Journal of Occupational Hygiene Engineering Volume 4, Issue 3, Autumn 2017, Pages: 8-16

Original Article

doi: ------

# Assessment and Simulation of Air flow Pattern and Particle Dispersion with Computational Fluid Dynamics Method in a Pharmaceutical Industry

**Rasoul Yarahmadi[1], Zabiolah Damiri[2,*]**

[1] *Associate Professor, Department of Occupational Health, Occupational Health Research Center, School of Public Health, Iran University of medical Sciences, Tehran, Iran*
[2] *MSc, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran*

**** Corresponding Author:** Zabiolah Damiri, Iran University of Medical Sciences, Tehran, Iran. Email: Zabiolah.damiri@gmail.com*

**Received:** 30/05/2017
**Accepted:** 25/09/2017

**How to Cite this Article:**
Yarahmadi R, Damiri Z. Assessment and Simulation of Air flow Pattern and Particle Dispersion with Computational Fluid Dynamics Method in a Pharmaceutical Industry. *J Occup Hyg Eng*. 2017; 4(3): 8-16. DOI: ------

## Abstract

**Background and Objective:** Cleanroom is a tightly enclosed environment where airborne particles are under control and is a necessary environment in pharmaceutical industries to produce quality products. Hence, we sought to assess and simulate particle dispersion and track particles in a cleanroom by computational fluid dynamics (CFD) method in a pharmaceutical industry.

**Materials and Methods:** This experimental study was conducted in 2015 in a pharmaceutical industry. We evaluated particle concentration and number in the cleanroom according to ISO 14644 – 3 standard. In addition, air flow pattern and particle dispersion in the cleanroom with cleanliness class of C was simulated based on CFD.

**Results:** The results showed that the path of particle movement and distribution and dispersion of particles in the cleanroom are completely dependent on flow shape and the pattern of air flow in the cleanroom. Furthermore, the simulation results showed that wall return had efficiency of higher than 70% for particle sizes of 0.5 and 5 microns.

**Conclusion:** Equipment and tools existing in the cleanroom affect the air flow pattern, and in turn, particle removal efficiency. Moreover, particle dispersion simulation in the cleanroom illustrated that air flow pattern exerts the highest impact on particle removal in cleanrooms.

**Keywords:** Air Flow Pattern; Cleanroom; Particle Dispersion; Simulation

[ Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-08 ]

[ DOI: 10.21859/johe.4.3.8 ]

**Copyright** © 2017 Journal of Occupational Hygiene Engineering. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cite

مجله مهندسی بهداشت حرفه‌ای
دوره ۴، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶، صفحات ۸ تا ۱۶

مقاله پژوهشی

doi: ----------

# ارزیابی و شبیه‌سازی الگوی جریان و پراکنش ذرات با تکنیک CFD در اتاق پاک یک صنعت دارویی

**رسول یاراحمدی[۱]، ذبیح‌اله دمیری[۲،*]**

[۱] دانشیار، گروه مهندسی بهداشت حرفه‌ای، عضو مرکز تحقیقات بهداشت کار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران
[۲] کارشناس ارشد، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران

* **نویسنده مسئول:** ذبیح‌اله دمیری، دانشگاه علوم پزشکی ایران، تهران، ایران.

ایمیل: Zabiolah.damiri@gmail.com

**تاریخ دریافت مقاله:** ۱۳۹۶/۰۳/۰۹
**تاریخ پذیرش مقاله:** ۱۳۹۶/۰۷/۰۳

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

**چکیده**

**سابقه و هدف:** اتاق پاک، محیطی کاملا محصور است که در آن غلظت ذرات هوابرد تحت کنترل می‌باشد و یک محیط ضروری در صنعت داروسازی برای تولید محصولات باکیفیت است. در این ارتباط هدف از پژوهش حاضر، شبیه‌سازی الگوی جریان و همچنین ارزیابی و شبیه‌سازی پراکنش و ردیابی ذرات در اتاق پاک با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی در یک صنعت دارویی می‌باشد.

**مواد و روش‌ها:** پژوهش حاضر یک پژوهش تجربی- کاربردی است که در سال ۱۳۹۴ در یک صنعت دارویی انجام شد. روش انجام کار در این پژوهش، تعیین غلظت و تعداد ذرات در اتاق پاک بر اساس استاندارد ISO ۱۴۶۴۴-۳ بود. همچنین الگوی جریان و پراکنش ذرات در اتاق پاک با کلاس پاکیزگی C با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی نیز شبیه‌سازی گردید.

**یافته‌ها:** نتایج نشان داد که مسیر حرکت ذرات و چگونگی توزیع و پراکنش آن‌ها در اتاق پاک به‌طور کامل تابع شکل جریان و الگوی جریان هوا در اتاق پاک می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ذرات در اتاق پاک نیز حاکی از آن بود که خروجی‌های دیواری دارای راندمان بالای ۷۰ درصد در حذف ذرات ۰/۵ و ۵ میکرون می‌باشد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج پژوهش حاضر نشان داد که وجود ابزار و تجهیزات موجود در اتاق پاک بر الگوی جریان هوا و در نهایت بر راندمان حذف ذرات در اتاق پاک تاثیر می‌گذارد. همچنین، نتایج حاصل از شبیه‌سازی پراکنش ذرات در اتاق پاک بیانگر آن بود که الگوی جریان هوا بیشترین تاثیر را بر حذف ذرات در اتاق پاک بر جای می‌گذارد.

**واژگان کلیدی:** اتاق پاک؛ الگوی جریان؛ پراکنش ذرات؛ شبیه‌سازی

## مقدمه

یکی از دستاوردهای مهم انسان در سال‌های اخیر، رشد سریع صنایع مختلف و گسترش ساخت مواد شیمیایی گوناگون بوده است [۱]. آلاینده‌های شیمیایی محیط کار شامل: گازها، بخار و ذرات معلق جامد و مایع می‌باشد که هریک از این مواد دارای خطرات خاص بوده و زیان حاصل از آن‌ها بسته به نوع ماده شیمیایی، راه ورود، طول مدت تماس و تراکم آن‌ها متفاوت می‌باشد. مواجهه بیش از حد مجاز با این مواد در محیط کار می‌تواند منجر به مسمومیت‌ها و بیماری‌های مختلفی گردد [۲]. آلودگی هوا یک معضل مهم بهداشتی در کشورهای توسعه‌یافته و یا درحال توسعه است. اگرچه اطلاعات اولیه در مورد آلودگی داخل محیط‌ها به دلیل ضعف در پایش‌ها ناقص می‌باشد؛ اما برآورد می‌شود که آلودگی داخلی یک مسأله جدی در کشورهای درحال توسعه باشد. تراکم الاینده‌های داخلی در کشورهای توسعه‌یافته، مشابه با تراکم الاینده‌های خارجی است [۳].

امروزه اهمیت هوای پاک در محیط‌های کار صنعتی به‌خوبی شناخته شده است و کنترل آلاینده‌ها در تمامی صنایع برای حفظ سلامتی کارکنان و محیط زیست یکی از مهم‌ترین اهداف ایمنی و بهداشتی می‌باشد. به‌طور کلی، بسیاری از صنایع مدرن به محیط‌هایی بدون آلودگی به ذرات و باکتری نیاز دارند که

[ Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOI: 10.21859/johe.4.3.8 ]

این محیط‌ها توسط اتاق پاک فراهم می‌شود. محصولاتی که در شرایط غیرتمیز تولید می‌شوند، اغلب آلوده شده و خاصیت خود را از دست می‌دهند و ممکن است خطراتی را برای انسان به‌همراه داشته باشند [۴].

اتاق‌های پاک دارای انواع مختلفی هستند و بر اساس میزان و نحوه جریان هوا در داخل محیط تمیز به گروه‌ها و کلاس‌های متفاوتی طبقه‌بندی می‌شوند. انتخاب نوع و سطح تمیزی یک اتاق تمیز به کاربرد مورد نظر و میزان حساسیت مواد تولیدی در این فضاها بستگی دارد [۵]. اتاق پاک، فضاهای پاکیزه‌ای را ایجاد می‌کند که به کاربر اجازه می‌دهد به‌دور از عوامل مزاحم و مداخله‌کننده، فرایند مورد نظر خود را با اطمینان انجام دهد و محصولی باکیفیت و با کارایی مناسب تولید نماید. به‌کارگیری اتاق پاک از دو جهت ضرورت دارد. یکی در مواردی است که حضور ذرات بی‌جان چون گرد و غبار مشکل ایجاد می‌کند. در این شرایط حتی ممکن است ذراتی با ابعاد کمتر از میکرون، کارایی محصول یا چرخه عمر را کاهش دهد. میکروالکترونیک، نانوتکنولوژی و صنایع هوافضا از جمله صنایعی هستند که این نیاز را بیشتر از دیگران احساس می‌کنند. ضرورت دیگر اتاق پاک در شرایطی است که حذف ذرات حمل‌کننده میکروب‌ها اهمیت دارد. بیوتکنولوژی و صنایع دارویی نوین از جمله سیستم‌های داروسازی کاملا پیشرفته از جمله نیازمندان اصلی اتاق‌ها و فضاهای تمیز از این منظر محسوب می‌شوند [۶].

اتاق‌های پاک به دلیل نحوه تهویه‌شان به دو نوع عمده تقسیم می‌شوند که عبارت هستند از: اتاق‌های پاک دارای تهویه متعدد یا مغشوش و جریان هوای یک‌طرفه. جریان آرام، جریانی است که در آن سیال به طریقی منظم و در مسیرهای مشخص حرکت می‌کند [۷]. در جریان توربولانسی، توده هوای ورودی به اتاق دارای سرعت‌های متفاوت و جهت‌های مختلف می‌باشد. ذرات موجود در هوا از طریق گردش در جهت‌های متفاوت خارج می‌شوند و آلودگی‌های گازی از طریق رقیق‌سازی کنترل می‌گردند [۸].

دینامیک سیالات محاسباتی ( Computational Fluid Dynamics) یکی از شاخه‌های مکانیک سیالات است که از روش‌های عددی و الگوریتم برای حل و تجزیه و تحلیل مسائلی که شامل جریان هوا می‌باشند، استفاده می‌نماید [۹]. با استفاده از تکنیک CFD می‌توان تمام متغیرهای میدان جریان را به‌صورت کامل توصیف نمود و تعداد زیادی از فرایندهای مربوط به جریان سیال را به‌طور هم‌زمان مورد مطالعه قرار داد؛ بنابراین می‌توان مسائل کاملاً پیچیده را با استفاده از تکنیک CFD شبیه‌سازی نمود. شبیه‌سازی با استفاده از تکنیک CFD دارای این مزیت است که می‌توان اطلاعات ارزشمندی را درباره رفتار جریان بدون انجام آزمایش به دست آورد [۱۰].

در سال ۲۰۱۰ پژوهشی با عنوان "تاثیر ترتیبات و چیدمان تهویه در حذف ذرات در اتاق‌های پاک با نسبت پوشش تجهیزات مختلف" توسط Yun Chun Tung و همکاران انجام شد. هدف از این پژوهش بررسی تاثیر چیدمان خروجی‌های سقفی، دیواری و سقفی چهار راهه در توزیع جریان هوا و سرنوشت ذرات در اتاق پاک با نسبت پوشش تجهیزات مختلف (۰، ۳۸ و ۶۰ درصد) بود. در این پژوهش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای تجزیه و تحلیل و مقایسه تاثیر ترتیبات سه تهویه در غلظت ذرات با اندازه‌های مختلف (قطر ۰/۰۱-۱۰۰ میکرومتر) در اتاق‌های پاک استفاده شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که نرخ حذف ذرات برای اتاق‌های پاک به‌طور قابل‌توجهی با تجهیزات و مساحت پوشش‌داده‌شده توسط تجهیزات، طراحی تهویه و اندازه ذرات در ارتباط است [۱۱].

در پژوهش دیگری Kuehn به بررسی الگوی جریان هوا و آلودگی ذرات در یک اتاق پاک پرداخت. وی در این پژوهش ویژگی‌های الگوی جریان هوا و غلظت ذرات را در اتاق پاک به‌صورت تئوری شبیه‌سازی نمود و به این نتیجه دست یافت که غلظت ذرات موجود در اتاق پاک به مقدار بسیار زیادی به الگوی جریان هوای اتاق پاک وابسته می‌باشد [۱۲]. از سوی دیگر، در سال ۲۰۱۳ پژوهشی با عنوان "کاربرد CFD در طراحی اتاق‌های پاک" توسط Chang و همکاران انجام شد. آن‌ها در این پژوهش به شبیه‌سازی الگوی جریان و مقایسه توزیع جریان در خروجی و توزیع‌کننده سقفی و خروجی‌های دیواری در اتاق‌های پاک پرداختند و گزارش کردند که خروجی‌های دیواری، راندمان بالاتری در حذف ذرات دارند؛ زیرا جریان گردابی و چرخش ایجادشده در آن‌ها کمتر بوده است [۱۳]؛ بنابراین الگوی جریان هوا در اتاق‌های پاک یکی از پارامترهای مهمی است که در غلظت ذرات و توزیع آلودگی نقش دارد. در این راستا لازم است جریان هوا به‌طور دقیق الگوسازی شود که این امر نیازمند صرف زمان و هزینه می‌باشد و این احتمال وجود دارد که به‌طور دقیق رخ ندهد؛ به همین دلیل برای الگوسازی جریان هوا از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده می‌گردد [۹]. با توجه به مطالب ذکرشده، هدف از پژوهش حاضر ارزیابی غلظت ذرات در اتاق پاک، شبیه‌سازی الگوی جریان هوا، تعیین پراکنش و ردیابی مسیر حرکت ذرات در داخل اتاق پاک با استفاده از نرم‌افزار CFD می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش الگوی جریان هوا در اتاق‌های پاک و غلظت ذرات هوابرد موجود در اتاق پاک مطابق با روش ISO-۱۴۶۴۴ مورد بررسی قرار گرفت.

تجهیزات مورد استفاده در پژوهش عبارت بود از:

[ Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-08 ]

[ DOI: 10.21859/johe.4.3.8 ]

۱. دستگاه شمارش‌گر ذرات (Particle Counter) مارک CLIMET–USA برای اندازه‌گیری غلظت ذرات

۲. نرم‌افزار CFD برای شبیه‌سازی الگوی جریان و ردیابی پراکنش ذرات در اتاق پاک

برای تعیین الگوی جریان هوا در اتاق پاک مربوطه، ابتدا با استفاده از تکنیک CFD نرم‌افزار فلوئنت (Fluent) الگوی جریان هوا شبیه‌سازی گردید. به منظور شبیه‌سازی جریان هوا با استفاده از این نرم‌افزار، ابتدا هندسه اتاق پاک به‌صورت ۲ بعدی در نرم‌افزار Gambit 2.4.6 رسم گردید و تمامی تجهیزات موجود در اتاق پاک به‌عنوان موانع در نظر گرفته شد. سپس می‌بایست هندسه اتاق پاک به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار فلوئنت انتقال می‌یافت و تحلیل‌های لازم برای نمایش بردارهای جریان در اتاق پاک انجام می‌گردید. پس از شبیه‌سازی الگوی جریان هوا در اتاق پاک با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت، با توجه به الگوی جریان هوا به بررسی پراکنش ذرات در اتاق پاک پرداخته شد [۷].

مهم‌ترین آزمونی که برای ارزیابی کیفیت هوا و طبقه‌بندی اتاق‌های پاک انجام می‌شود، شمارش ذرات هوابرد است. پیش از اینکه بتوان این آزمون را در اتاق پاک انجام داد باید سایر آزمون‌های سرعت و دبی هوای ورودی، اختلاف فشار اتاق‌ها، الگوی جریان هوا در اتاق‌های پاک و بین اتاق‌ها و آزمون نشتی فیلترها توسط استاندارد ISO-۱۴۶۴۴ انجام شده و نتایج قابل قبولی ارائه گردیده باشد تا بتوان آزمون شمارش ذرات را به‌عنوان آزمون نهایی انجام داد. شایان ذکر است که در پژوهش حاضر اندازه‌گیری غلظت ذرات هوابرد در شرایط درحال استراحت و مطابق با استاندارد ISO-۱۴۶۴۴ انجام شد [۱۴].

تعیین تعداد نقاط نمونه‌برداری نیز با استفاده از استاندارد ISO-۱۴۶۴۴، از طریق رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$N_L = \sqrt{A} \qquad (۱)$$

$N_L$: حداقل نقاط نمونه‌برداری

A: مساحت اتاق پاک یا محیط کنترل‌شده (بر حسب متر مربع)

نمونه‌ها در سراسر اتاق پاک و در ارتفاعی که کار انجام می‌گشت، تهیه شدند [۱۵،۱۶].

در پژوهش حاضر یک اتاق پاک مربوط به کلاس‌های پاکیزگی C مورد بررسی قرار گرفت که هندسه آن‌ها به‌صورت ۲ بعدی رسم گردید. این اتاق پاک دارای ۴ ورودی و ۲ خروجی جریان هوا می‌باشد. در اتاق پاک مورد بررسی دو دستگاه وجود دارد که در ساخت هندسه در گمبیت (Gambit) به‌عنوان دیوار در نظر گرفته شده است.

توزیع‌کننده‌های هوا در سقف قرار دارند و هوا را به‌صورت توربلانت وارد اتاق پاک می‌کنند. خروجی هوا نیز بر روی دیوار و در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از کف اتاق پاک قرار دارد و هوای داخل اتاق پاک را به سمت بیرون هدایت می‌کند. پس از شبیه‌سازی ذرات با توجه به نتایج خروجی نرم‌افزار CFD، میزان راندمان حذف ذرات در اتاق پاک معادل ۵ و ۰/۵ مشخص گردید. در شبیه‌سازی با نرم‌افزار CFD مشاهده شد که ذرات به دام افتاده (Trap) ذراتی هستند که در اثر برخورد به دیواره‌ها و کف اتاق پاک در آنجا ته‌نشین شده‌اند؛ ذرات معلق (Suspended) ذراتی هستند که در جریان‌های گردابه به دام افتاده‌اند و نمی‌توانند از اتاق پاک خارج شوند و در آنجا معلق می‌باشند؛ ذرات خروجی (Escaped) ذراتی هستند که توسط جریان هوا از اتاق پاک خارج می‌گردند. در نهایت با توجه به دو پارامتر فوق (ذرات معلق و ذرات خروجی از اتاق پاک) و مشخص‌بودن تعداد کل ذرات ورودی به اتاق پاک، بر اساس رابطه ۲ راندمان حذف ذرات در اتاق پاک مشخص گردید [۱۱].

$$Efficency\ (Escaped\ Ratio) = \frac{\text{کل ذرات خارج‌شده (Escaped Particle)}}{\text{کل ذرات رهاشده } (Numbers\ of\ Released\ Particle)} \qquad (۲)$$

## یافته‌ها

با توجه به اینکه یکی از منابع عمده تولید آلودگی در داخل اتاق‌های پاک دستگاه‌ها و تجهیزات است، آن‌ها به‌عنوان منبع تولید آلودگی در نظر گرفته شدند و ذرات از دستگاه‌های درحال انجام کار آزاد گردید. شکل ۱خطوط جریان هوا در کل اتاق پاک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در برخی از نقاط موجود در اتاق پاک، جریان گردابه و فضای مرده تشکیل شده است.

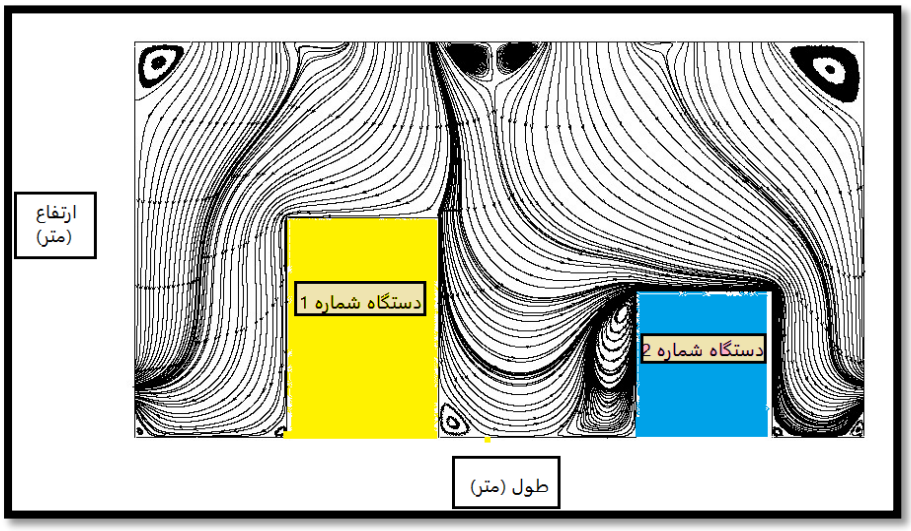
شکل ۲ الگوی جریان هوا در بین دو دستگاه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود ابزار و تجهیزات موجود در اتاق پاک و نحوه چیدمان آن‌ها می‌تواند در الگوی جریان هوا در اتاق پاک تاثیرگذار باشد.

در این پژوهش ابتدا تعداد ذرات ۵ و ۰/۵ میکرون به‌صورت تجربی اندازه‌گیری گردید. نتایج حاصل از اندازه گیری تعداد ذرات موجود در اتاق پاک در جدول ۱ نشان داده شده است. سپس نتایج اندازه‌گیری تجربی برای اعتبارسنجی و شبیه‌سازی پراکنش ذرات در اتاق پاک مورد استفاده قرار گرفت.

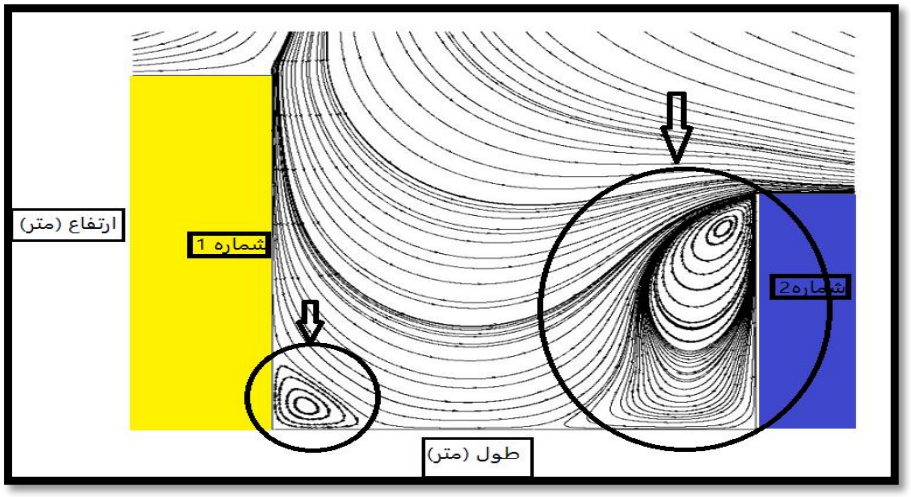
در مورد شبیه‌سازی ذرات ۵ میکرون موجود در اتاق پاک، ابتدا میزان ذرات موجود در اتاق به‌صورت تجربی اندازه‌گیری گردید. حجم این اتاق پاک برابر با ۴۳ متر مکعب بود و تعداد کل

[ Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-08 ]

[ DOI: 10.21859/johe.4.3.8 ]




**شکل ۱:** نمایش خطوط سرعت در کل اتاق پاک




**شکل ۲:** نمایش خطوط سرعت در بین دستگاه‌ها (کلاس پاکیزگی C)

**جدول ۱:** نتایج حاصل از اندازه‌گیری شمارش ذرات در اتاق پاک

| ردیف | کلاس پاکیزگی | مساحت (متر مربع) | تعداد نقاط نمونه‌برداری ($\sqrt{A}$) | شرایط اندازه‌گیری: At rest | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | تعداد ذرات اندازه‌گیری‌شده (متر مکعب/ ذره) | | تعداد ذرات استاندارد | | تعداد کل ذرات اندازه‌گیری در داخل اتاق پاک | |
| | | | | ۵ µ | ۰/۵ µ | ۵ µ | ۰/۵ µ | ۵ µ | ۰/۵ µ |
| ۱ | ۱۰۰۰۰ (ISO7/C) | ۴۳ | ۷ | ۹۳ | ۵۵۸ | ۲۹۳۰ | ۳۵۲۰۰۰ | ۴۰۰۰ | ۲۳۹۹۴ |

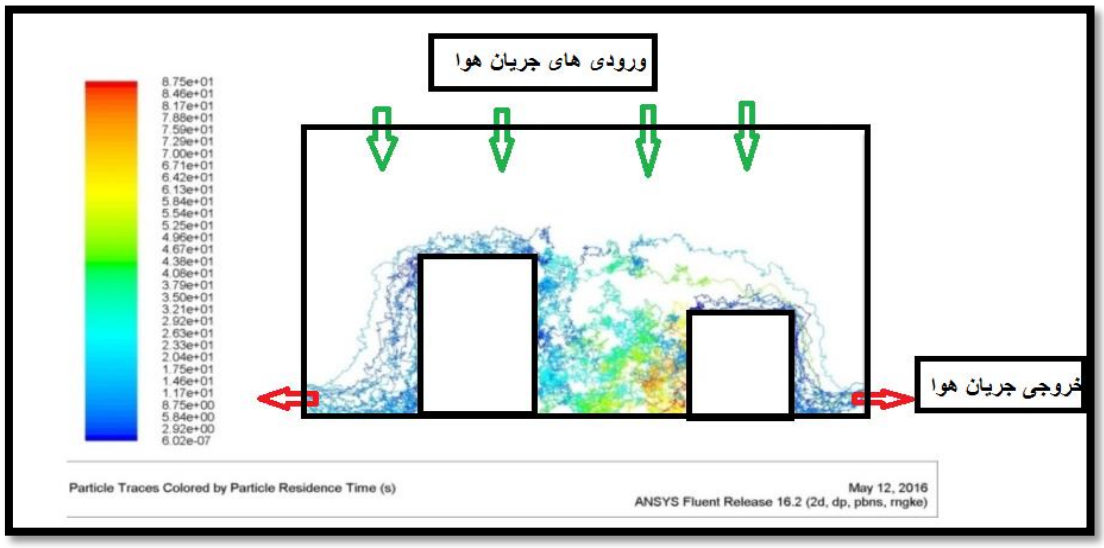
ذرات ۵ میکرون در این اتاق نیز معادل ۴۰۰۰ ذره به دست آمد (متر مکعب/ ذره ۹۳). شایان ذکر است که تمامی ذرات برای شبیه‌سازی ذرات موجود در اتاق پاک مورد بررسی قرار گرفتند. شکل‌های ۳ تا ۵ نحوه پراکندگی ذرات و نیز مسیر حرکت آن‌ها در اتاق پاک را نشان می‌دهد.

در ارتباط با شبیه‌سازی ذرات ۰/۵ میکرون موجود در اتاق پاک، ابتدا میزان ذرات موجود در اتاق پاک به‌صورت تجربی اندازه‌گیری گردید. سپس از نتایج تجربی برای شبیه‌سازی پراکنش و پراکندگی ذرات و ردیابی آن‌ها استفاده شد. حجم این اتاق پاک برابر با ۴۳ متر مکعب بود و تعداد کل ذرات در این اتاق معادل ۲۳۹۹۴ ذره محاسبه شد (۵۵۸ ذره در هر متر مکعب). ذکر این نکته ضرورت دارد که به دلیل زیادبودن تعداد ذرات و همچنین افزایش زمان در حل مسأله، ۸۰۰۰ ذره از تعداد کل ذرات انتخاب شد و بررسی گردید.

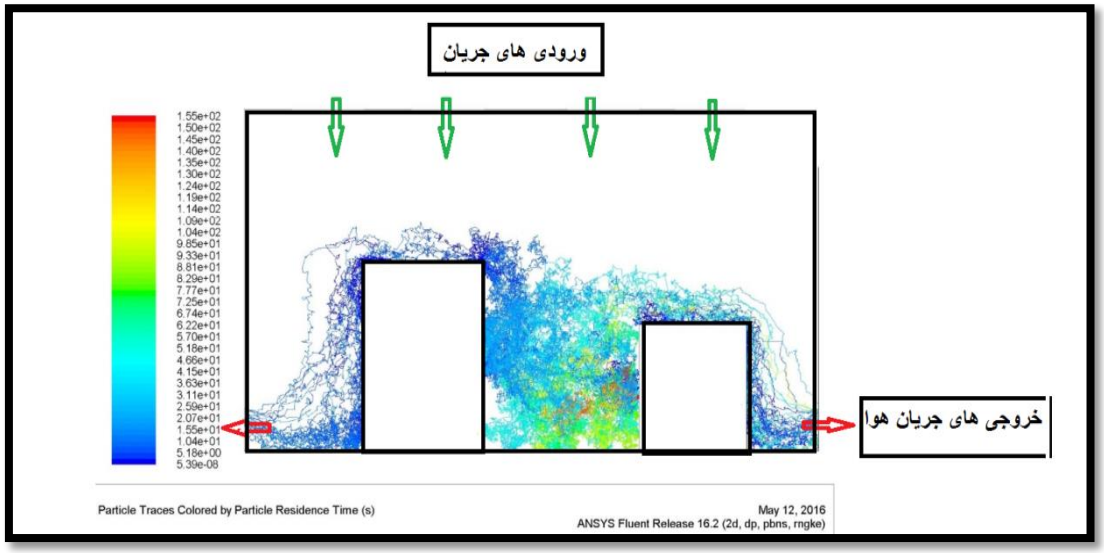
در شکل ۵ پراکنش ذرات ۰/۵ میکرون با توجه به زمان ماند ذرات در اتاق پاک ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود،



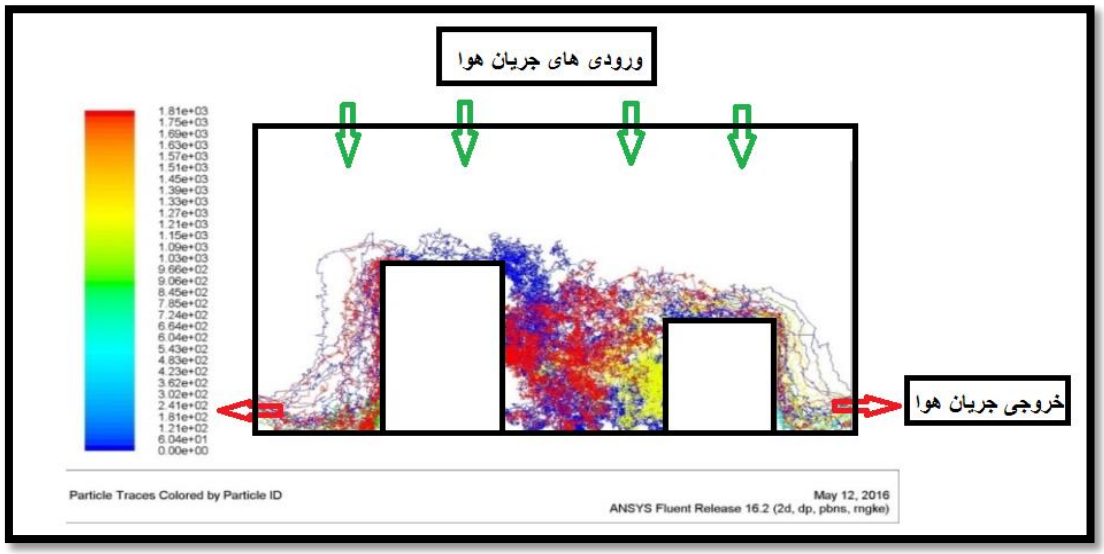
[ Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-08 ]
[ DOI: 10.21859/johe.4.3.8 ]




**شکل ۳:** نمایش پراکنش ذرات در اتاق پاک کلاس پاکیزگی C (۵ میکرون)




**شکل ۴:** نمایش پراکنش ذرات در اتاق پاک (ذرات ۰/۵ میکرون)




**شکل ۵:** نمایش زمان ماند ذرات در اتاق پاک (ذرات ۰/۵ میکرون)

[ Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-08 ]

[ DOI: 10.21859/johe.4.3.8 ]

**جدول ۲:** مقایسه راندمان حذف ذرات در اتاق پاک کلاس پاکیزگی C

| نتایج شبیه‌سازی ذرات | ذرات ۰/۵ میکرون | ذرات ۵ میکرون |
|---|---|---|
| تعداد کل ذرات رهاشده | ۸۰۰۰ | ۴۰۰۰ |
| تعداد ذرات به دام افتاده‌شده (Trap) | ۱۴۶۰ | ۹۴۷ |
| تعداد ذرات معلق (Suspended) | ۱۳۹ | ۲۴۸ |
| تعداد ذرات خروجی (Escaped) | ۶۴۱۰ | ۲۸۰۵ |
| راندمان حذف (درصد) | ۰/۸۰ | ۰/۷۰۱ |

زمان ماند ذرات بین دو دستگاه موجود در اتاق پاک افزایش یافته است.

جدول ۲ خلاصه‌ای از خروجی شبیه‌سازی پراکنش ذرات در اتاق پاک را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، میزان راندمان حذف ذرات ۰/۵ میکرون بیشتر از میزان ذرات ۵ میکرون می‌باشد. لازم به ذکر است که راندمان حذف ذرات در اتاق پاک تابع اندازه ذرات و الگوی جریان هوا در اتاق پاک است و به تعداد و نحوه جانمایی ورودی‌ها و خروجی‌های جریان هوا بستگی دارد.

## بحث

آنچه در تحلیل جریان هوا در یک اتاق پاک مهم می‌باشد، نقش شکل جریان و تعیین مقادیر سرعت هوا در نقاط مختلف به‌عنوان عامل مهم در توزیع ذرات در اتاق پاک است. شکل جریان و مقادیر سرعت هوا در اتاق پاک تحت تاثیر عوامل مختلف تغییر می‌کند که شدت اثر این عوامل متفاوت خواهد بود. از جمله این عوامل می‌توان به شرایط هوای ورودی به اتاق پاک از نظر سرعت جریان هوا به لحاظ شکل جریان و شدت توربولانس هوای ورودی و نیز میزان دبی (فلوریت) آن اشاره کرد. ابعاد، اندازه، شکل هندسی، محل استقرار و تعداد ورودی و خروجی‌های جریان می‌تواند در الگوی جریان هوا تاثیرگذار باشد. از دیگر عوامل مهم در بررسی الگوی جریان هوا، وجود موانع در اتاق پاک است که می‌تواند کارمندان، تجهیزات و یا به‌طور کلی دستگاه‌های موجود در اتاق پاک باشد [۱۱].

یکی از موضوعات مهم در ارتباط با اتاق‌های پاک، نحوه انتشار جریان هوا است. نقاطی از فرآیند که دارای تولیدات حساس هستند و نیز محصولاتی که ممکن است با آلودگی و ذرات مواجه باشند به‌عنوان نقاط بحرانی شناخته می‌شوند؛ بنابراین به منظور کاهش ریسک آلوده‌شدن محصولات می‌بایست در این نقاط، جریان هوای مؤثر و کارآمدی داشته باشیم. همچنین در برخی 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 گردابه‌ای (Vortex) دهد و در نهایت منجر به تجمع ذرات آلاینده در آن محل گردد؛ بنابراین یکی از مسائل مهم در طراحی اتاق‌های پاک این است که الگوی جریان هوا باید به‌صورتی طراحی شود که احتمال تجمع هیچ‌گونه آلودگی وجود نداشته باشد. از سوی دیگر افزایش فعالیت‌های فیزیکی منجر به افزایش ذرات آزادشده از سطح بدن می‌شود؛ از این رو، الگوی جریان هوا همراه با پراکنش آلودگی تولیدی در حین فرایندهای گوناگون می‌توانند (هر دو با هم) بر نتیجه روند تولید محصول تأثیرگذار باشند. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوی جریان در شکل‌های ۱ و ۲ این نکته دریافت می‌شود که وجود ابزار و تجهیزات، نحوه چیدمان و تعداد آن بر الگوی جریان هوا در اتاق پاک تاثیر می‌گذارد. علاوه‌براین مشاهده می‌شود که بین تجهیزات مورد استفاده در اتاق پاک، یک فضای مرده یا توربلانت ایجاد شده است که همین فضاها و نقاط در نهایت بر راندمان حذف ذرات تاثیر می‌گذارند. لازم به ذکر است که یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعه Kuehn مطابقت داشت. وی در پژوهش خود به این نتیجه دست یافت که غلظت ذرات موجود در اتاق پاک به مقدار بسیار زیادی به الگوی جریان هوای اتاق پاک وابسته می‌باشد [۱۲].

معیارهای در نظر گرفته‌شده در مورد بررسی نتایج مربوط به توزیع و مسیر حرکت ذرات در اتاق‌های پاک مورد مطالعه شامل: تعیین غلظت ذرات در نقاط مختلف اتاق پاک، مسیر حرکت ذرات در اتاق پاک، تعداد ذرات تولیدشده در اتاق پاک، تعداد ذرات خارج‌شده از اتاق پاک از طریق خروجی‌ها و منبع تولید و ایجاد ذرات در اتاق پاک می‌باشد. مسیر حرکت ذرات و چگونگی توزیع و پراکنش ذرات در اتاق پاک به‌طور کامل تابع شکل جریان و الگوی جریان هوا در اتاق پاک است؛ به همین دلیل در قسمت نتایج مربوط به شبیه‌سازی ذرات در اتاق پاک، ابتدا خطوط جریان یا الگوی جریان در اتاق پاک مشخص گردید و سپس به بررسی پراکنش ذرات در اتاق پاک پرداخته شد.

براساس رابطه و جدول ۲، راندمان حذف ذرات ۰/۵ میکرون (۰/۸۰) بیشتر از ذرات ۵ میکرون (۰/۷۰) است؛ بنابراین برای ذرات کوچک‌تر می‌توان این فرض را صحیح دانست که پراکنش و توزیع این ذرات به‌طور دقیق بر مبنای مسیر جریان هوا حرکت می‌کنند و نیروی وزن تنها در مورد ذرات با قطر بزرگ‌تر تاثیرگذار می‌باشد. در ارتباط با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی ذرات باید گفت آن قطری از ذرات که می‌تواند به‌عنوان مرزی برای اثردادن اثرات وزن ذرات انتخاب شود، چندان دقیق نمی‌باشد؛ اما می‌توان فرض کرد که برای ذرات با قطر کمتر از ۵ میکرون، نیروی وزن به‌طور کامل قابل صرف‌نظرکردن است. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده

[ Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-08 ]

[ DOI: 10.21859/johe.4.3.8 ]

شد، راندمان حذف ذرات ۵ میکرون در اتاق پاک مورد بررسی برابر با ۰/۷۰۱ درصد بود و برای ذرات ۰/۵ میکرون معادل ۰/۸۰ درصد محاسبه شد؛ بنابراین راندمان حذف ذرات ۰/۵ میکرون بیشتر از راندمان حذف ذرات ۵ میکرون است که دلیل این امر می‌تواند کوچک‌بودن قطر ذرات باشد که باعث می‌شود از الگوی جریان هوا تبعیت کرده و به سمت خروجی‌های جریان هدایت شوند. دلیل دیگر آن نیز می‌تواند وجود ابزار و دستگاه‌های موجود در اتاق پاک باشد که باعث می‌شود ذرات ۵ بین دو دستگاه به دام بیافتند و نتوانند به‌راحتی از اتاق پاک خارج شوند. البته باید ذکر کرد که ذرات ۰/۵ میکرون نیز در بین دو دستگاه معلق شده‌اند (۱۳۹ ذره)؛ اما تعداد آن‌ها کمتر از ذرات ۵ میکرون می‌باشد (۲۴۸ذره)؛ به‌طوری که مطابق با جدول ۲، میزان ذرات معلق (suspendent) برای ذرات ۵ میکرون برابر با ۶ درصد و برای ذرات ۰/۵ میکرون برابر با ۲ درصد است. از سوی دیگر خطوط سرعت موجود در شکل‌های ۱ و۲ که توربلانت و جریان گردابه‌ای ایجادشده بین دو دستگاه را نشان می‌دهد، تاییدی بر این واقعیت می‌باشد. در این زمینه در سال ۲۰۰۵ پژوهشی با عنوان "بررسی عددی در انتشار ذرات در اتاق‌های پاک" توسط Bin Zhao و همکاران انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که حالت تهویه، محل منبع ذرات و نرخ توزیع هوا می‌تواند توزیع ذرات در اتاق تمیز را تحت تاثیر قرار دهد. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر با یافته‌های پژوهش فوق همخوانی دارد [۱۷]. همچنین، این نکته دریافت می‌شود که خروجی دیواری دارای قابلیت حذف ۷۰ درصد از ذرات می‌باشد. علاوه‌براین، Tung و همکاران در سال ۲۰۰۲ پژوهشی را با عنوان "ارزیابی عملکرد برای خروجی‌های متعادل‌کننده موضعی و خروجی‌های دیواری اتاق‌های پاک با جریان توربلانت" انجام دادند و گزارش نمودند که اتاق پاک مجهز به خروجی دیواری در فرستادن ذرات به خارج نسبت به اتاق پاک دارای سیستم توزیع‌کننده و خروجی‌های موضعی مؤثرتر می‌باشد. شایان ذکر است که نتایج پژوهش حاضر با نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش فوق همسویی دارد [۱۸].

با توجه به شکل‌های ۳ تا ۵ که مربوط به مسیر حرکت ذرات در داخل اتاق پاک است، این نکته دریافت می‌شود که هرچه میزان ابزار و تجهیزات در داخل اتاق پاک بیشتر باشد، بر الگوی جریان و میزان راندمان حذف ذرات در اتاق پاک تاثیر می‌گذارد؛ به عبارت دیگر، ابزار و تجهیزات فضای بیشتری را اشغال کرده‌اند که باعث شده است مانعی در برابر عبور ذرات باشند؛ بنابراین با چیدمان صحیح ابزار و تجهیزات می‌توان بسیاری از فضاهای مرده (Dead Space) را در اتاق پاک حذف کرد. در این راستا Yang Chen و همکاران در سال ۲۰۱۰ پژوهشی را با عنوان "تاثیر ترتیب و چیدمان تهویه در حذف ذرات در اتاق صنعتی تمیز با پوشش ابزار مختلف" انجام دادند و گزارش نمودند که نرخ حذف ذرات برای اتاق‌های پاک به‌طور قابل‌توجهی با تجهیزات و مساحت پوشش‌داده‌شده توسط تجهیزات، طراحی تهویه و اندازه ذرات در ارتباط است. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر با یافته‌های حاصل از پژوهش فوق همخوانی دارد [۱۱].

## نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ذرات ۰/۵ میکرون بیشتر از ذرات ۵ میکرون از الگوی جریان هوا پیروی می‌کنند. در اتاق پاک مورد بررسی میزان ذرات معلق (suspendent) ۵ میکرون تقریبا دو برابر ذرات ۰/۵ میکرون بود. افزایش میزان ابزار و تجهیزات در اتاق پاک، اثر نامطلوبی بر الگوی جریان و راندمان حذف ذرات دارد. همچنین چیدمان و محل قرارگیری خروجی جریان هوا بر الگوی جریان هوا در اتاق پاک اثر می‌گذارد و انتخاب الگوی مناسب جریان هوا نیز بیشترین تاثیر را بر پراکنش و پراکندگی ذرات در اتاق پاک دارد. در پایان باید گفت که با شبیه‌سازی الگوی جریان هوا می‌توان نقاط مرده و جریان‌های گردابه‌ای ایجادشده را تشخیص داد و حذف نمود.

## تشکر و قدردانی

با تشکر و سپاسگذاری از همکاری شایسته اعضای محترم مرکز تحقیقات بهداشت کار، لازم به ذکر است طرح اصلی این مقاله با کد ۲۶۱۵۷-۱۳۲-۰۲-۰۹ در مرکز تحقیقات بهداشت کار و دانشگاه علوم پزشکی ایران ثبت گردیده و مراحل اجرای آن طی شده است.

## REFERENCES

1. Cooper CD, Alley FC. Air pollution control: a design approach. Chicago: Waveland Press; 2002.
2. McDermott HJ. Air monitoring for toxic exposures. New Jersey: John Wiley & Sons; 2004.
3. World Health Organization. Air quality guidelines for Europe. Geneva: World Health Organization; 2000.
4. Donovan RP. Particle control for semiconductor manufacturing. New York: Dekker; 1990.
5. Whyte W. Cleanroom design. New Jersey: Wiley Online Library; 1999.
6. Ramstorp M. Introduction to contamination control and cleanroom technology. New Jersey: John Wiley & Sons; 2008.
7. Whyte W. Cleanroom technology: fundamentals of design, testing and operation. New Jersey: John Wiley & Sons; 2010.
8. Kohli R, Mittal KL. Developments in Surface contamination and cleaning-vol 4: detection, characterization, and analysis of contaminants. Norwich: William Andrew; 2011.
9. Wang Y, Malkawi A. Annual hourly CFD simulation: new approach-an efficient scheduling algorithm for fast iteration convergence. Beijing, China: Building Simulation, Tsinghua University Press; 2014.
10. Bungartz HJ, Griebel M, Zenger C. Einführung in die computergraphik: grundlagen. geometrische modellierung algorithmen. Braunschweig: Vieweg-Verlag; 1996.
11. Tung YC, Hu SC, Xu T, Wang RH. Influence of ventilation

[ Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-08 ]

[ DOI: 10.21859/johe.4.3.8 ]

arrangements on particle removal in industrial cleanrooms with various tool coverage. *Build Simulat*. 2010;**3**(1):3-13. DOI 10.1007/s12273-010-030
12. Kuehn TH. Predicting air flow patterns and particle contamination in clean rooms. *J Aerosol Sci*. 1988; **19**(7):1405-8. DOI:10.1016/0021-8502(88)90185-1
13. John DA, Numbering CC. Air-distribution design. *Ashrae J*. 2013;**55**(5):84-5.
14. Zhang Y. Indoor air quality engineering. New York: CRC Press Boca Raton, FL; 2005.
15. de Expertos CT. Cleanrooms and associated controlled environments-part 1: Classification of air cleanliness. Mayo: International Organization for Standardization; 1999. P. 1-7.
16. Cleanrooms IS. Cleanrooms and associated controlled environments-part 3: test method. Switzerland: European Standard; 2005.
17. Zhao B, Wu J. Numerical investigation of particle diffusion in a clean room. *Indoor Built Environ*. 2005;**14**(6): 469-79.
18. Hu SC, Tung YC. Performance assessment for locally balanced and wall-return turbulent clean rooms by the stochastic particle tracking model. *Int J Architect Sci*. 2002;**3**(4):146-62.

[ Downloaded from johe.umsha.ac.ir on 2026-11-08 ]

[ DOI: 10.21859/johe.4.3.8 ]