهنده وجود همبستگی مناسب نتایج فلوئنت و آزمایشگاهی در فاصله ذکر شده می باشد. همچنین معادله خط رگرسیون برای فاصله ثابت $y=0.3$ و در

شکل ۳- مقایسه مقدار سرعت جریان هوا در فاصله ثابت $y=0.3$ بین مدل آزمایشگاهی و فلوئنت (کلاس پاکیزگی D)

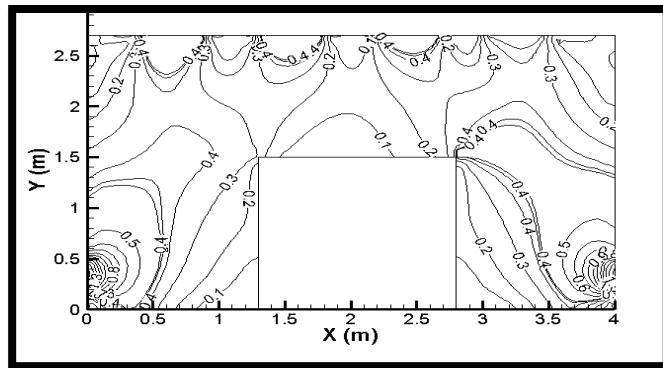
شکل ۴- نمایش کانتور سرعت در اتاق پاک (کلاس پاکیزگی B)

در این اتاق پاک نسبت به دو کلاس پاکیزگی دیگر به صورت یکنواخت تر می‌باشد که دلیل آن می‌تواند عدم وجود ابزار و تجهیزات در اتاق پاک می‌باشد. عدم وجود ذرات شمارش ذرات در این مطالعه در خصوص تست شمارش ذرات در این مطالعه غلظت ذرات ۰/۵ و ۵ میکرونی در ۳ اتاق پاک با مساحت های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تست شمارش ذرات در جدول ۳ نشان داده شده است. همانطور که از جدول زیر قابل مشاهده است تعداد ذرات سنجش شده در کلاس پاکیزگی B کمتر از تعداد ذرات در کلاس پاکیزگی C و D می‌باشد و بیشترین تعداد ذرات مربوط به کلاس پاکیزگی D می‌باشد. در مورد مساحت اتاق پاک، بیشترین مساحت مربوط به کلاس پاکیزگی D می‌باشد. همچنین در ارتباط با تعداد نقاط نمونه

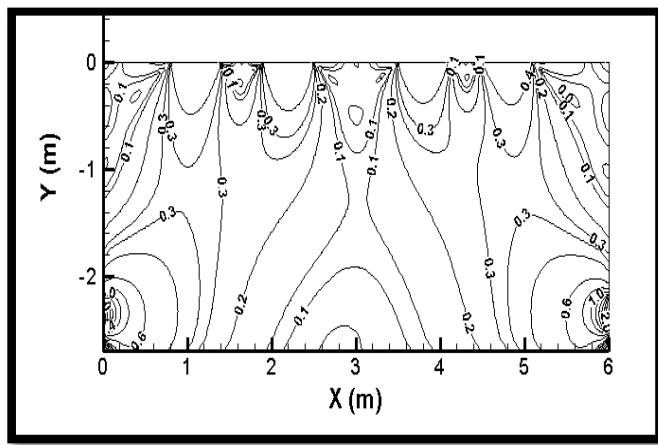
از اتاق پاک می‌باشد. همانطور که قابل مشاهده است وجود ابزار و تجهیزات در داخل اتاق پاک بر الگوی جریان هوا در اتاق پاک تأثیر گذاشته است و در بعضی از نقاط داخل اتاق پاک الگوی جریان هوا بین تجهیزات به دام افتاده است و جریان گردابه ای ایجاد شده است.

شکل شماره ۵ کانتور های سرعت جریان هوا برای کلاس های پاکیزگی C را نشان می دهد. همانطور که قابل مشاهده است، وجود ابزار و دستگاه در ورودی اتاق پاک، به عنوان یک مانع در برابر جریان هوا عمل می کند و با برخورد جریان هوا به ابزار و تجهیزات مسیر جریان هوا تغییر می کند.

در شکل شماره ۶ کانتور های سرعت جریان هوا برای کلاس های پاکیزگی D نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است کانتور های سرعت



شکل ۵- نمایش کانتور سرعت در اتاق پاک (کلاس پاکیزگی C)



شکل ۶- نمایش کانتور سرعت در اتاق پاک (کلاس پاکیزگی D)

انتخاب مدل توربولانس بستگی دارد؛ بنابراین بهمنظور انتخاب مدل توربولانس، مسئله با سه مدل توربولانس K- ω (استاندارد، RNG و Realizable) و مدل K-O حل شد و نمودار حاصل از نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفت که در شکل ۷ نشان داده شده است.

از مقایسه نمودارهای مربوط به سه مدل توربولانس در فاصله افقی ۰ تا ۰/۷ متری و ارتفاع ۰/۷ متر از کف اتاق با مدل تجربی در همان فواصل میتوان نتیجه گرفت که مدل های K- ω -RNG و K-O نزدیکی بیشتری به نتایج تجربی دارند؛ و از بین مدل های توربولانس K- ω -RNG و k- ϵ -RNG مدل K-O بیشترین تطابق با نتایج تجربی می باشد، بنابراین این مدل توربولانس، می تواند مناسب ترین انتخاب برای شبیه سازی الگوی جریان هوا باشد، به طوری که نتایج

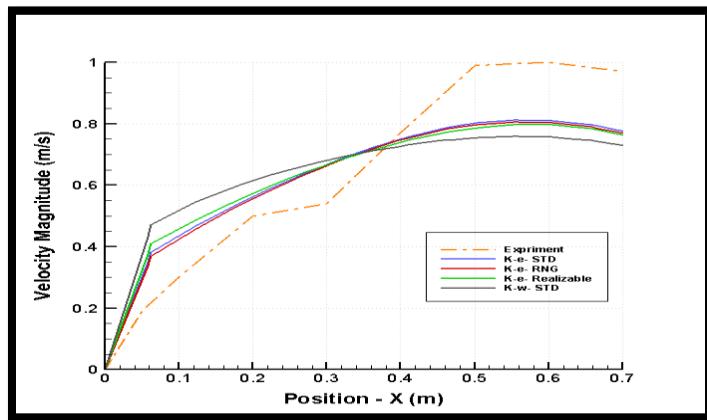
برداری نیز اتاق پاک مربوط به کلاس پاکیزگی C کمترین تعداد نمونه برداری و همچنین دارای کمترین مساحت می باشد.

بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه اعتبار نتایج عددی از طریق مقایسه با نتایج تجربی بدست آمده از الگوی جریان هوا و کانتورهای سرعت و همچنین ارزیابی سرعت جریان هوا در قسمت های مختلف اتاق پاک مورد بررسی قرار گرفت که نزدیک بودن نتایج شبیه سازی به نتایج تجربی نشان دهنده اعتبار شبیه سازی می باشد. از این رو، می توان نتیجه گرفت که CFD یک ابزار مناسب برای طراحی اتاق پاک می باشد. با این حال، دقت و صحت نتایج، به ویژگی های اصلی جریان و همچنین

جدول ۳- نتایج حاصل از تست شمارش ذرات در اتاق‌های پاک مورد بررسی

ردیف	کلاس پاکیزگی	مساحت (m^2)	تعداد نقطه نمونه برداری	$\bar{C}=5\mu m(\frac{\Sigma_{ذرات}}{m^3})\pm SD$	استاندارد ذرات ۵ میکرون بر حسب تعداد	مقدار کل ذرات ۵ میکرونی در اتاق پاک	استاندارد ذرات ۰ میکرون بر حسب تعداد	متدرک ذرات ۵ میکرونی در اتاق پاک
۱	B	۱۸	۵	(±۲۰/۴۷)	۲۹۳	۱۵۸۸	(±۱۹۲)	۳۵۷۰۴
۲	C	۱۶	۴	(±۱۰/۵)	۲۹۳۰	۳۶۹۸	(±۵۷۲)	۲۵۳۲۷
۳	D	۲۴	۵	(±۱۰/۵)	۲۹۳۰۰	۱۳۰۵۶	(±۱۳۸۲)	۱۳۰۶۴۲



شکل ۷- مقایسه جریان هوا در اتاق پاک با انواع مدل‌های آشفته‌گی

ثابت از جمله عواملی است که می‌توان بوسیله آن‌ها به پاکیزگی مورد نظر در اتاق پاک دست یافت. میزان پاکیزگی اتاق‌های پاک به حجم و کیفیت هوای تامین شده برای اتاق و نیز به کارایی آمیختگی هوا بستگی دارد. باید به این مسئله مهم اشاره کرد که میزان پاکیزگی اتاق پاک به نرخ تغییر هوا نیز وابسته است. با توجه به جدول شماره ۲، نرخ توزیع هوا برای کلاس پاکیزگی B بیشتر از کلاس پاکیزگی C و D بوده است. همچنین هرچه حجم و سرعت هوای ورودی به اتاق بیشتر باشد، میزان گردش هوا در اتاق پاک بیشتر است. همچنین نرخ گردش هوا بر راندمان حذف ذرات

بدست آمده از این تحقیق با نتایج مطالعات آقای هویت^۱ و همکارانش تطابق داشت. به طوریکه در RNG K-e-STD مدل K-e-STD و مدل RNG K-e-STD مورد بررسی قرار گرفت. و به این نتیجه رسیدند که هر دو مدل به خوبی ویژگی‌های اصلی الگوی جریان هوا را پیش‌بینی می‌کند و نتایج حل عددی با اندازه گیری‌های تجربی تطابق داشت. همچنین نتایج نشان داد که مدل RNG برای محاسبه جریان هوا در اتاق‌های پاک مناسب‌تر است (۱۸).

بررسی ویژگی‌های اصلی جریان هوا و توزیع آلایینده، از جمله چرخش جریان هوا، مناطق مرده و

^۱ Havet

دارای تولیدات حساس می باشد و محصولات ممکن است در مواجهه با آلودگی و ذرات آسیب پذیر باشند به عنوان نقاط بحرانی شناخته می شوند، بنابراین به منظور کاهش ریسک آلوده شدن محصولات می باشد در این نقاط، جریان هوای مؤثر و کارآمدی داشته باشیم. همچنین در بعضی از اتاق‌های پاک به دلیل وجود ابزار و تجهیزات در مسیر جریان هوا ممکن است جریان هوا در بین تجهیزات به دام افتاده و تشکیل جریان گردا به ای^۲ دهد و در ذهایت منجر به تجمع ذرات آلینده در آن نقاط گردد. با توجه به کانتورهای سرعت نشان داده شده در شکل های ۴ و ۵ بین دو دستگاه و کناره های دستگاه فضای مرده قابل مشاهده است. همچنین در گوشش های اتاق پاک جریان هوا به دام افتاده و تشکیل جریان گردابه می دهد. با توجه به مطالب فوق الذکر، یکی از مهم‌ترین کارهایی که در طراحی یک اتاق تمیز باید مورد توجه قرار داد، کاهش یا در صورت امکان حذف هر گونه نقاط مرده می باشد. جهت دستیابی به این هدف می باشد و سایل مورد استفاده در اتاق‌های پاک به گونه ای انتخاب و یا طراحی گردند که اولاً خود وسایل دارای کمترین فضای مرده باشند و ثانیاً چیدمان تجهیزات تا حد امکان دارد به گونه ای باشد که جلوی جریان هوا را نگیرد. به عبارتی یک مسیر از ورودی به خروجی در اتاق تمیز وجود داشته باشد.

با توجه به کانتورهای سرعت جریان هوا در اتاق پاک کلاس پاکیزگی B و C که در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است، جریان عمودی و رو به پایین هوا تمیز پس از ورود به اتاق پاک، در اثر برخورد به لبه تیز و زاویه دار ابزار و تجهیزات موجود در اتاق پاک، تغییر مسیر می دهد در نتیجه نمی‌تواند به خوبی با ذرات و گرد و غبار موجود در نقاط و فضای مرده مخلوط شود و آلودگی را به سمت خروجی هدایت نماید؛ بنابراین فضای مرده در این نقاط باقی خواهد ماند و بعد از آن به دلایل مختلفی از جمله فعالیت و

درون اتاق پاک مؤثر می باشد. علاوه بر حجم هوا ورودی، مساحت اتاق پاک نیز در نزخ تولید هوا تاثیرگذار است.

در مطالعه حاضر ابتدا الگوی جریان هوا با استفاده از نرم افزار فلوئنت شبیه سازی گردید و سپس نتایج حاصل از جریان هوا شبیه سازی شده با نتایج تجربی الگوی جریان در اتاق بصورت کیفی مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوی جریان هوا در اتاق در مسیرهای صحیحی در گردش می باشد. همچنین نتایج حاصل از مقایسه میزان سرعت جریان هوا در فواصل مختلف در اتاق‌های پاک، به ترتیب با حداقل و حداکثر درصد خطای $\frac{1}{3}\%$ و $\frac{2}{5}\%$ در اتاق کلاس B، $\frac{4}{9}\%$ و $\frac{4}{18}\%$ در کلاس C و $\frac{2}{5}\%$ و $\frac{5}{7}\%$ در کلاس D بدست آمد؛ که نشان دهنده مقادیر بالای حداکثر خطای می باشد. همانگونه که در نمودارهای شماره ۱، ۲ و ۳ قابل مشاهده می باشد، با افزایش فاصله از ورودی های هوا در صد خطای در حال افزایش می باشد. این افزایش خطای می تواند ناشی از حساسیت پایین دستگاه اندازه گیری در جریان های پایین (فواصل دور از خطوط جریان) باشد؛ بنابراین این درصد خطای بالا نمی تواند دلیل بر معتبر نبودن نتایج شبیه سازی باشد. با توجه به مطالب فوق الذکر می توان نتیجه گرفت که الگوی جریان هوا در مدل تجربی و مدل عددی دارای تطابق می باشد، بدین ترتیب الگوی جریان هوا در اتاق‌های پاک مورد نظر مشخص گردید. نتایج این مطالعه با نتایج مطالعه آفای توپاس کوهن هم خوانی داشت در مطالعه ایشان ویژگی های الگوی جریان هوا به صورت عددی شبیه سازی گردید و همچنین الگوی جریان هوا با استفاده از ذرات منودیسپرس^۱ به صورت میدانی مورد مطالعه قرار گرفت، نتایج این مطالعه، نشان داد که نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج تئوری تطابق دارد (۱۹).

یکی از موضوعات مهم در اتاق‌های پاک، نحوه انتشار جریان هوا می باشد. نقاطی از فرآیند تولید که

² Vortex

¹ Monodisperse



اتاق‌های پاک دانست. در سال ۲۰۱۳ چن و همکارانش به شبیه سازی الگوی جریان هوا و مقایسه جریان توربولان در اتاق‌های پاکی که دارای توزیع کدنده سقفی و ریترن های دیواری بوده اند، پرداختند و به این نتیجه رسیدند که ریترن های دیواری راندمان‌التری در حذف ذرات دارد (۱۷). همان‌طور که در قسمت نتایج ارائه گردید با تغییر در چیدمان و جانمایی ورودی های جریان هوا، الگوی جریان هوا در اتاق پاک تغییر می کند. انتخاب و شناسایی طراحی تهويه مطلوب با توجه به عواملی نظیر اندازه اتاق تمیز، سطح تمیزی، وجود ابزار و تجهیزات، نرخ توزیع جریان هوا و همچنین انتخاب الگوی مناسب جریان هوا می‌توانند بر سرنوشت و پراکندگی ذرات در اتاق پاک تاثیرگذار باشند. بنابراین کنترل تعداد ذرات هوای ورودی به اتاق تمیز، حذف هرگونه ذره معلق موجود در اتاق با بیشترین سرعت ممکن، هدایت آن به خارج از اتاق از کوتاه ترین و مستقیم ترین راه ممکن و همچنین کم کردن یا در صورت امکان جلوگیری از تمام فعالیت‌های که منتهی به تولید یا پراکنده شدن ذره در محیط می‌شوند، می‌تواند در حذف ذرات درون اتاق پاک مؤثر باشد.

۱- افزایش میزان ابزار و تجهیزات در اتاق پاک اثر نامطلوب بر الگوی جریان و در نهایت بر راندمان حذف ذرات دارد.

۲- مقایسه یافته‌های حاصل از شبیه سازی با یافته‌های تجربی تطبیق خوبی دارد.

۳- چیدمان و محل قرار گیری خروجی جریان هوا بر الگوی جریان هوا در اتاق پاک تأثیر می گذارد.

۴- اندازه ذرات در اتاق پاک بر راندمان حذف ذرات نیز تأثیر می گذارد.

۵- انتخاب الگوی مناسب جریان هوا بیشترین تأثیر را بر پراکنش و پراکندگی ذرات در اتاق پاک دارد.

۶- کانتور سرعت در ورودی کمتر و در خروجی تراکم آن بیشتر است.

۷- با مدل‌سازی الگوی جریان هوا می‌توان نقاط مرده و جریان های گردابه ای ایجاد شده را تشخیص و

حرکت افراد آشفتگی ایجاد شود، در نتیجه جریان آشفته به این نقاط، فضاهای مرده و دور از دسترس وارد شده و ذرات موجود در آن را به حالت تعليق در آورده و در نهایت باعث انتشار آلودگی شود؛ بنابراین باید چیدمان و قرار گیری تجهیزات در اتاق پاک طوری باشد که فضاهای مرده به حداقل ممکن برسد. یکی از مسائل مهم در طراحی اتاق‌های پاک اینست که الگوی جریان هوا باید به گونه ای طراحی شود که احتمال تجمع هیچ گونه آلودگی وجود نداشته باشد. از طرفی افزایش فعالیت های فیزیکی منجر به افزایش ذرات آزاد شده از سطح بدن می شود؛ بنابراین الگوی جریان هوا همراه با پراکندگی آلودگی های تولیدی در حین روند های گوناگون هر دو می‌توانند بر نتیجه روند تولید محصول تأثیر گذار باشند.

نتایج سنجش غلظت ذرات در اتاق‌های پاک نشان می‌دهد که میانگین تراکم آلودگی ذرات پایین تر از حد مجاز استاندارد ISO-۱۴۶۴۴ می‌باشد (جدول ۳). این موضوع می‌تواند ناشی از حجم بالای هوای ورودی به هر اتاق و کیفیت مطلوب هوای ورودی از دستگاه هواساز باشد. نکته قابل توجه اینست که علیرغم اینکه اتاق‌های پاک مورد نظر از نظر غلظت ذرات در حدود مجاز و مطابق با استاندارد می‌باشد، اما فراهم آوردن جریان هوای بیش از حد طراحی که موجب حذف هر چه سریعتر ذرات در اتاق می‌گردد، سبب صرف هزینه های زیاد از جنبه انرژی خواهد شد؛ بنابراین با طراحی مناسب و رعایت نکات لازم طراحی، می‌توان اتاق‌های پاکی مطابق با استاندارد داشت.

با افزایش قطر ذرات در اتاق پاک راندمان حذف ذرات کاهش می‌یابد که بدليل نیروی ثقل ذرات جریان هوا قادر به هدایت ذرات به سمت ریترن های سقفی و دیواری نمی‌باشد. در اتاق‌های پاک مورد بررسی خروجی های جریان هوا از نوع دیواری می‌باشند و قابلیت بالایی در حذف ذرات دارند. همچنین با توجه به نتایج حاصل از شمارش ذرات، نوع ریترن ها (خروجی ها) و محل قرار گیری آنها را می‌توان بعنوان یکی از دلایل پایین بودن میزان غلظت ذرات در

8. Vidali S. Human contamination control in a clean room. *Microchemical journal*. 1992;45(3):336-42.
9. Whyte W, Whyte W, Eaton T, Lenegan N. Calculation of air supply rates for nonunidirectional airflow cleanrooms. *European Journal of Parenteral and Pharmaceutical Sciences*. 2014;19(4):121-9.
10. Hu S, Wu Y, Liu C. Measurements of air flow characteristics in a full-scale clean room. *Building and Environment*. 1996;31(2):119-28.
11. Kohli R, Mittal KL. Developments in Surface Contamination and Cleaning, Volume 4: Detection, Characterization, and Analysis of Contaminants: William Andrew; 2011.
12. Khadem M, Faribod F, Norouzi P, Rahimi Foroushani A, Ganjali MR, Shahtaheri SJ, et al. Modification of Carbon Paste Electrode Based on Molecularly Imprinted Polymer for Electrochemical Determination of Diazinon in Biological and Environmental Samples. *Electroanalysis*. 2017;29(3):708-15.
13. Yarahmadi R, Mortazavi SB, Omidkhah MR, ASILIAN H, Moridi P. Examination of the optimized conditions for the conversion of NOX pollution in DBD plasma reactor. 2010.
14. Wang Y, Malkawi A, editors. Annual hourly CFD simulation: New approach—An efficient scheduling algorithm for fast iteration convergence. *Building Simulation*; 2014: Springer.
15. Launder BE, Spalding D. The numerical computation of turbulent flows. Computer methods in applied mechanics and engineering. 1974;3(2):269-89.
16. Wilcox DC. Turbulence modeling for CFD: DCW industries La Canada, CA; 1.۹۱۸
17. Chuah C, Salim SM, Low H. CFD Application on Cleanrooms Design. Engineering Undergraduate Research Catalyst Conference (EURECA 2013); EMS Design and Consultation Department, Toptrans Engineering Sdn.Bhd, Malaysia: Taylor's University; 2013.
18. Rouaud O, Havet M. Computation of the airflow in a pilot scale clean room using K-ε

حذف کرد.

-۸- استفاده از CFD یک ابزار مؤثر در طراحی و اعتبار بخشی اتاق‌های پاک می‌باشد.

تقدیر و تشکر

با تشکر و سپاسگزاری از همکاری شایسته اعضاي محترم مرکز تحقیقات بهداشت کار، لازم به ذکر است طرح اصلی این مقاله با کد ۰۹۰۲-۱۳۲-۲۶۱۵۷ در مرکز تحقیقات بهداشت کار و دادشگاه علوم پزشکی ایران ثبت گردیده و مراحل اجرای آن طی شده است.

منابع

1. ISO E. 14644-1, "Cleanrooms and associated controlled environments—Part 1: Classification of air cleanliness,". European Standard. 1999.
2. Whyte W, Green G, Whyte W. Removal efficiency of high efficiency air filters against microbe-carrying particles) MCPs) in cleanrooms. *Clean Air and Containment Review*. 2013;14:4-8.
3. Whyte W. Cleanroom technology: fundamentals of design, testing and operation: John Wiley & Sons; 2010.
4. Moradi G, Sedighzadeh A, Yarahmadi R, Bakand S, Farshad A, Rezaeifard B. Synthesis of nano-fibrous mats using electrospinning method and determining their efficiency for nanoaerosols removal (In Persian). *Iran Occupational Health*. 2014;11(4):1-11.
5. Ramstorp M. Introduction to contamination control and cleanroom technology: John Wiley & Sons; 2008.
6. Whyte W, Eaton T. Microbial transfer by surface contact in cleanrooms. *European Journal of Parenteral and Pharmaceutical Sciences*. 2015;20(4):127-31.
7. Havet M, Hennequin F. Experimental characterization of the ambience in a food-processing clean room. *Journal of food engineering*. 1999;39(3):329-35.



22. Yarahmadi R, Damiri Z, Sharifi J. Assessment of functional parameters of HEPA filters in a pharmaceutical industry (case study 2015) (In Persian). *Iran Occupational Health.* 2017;14(2):15-26.
23. Whyte W, Ward S, Whyte W, Eaton T. The application of the ventilation equations to cleanrooms-Part 2: Decay of contamination. *Clean Air and Containment Review.* 2014;20(2):4-9.
24. ISO E. 14644-1, "Cleanrooms and associated controlled environments—Part 3: test method. European Standard. 2005.
- turbulence models. *International Journal of Refrigeration.* 2002;25(3):351-61.
19. Kuehn TH. Predicting air flow patterns and particle contamination in clean rooms. *Journal of Aerosol Science.* 1988;19(7):1405-8.
20. Zhao B, Wu J. Numerical investigation of particle diffusion in a clean room. *Indoor and Built Environment.* 2005;14(6):469-79.
21. Tung Y-C, Hu S-C, Xu T, Wang R-H, editors. *Influence of ventilation arrangements on particle removal in industrial cleanrooms with various tool coverage.* Building Simulation; 2010: Springer.

Validation of model simulations of air flow in cleanrooms: Case of a pharmaceutical industry

Zabihollah Damiri¹, Rasoul Yarahmadi^{2*}, Mitra Rashidi³

Received: 2016/04/08

Revised: 2017/01/17

Accepted: 2017/03/02

Abstract

Background and aims: The concentration of airborne particles is under the control because of an important role in the production of drugs and high-tech products. Air flow pattern in the cleanroom is one of the important parameters of particle concentration and distribution of air pollution and need to be accurately modeled. Therefore in this study, evaluation and simulation of air flow patterns was investigated in cleanroom.

Methods: This study is an experimental and applied research, which was conducted in 2015 within a pharmaceutical industry. This study was to determine the air flow pattern in cleanroom. In this study, 3 clean room with 3 cleanliness classes B, C and D were studied. Then, the air flow pattern in the clean room, to determine the velocity vectors were simulated by computational fluid dynamics techniques (CFD).

Results: The findings of this study showed that air flow rate measured in experimental models with air flow rates predicted by CFD software under the same conditions and at the same spacing are very close to each other. Also airflow velocity contours for 3 the cleanliness class were determined. In addition, the results of measuring particle concentration in clean rooms shows the mean concentration of particulate contamination in three classes' cleanliness, were lower than limit of the standard ISO 14644.

Conclusion: This study showed that RNG K- ϵ turbulence model was the most appropriate model to simulate air flow pattern in the cleanroom. Moreover equipment and tools in a cleanroom affected on the pattern of air flow and ultimately the particle removal efficiency.

Keywords: RNG k- ϵ turbulence model, Cleanroom, Airflow, Fluent.

1. MSc, in Occupational Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.

2. (**Corresponding author**) Air Pollution Research Center, Department of Occupational Health, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran. yarahmadi.r@iums.ac.ir

3. MSc in Occupational Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran.