

# حساسیت سنجی مکان ورودی و خروجی هوا بر میزان انتقال ذرات در اتاق اداری با

## استفاده از روش تاگوچی و آنالیز واریانس

حسن سجادی<sup>۱\*</sup>، سید نادر نبوی<sup>۲</sup>، گودرز احمدی<sup>۲</sup>، امین امیری دلویی<sup>۳</sup>، هومن نعیمی<sup>۳</sup>

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران

۲- دانشکده مکانیک و هوافضا، دانشگاه کلارکسون، نیویورک، آمریکا

۳- مرکز مطالعات و همکاری‌های بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

\* h.sajjadi@ub.ac.ir, hasansajadi@gmail.com

### چکیده

در پژوهش حاضر با استفاده از روش تاگوچی و آنالیز واریانس، میزان حساسیت انتشار ذرات داخل اتاق به موقعیت مکانی دریچه ورودی و خروجی هوا مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور تعداد ۸۶۴۰۰ ذره با اندازه یک میکرومتر در فاصله‌های زمانی یکسان به‌صورت همگن از دریچه ورودی به داخل اتاق تزریق گردید و موقعیت‌های مختلفی برای دریچه ورودی (۳۲ موقعیت) و دریچه خروجی (۴ موقعیت) بر روی سقف و کف اتاق در نظر گرفته شد. سپس رفتار ذره و میزان ته نشینی و ماندگاری ذره داخل اتاق برای یک دوره زمانی ۶۰ ثانیه ای با استفاده از روش شبکه بولتزمن چند زمانه مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از روش تاگوچی و آرایه‌های متعامد L<sub>16</sub>، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز به اندازه هشت برابر کاهش یافت. تمامی آزمایش‌های مشخص شده از آرایه متعامد شبیه‌سازی و مقدار ذرات معلق در فضای اتاق اندازه‌گیری شد. پس از انجام آزمایش‌ها، بر اساس عاملی به نام نسبت سیگنال به نویز و آنالیز واریانس داده‌ها، میزان اثرگذاری هر پارامتر بر خروجی مسئله مشخص گردید. با توجه به نتایج بدست آمده موقعیت طولی دریچه ورودی هوا با سهم ۸۴/۴۲ درصد بیشترین تاثیر را بر میزان ذرات معلق در اتاق داشت. همچنین کمترین تاثیر را موقعیت ارتفاع دریچه خروجی هوا با سهم ۰/۱۶ درصد دارد.

### کلمات کلیدی

آنالیز واریانس، روش تاگوچی، حساسیت سنجی، انتشار ذرات

از اواخر سال ۲۰۱۹ تا به امروز، جوامع جهانی با موضوع ویروس کووید-۱۹ مواجه شدند که به طور قابل توجهی بر مسائل مختلف از جمله مسائل اقتصادی و اجتماعی تأثیر گذاشت و نگرانی‌هایی را درباره تأثیر کیفیت محیط داخلی ساختمان‌ها بر سلامت انسانی ایجاد کرد. فاصله‌گذاری اجتماعی، ضد عفونی کردن، استفاده از ماسک، اجتناب از بازگرداندن هوا و استفاده از سیستم‌های تصفیه‌کننده هوا برای تمیز کردن هوای داخلی به‌عنوان استراتژی‌های موثر پیشگیری شناسایی و توصیه شدند. با این حال، برخی نگرانی‌ها و چالش‌ها هنوز در تأمین شرایط سلامت محیط داخلی ساختمان‌ها وجود دارد. به دلیل بسیاری از پیچیدگی‌ها درباره مسیرهای انتقال ویروس یکی از سوالات مهم این است که، چگونه مکان سیستم‌های تهویه مطبوع بر توزیع ویروس در محیط‌های داخلی تأثیر می‌گذارد. برای دستیابی به پاسخ این سوال، بررسی تأثیر مکان ورودی و خروجی هوا به داخل اتاق بر انتقال ذرات و همچنین حساسیت انتشار ذرات به موقعیت ورود و خروج هوا ضروری است. از طرفی مطالعه آزمایشگاهی این موضوع بسیار چالش برانگیز و پرهزینه است، لذا روش‌های عددی ابزار ارزشمند و قابل اعتمادی برای ارزیابی این مسئله فراهم می‌کند [۱-۴].

بهاگات و همکاران<sup>۲</sup> [۵] درباره اهمیت جریان هوا و تهویه ساختمان در تخمین خطر ابتلا به کووید-۱۹ بحث کردند. نتایج آنها نشان داد که به نظر می‌رسد، انتقال ویروس سارس-کووید-۱۹ در داخل ساختمان اهمیت بیشتری نسبت به انتقال در فضاهای باز دارد، زیرا زمان تماس بیشتر و کاهش سطح آشفتنگی هوا در داخل منازل، منجر به کاهش انتقال ذرات به بیرون از اتاق می‌شود. همچنین تهویه ساختمان نقش حیاتی در مسیرهای ممکن برای انتشار ذرات ایفا می‌کند. گلدبلاط و همکاران<sup>۴</sup> [۶] بر روی انتقال ویروس در کلاس درسی بدون سیستم تهویه مطبوع مکانیکی تمرکز کردند. احمدزاده و شمس [۷] یک روش عددی برای جلوگیری از پراکندگی بیماری عفونی در اتاق جلسه را معرفی کردند. آنها از نرم‌افزار انسیس-فلوئنت<sup>۵</sup> برای بررسی پراکندگی ذرات و بررسی تولید شده در داخل یک اتاق جلسه ایمن استفاده کردند. هدف اصلی این مطالعه بررسی اثرات فرکانس باز شدن پنجره، طرح‌بندی خروجی و مکان سیستم‌های تهویه مطبوع بر پراکندگی ذرات است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش ظرفیت خروجی با افزایش غلظت ذرات معلق و افزایش مسافت طی شده باعث افزایش مواجهه افراد با آلاینده‌ها می‌شود. علاوه بر این، کاهش فاصله بین محل نصب شده سیستم‌های تهویه و سقف می‌تواند میزان ذرات معلق را تا بیش از ۳۵ درصد کاهش دهد و تعداد افرادی که در معرض آلودگی ذرات ویروسی قرار می‌گیرند از ۶ به ۲ کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان داد زمانی که جهت جریان هوای ورودی و ذرات تولید شده یکسان بود، کسر ذرات معلق ۴/۱۲۵ درصد بود، در حالی که اگر ورودی‌ها به جهت مخالف تزریق ذرات منتقل شوند، کسر ذرات در سیال ۵۰۰۰ درصد افزایش می‌یابد. سجادی و همکاران [۸] تأثیر مکان دریچه ورودی هوا بر رفتار ذرات داخل ساختمان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که مکان دریچه ورودی هوا تأثیر زیادی بر میزان انتشار ذرات خواهد داشت و هنگامی که دریچه ورودی هوا در کف اتاق قرار دارد خروجی ذرات با سایز بزرگ (۱۰ میکرومتر) نسبت به حالتی که دریچه در سقف قرار دارد بیشتر است و از لحاظ کیفیت، هوای داخل اتاق مناسب‌تر خواهد بود. یونسی و همکاران تأثیر موقعیت‌های مختلف خروجی هوا بر کیفیت هوای داخل یک هندسه دو بعدی مربعی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که تغییر موقعیت خروجی تأثیر قابل توجهی بر میزان احساس راحتی افراد خواهد داشت و جریان هوای داخل را تحت تأثیر قرار خواهد داد [۹]. جیانگ و همکاران تأثیر فاصله دریچه‌های ورودی هوا را در یک سیستم تهویه لایه ای متشکل از چند دریچه ورودی مجزا را به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که عملکرد بهینه از لحاظ توزیع و تهویه مناسب هوا مربوط به زمانی خواهد بود که فاصله بین دریچه‌های ورودی برابر ۸۰۰ میلی‌متر است [۱۰].

انواع مختلفی از روش‌های بهینه‌سازی وجود دارد که هدف آن‌ها یافتن بهترین راه‌حل یا ترکیبی از متغیرهایی است که یک تابع هدف خاص را بهینه می‌کند. در بین این روش‌ها طراحی آزمایش‌ها<sup>۶</sup> یک رویکرد سیستماتیک برای انجام آزمایش‌ها است که بر اساس

<sup>1</sup> COVID-19

<sup>2</sup> Bhagat et al.

<sup>3</sup> SARS-CoV-2

<sup>4</sup> Goldblatt et al.

<sup>5</sup> ANSYS Fluent

<sup>6</sup> Design of Experiments (DOE)

نتایج تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش‌ها، می‌تواند سطوح بهینه برای دستیابی به پاسخ مطلوب را تعیین کند [۱۱]. روش تاگوچی [۱۲] یک روش بهینه‌سازی قدرتمند در زمینه طراحی آزمایش‌ها است که هدف آن بهبود کیفیت یک تابع هدف با کاهش حساسیت به تغییرات یا عوامل نویز است. روش تاگوچی با ارائه آرایه‌های متعامد استاندارد، تعداد آزمایش‌ها را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. اگرچه استفاده از آرایه‌های متعامد منجر به کم شدن تعداد آزمایش‌های لازم می‌گردد، اما همچنان می‌توان بیشترین اطلاعات را از نتایج این آزمایش‌ها استخراج کرد. روش تاگوچی توسط بسیاری از پژوهشگران و در شاخه‌های مختلف علوم استفاده شده است [۱۳-۱۵]. این روش با استفاده از عاملی به نام نسبت سیگنال به نویز<sup>۱</sup>، تأثیر تغییرات پارامتر ورودی بر عملکرد خروجی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد که در نتیجه آن حساسیت پارامترها را بررسی می‌کند. با تجزیه و تحلیل مقادیر نسبت سیگنال به نویز، این روش ترکیب بهینه سطوح پارامترهای ورودی را شناسایی می‌کند.

فلاح<sup>۲</sup> [۱۶] حساسیت پارامترهای خروجی از جمله میزان انتقال حرارت به پارامترهای ورودی از جمله عدد رینولدز را با استفاده از روش تاگوچی با آرایه متعامد L<sub>16</sub> و آنالیز واریانس<sup>۳</sup> مورد بررسی قرار داد. مدل بهینه‌سازی شده نشان داد که در مقایسه با مدل اصلی، بهبودهای قابل توجهی در عملکرد قابل مشاهده است؛ به طوری که افزایشی به میزان ۹۴/۵ درصد برای عدد ناسلت مشاهده می‌شود. همچنین آنالیز حساسیت نشان داد که زاویه پیش‌کش کانال‌های کوچک با ۵۰/۶۷ درصد، نقش مهمی در عدد تولید آنتروپی دارد. درباری و همکاران<sup>۴</sup> [۱۷] از روش تاگوچی با آرایه متعامد L<sub>25</sub> و آنالیز واریانس برای انجام تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی جریان نانوسیال در مبدل حرارتی استفاده کردند که منجر به کاهش هشتاد درصدی در میزان محاسبات شد. تسطیح لوله‌ها در گرم‌کن‌ها باعث افزایش کارایی انتقال حرارت می‌شود، در حالی که افزایش غلظت حجمی نانوذرات همزمان باعث افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش فشار جریان می‌شود. ترکیب تسطیح لوله‌ها و افزایش غلظت حجمی نانوذرات کارایی مبدل حرارتی را افزایش می‌دهد. بهرامی و همکاران [۱۸] تأثیر طول کورد، فاصله استاتور تا پروانه و زاویه حمله استاتور را بر کاهش گشتاور اضافی پروانه و افزایش بازدهی سیستم رانش بررسی کردند. آنها با استفاده از روش تاگوچی حالت بهینه را مشخص کردند و نشان دادند که استاتور نهایی طراحی شده برای زیرسطحی در عین حال که گشتاور را ۴۷/۴۴ درصد نسبت به حالت بدون استاتور کاهش می‌دهد، بازدهی سیستم رانش را نیز ۲۹/۲ درصد بهبود داده است. همچنین استاتور طراحی شده باعث کاهش گردابه نوک پره و هاب پروانه شده است.

روش شبکه بولتزمن<sup>۵</sup> به‌عنوان یک روش محاسباتی کارآمد برای شبیه‌سازی جریان‌های سیال در کاربردهای مختلف به کار برده می‌شود [۱۹]. در زمینه شبیه‌سازی جریان هوای داخلی، این روش قابلیت خوبی در پیش‌بینی رفتار سیال دارد. علاوه بر این، ترکیب روش شبکه بولتزمن با مدل حل شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ<sup>۶</sup> برای مدل‌سازی جریان هوای آشفته داخلی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج، دقت و سرعت بالای این روش را نشان داده است [۲۰]. در زمینه کیفیت هوای داخلی، لی و همکاران<sup>۷</sup> [۲۱] روش شبکه بولتزمن را با مدل شبیه‌سازی ادی‌های بزرگ ترکیب کردند تا میدان سرعت هوای داخلی و پخش گازهای مضر را شبیه‌سازی کنند، که نشان دهنده قابلیت استفاده از روش ارائه شده در بررسی رفتار ذرات داخلی است. بازدیدی-تهرانی و سرگزی زاده<sup>۸</sup> [۲۲] از روش شبکه بولتزمن موازی و همچنین روش گسسته‌سازی حجم محدود<sup>۹</sup> برای حل جریان داخلی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که تعداد شبکه‌های مورد نیاز برای حل جریان با استفاده از روش شبکه بولتزمن نسبت به روش حجم محدود بیشتر است اما زمان محاسباتی با استفاده از روش شبکه بولتزمن کاهش یافت. علاوه بر این آنها نشان دادند که روش شبکه بولتزمن به خوبی قادر است گردابه‌های شکل گرفته در جریان را پیش‌بینی کند، پیش‌بینی دقیق گردابه‌ها تأثیر بسیار زیادی در دقت بررسی رفتار ذرات خواهد داشت.

<sup>1</sup> Signal to noise ratio

<sup>2</sup> Falahat

<sup>3</sup> ANOVA

<sup>4</sup> Darbari et al

<sup>5</sup> Lattice Boltzmann method

<sup>6</sup> Large Eddy Simulation

<sup>7</sup> Li et al.

<sup>8</sup> Bazdidi-Tehrani and Sargazizadeh

<sup>9</sup> Finite Volume Method

همانطور که در بررسی پژوهش های قبلی مشاهده شد، بررسی تاثیر مکان دریچه های ورودی و خروجی هوا بر کیفیت هوای داخلی بسیار حائز اهمیت است و از طرفی تا کنون حساسیت سنجی پارامترهای مکانی ورودی و خروجی هوا بر میزان انتقال ذرات در محیط های داخلی مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در پژوهش حاضر برای اولین بار با استفاده از روش تاگوچی و آنالیز واریانس، حساسیت میزان انتشار ذرات در محیط های داخلی به پارامترهای مکانی ورودی و خروجی جریان هوا مورد بررسی قرار خواهد گرفت و درصد تاثیر متغیرهای مکانی ورودی و خروجی هوا بر میزان انتشار ذرات ارائه خواهد شد.

## ۲- هندسه مورد بررسی

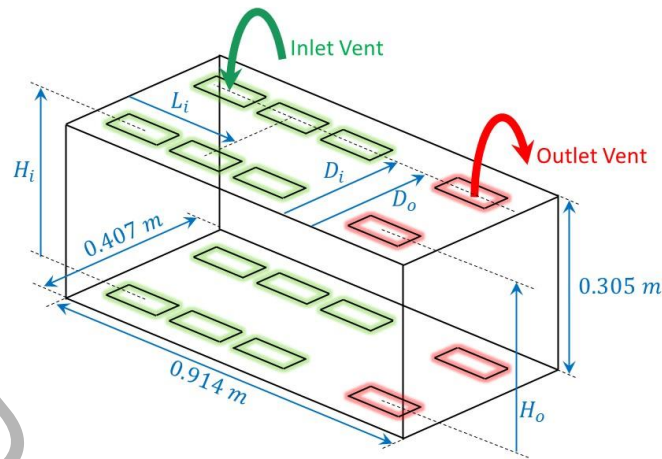
بدون شک دو پارامتر موقعیت ورودی و خروجی جریان می تواند تأثیر بسزایی در نحوه انتشار ذرات در فضای اتاق داشته باشد. لذا میزان اهمیت موقعیت طولی، عرضی و ارتفاع دریچه های ورودی و خروجی هوا بسیار مهم است. به همین منظور با در نظر گرفتن ۸ موقعیت در راستای طولی، ۲ موقعیت در راستای عرضی و ۲ موقعیت در راستای ارتفاع (سقف و یا کف اتاق)، ۳۲ موقعیت مختلف برای هوای ورودی در نظر گرفته شده است. همچنین ۲ موقعیت عرضی و ۲ موقعیت ارتفاع (سقف و کف اتاق) برای خروجی جریان لحاظ شد. ابعاد دریچه ورودی و خروجی یکسان و برابر  $0/101 \times 0/101$  متر است. عدد رینولدز جریان بر پایه طول دریچه ورودی و سرعت جریان ورودی برابر با ۱۵۰۰ و چگالی هوا برابر  $1/18$  کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته سیال برابر  $1/48 \times 10^{-5}$  مترمربع بر ثانیه هستند. سیال مورد بررسی تراکم ناپذیر و نیوتنی می باشد همچنین جریان مغشوش در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است ابعاد هندسه در نظر گرفته شده، ابعاد یک اتاق اداری واقعی با نسبت ۱:۱۰ می باشد.

نمایی از اتاق مورد نظر و پارامترهای هندسی بکار رفته به منظور موقعیت دهی ورودی و خروجی جریان در شکل ۱ نشان داده شده است.  $D_i, L_i$  و  $H_i$  به ترتیب بیانگر موقعیت طولی، عرضی و ارتفاع ورودی جریان و  $D_o$  و  $H_o$  به ترتیب بیانگر موقعیت عرضی و ارتفاع خروجی جریان هستند که در جدول ۱ نشان داده شده اند.

جدول ۱: مختصات پارامترهای هندسی دریچه خروجی و ورودی

Table 1: Coordinates of geometrical parameters of outlet and inlet register

پارامترهای خروجی		پارامترهای ورودی		
$D_o$	$H_o$	$D_i$	$H_i$	$L_i$
				$L_1 = 0/056$ m
				$L_2 = 0/123$ m
$D_1 = 0/164$ m	$H_1 = 0/305$ m	$D_1 = 0/164$ m	$H_1 = 0/305$ m	$L_3 = 0/190$ m
				$L_4 = 0/257$ m
				$L_5 = 0/324$ m
				$L_6 = 0/391$ m
$D_2 = 0/392$ m	$H_2 = 0/100$ m	$D_2 = 0/392$ m	$H_2 = 0/100$ m	$L_7 = 0/458$ m
				$L_8 = 0/525$ m



شکل ۱: هندسه مورد بررسی

Figure 1: The case study geometry

برای مطالعه اثرات پنج پارامتر معرفی شده که یکی از آن‌ها دارای هشت سطح (موقعیت طولی هوای ورودی) و چهار پارامتر دیگری هر کدام دارای دو سطح هستند،  $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 128$  ترکیب ممکن از موقعیت‌های آزمایشی وجود خواهد داشت که انجام این تعداد آزمایش بسیار زمانبر بوده و مقرون به صرفه نیز نمی‌باشد. با استفاده از آرایه متعامد استاندارد  $L_{16}$  که برای طراحی آزمایش‌ها با داشتن پنج پارامتر و سطوح مختلف مناسب است می‌توان تعداد آزمایش‌ها را تا حد چشمگیری به عدد ۱۶ کاهش داد. جدول ۲ آرایه متعامد  $L_{16}$  برای طراحی آزمایش‌ها به منظور بهینه‌سازی یک سیستم تهویه مطبوع را برای فضای اتاق نشان می‌دهد. اعداد در نظر گرفته شده در داخل جدول سطح هر پارامتر را نشان می‌دهد.

جدول ۲: آرایه متعامد  $L_{16}$  تاگوچی

Table 2:  $L_{16}$  Taguchi orthogonal array

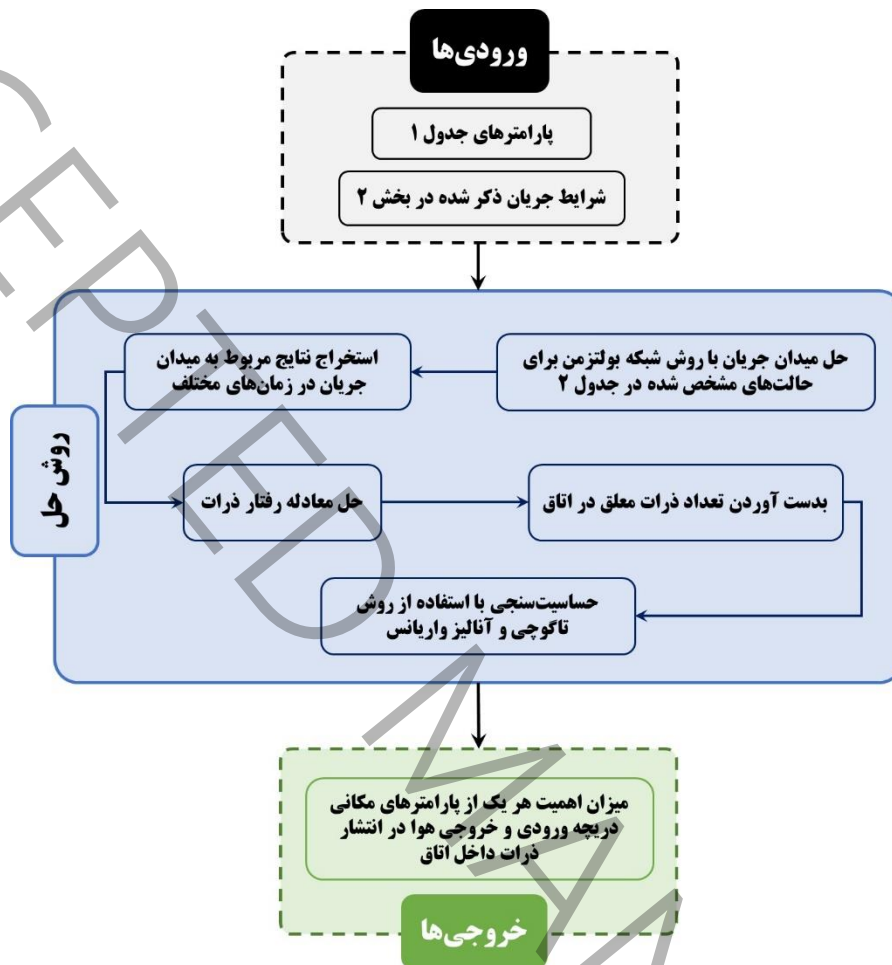
$H_o$	$D_o$	$H_i$	$D_i$	$L_i$	شماره آزمایش	$H_o$	$D_o$	$H_i$	$D_i$	$L_i$	شماره آزمایش
۲	۱	۲	۱	۵	۹	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱	۲	۱	۲	۵	۱۰	۲	۲	۲	۲	۱	۲
۲	۱	۲	۱	۶	۱۱	۱	۱	۱	۱	۲	۳
۱	۲	۱	۲	۶	۱۲	۲	۲	۲	۲	۲	۴
۱	۲	۲	۱	۷	۱۳	۲	۲	۱	۱	۳	۵
۲	۱	۱	۲	۷	۱۴	۱	۱	۲	۲	۳	۶
۱	۲	۲	۱	۸	۱۵	۲	۲	۱	۱	۴	۷
۲	۱	۱	۲	۸	۱۶	۱	۱	۲	۲	۴	۸

در این پژوهش بایستی تمامی آزمایش‌های نمایش داده شده در جدول ۲ شبیه‌سازی شوند و مقدار ذرات معلق در فضای اتاق اندازه‌گیری گردد. پس از انجام آزمایش‌ها، بر اساس عاملی به نام نسبت سیگنال به نویز<sup>۱</sup> و آنالیز واریانس داده‌ها میزان اثرگذاری هر پارامتر بر خروجی مسئله مشخص خواهد شد.

<sup>۱</sup> Signal to noise (S/N) ratio

### ۳- روش حل

الگوریتم فرآیند حل انجام شده در مقاله حاضر در شکل ۲ نمایش داده شده است که روش حل انجام شده در ادامه توضیح داده خواهد شد.



شکل ۲: الگوریتم حل انجام شده

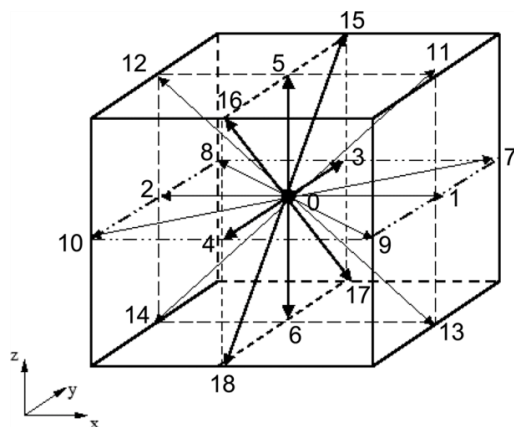
Figure 2: The solution algorithm

### ۳-۱- روش شبکه بولتزمن با زمان آرامش چندگانه<sup>۱</sup>

برای استفاده از روش تاکوچی به منظور بررسی حساسیت میزان ذرات معلق در اتاق نسبت به موقعیت ورودی و خروجی جریان ابتدا باید داده‌های مربوط به انتشار ذرات داخل اتاق برای نمونه‌های ذکر شده در جدول ۲ را بدست آورد. برای این منظور از روش شبکه بولتزمن با زمان آرامش چندگانه استفاده شد. در این روش برای بدست آوردن میدان جریان از تابع توزیع به صورت زیر استفاده می شود [۸]:

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) - M_{ij}^{-1} \cdot \hat{S}_{jk} \cdot [R_k(x, t) - R_k^{eq}(x, t)] \quad (1)$$

<sup>1</sup> Multi Relaxation Time-Lattice Boltzmann Method



شکل ۳: بردارهای سرعت برای شبکه D3Q19

Figure 3: Velocity vectors for lattice D3Q19

دلیل نامگذاری روش ذکر شده این است که از یک زمان آرامش ثابت استفاده نمی شود و در جهات مختلف از زمان های آرامش متفاوتی استفاده خواهد شد که این مقادیر با توجه به شبکه مدنظر در مقاله حاضر (D3Q19) که در شکل ۳ نمایش داده است به صورت زیر ارائه می شود [۸]:

$$\hat{S}_{ij} = \text{diag}(s_0, s_1, \dots, s_{18}) \quad (2)$$

$$s_1 = 1.19 \quad (3)$$

$$s_0 = s_3 = s_5 = s_7 = 0. \quad (4)$$

$$s_9 = s_{11} = s_{13} = s_{14} = s_{15} = \frac{1}{(3v_t + 0.5)} \quad (5)$$

$$s_2 = s_{10} = s_{12} = 1.4 \quad (6)$$

$$s_4 = s_6 = s_8 = 1.2 \quad (7)$$

$$s_{16} = s_{17} = s_{18} = 1.98 \quad (8)$$

همانطور که در رابطه ۵ قابل مشاهده است برای تعدادی از زمان های آرامش نیاز به محاسبه  $v_t$  (ویسکوزیته سینماتیکی مغشوش) است، که برای این منظور از مدل حل ادی ها بزرگ<sup>۱</sup> و اسمانگورنسکی استاندارد به صورت زیر استفاده گردید:

$$v_t = (C_s \Delta)^2 |S| \quad (9)$$

در مقاله حاضر مقدار ثابت  $C_s$  برابر ۰/۱۶ در نظر گرفته شد و همچنین  $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$  است و برای بدست آوردن مقدار  $|S|$  داریم [۸]:

$$|S_{\alpha\beta}| = \sqrt{2S_{\alpha\beta}S_{\alpha\beta}} = \sqrt{2[S_{xx}^2 + S_{yy}^2 + S_{zz}^2 + 2(S_{xy}^2 + S_{yz}^2 + S_{xz}^2)]} \quad (10)$$

<sup>1</sup> Large eddy simulation

$$S_{xx} = -\frac{1}{38\rho} [s_1 h_1^{neq} + 19s_9 h_9^{neq}] \quad (11)$$

$$S_{yy} = -\frac{1}{76\rho} [2s_1 h_1^{neq} - 19(s_9 h_9^{neq} - 3s_{11} h_{11}^{neq})] \quad (12)$$

$$S_{zz} = -\frac{1}{76\rho} [2s_1 h_1^{neq} - 19(s_9 h_9^{neq} + 3s_{11} h_{11}^{neq})] \quad (13)$$

$$S_{xy} = -\frac{3}{2\rho} s_{13} h_{13}^{neq} \quad (14)$$

$$S_{yz} = -\frac{3}{2\rho} s_{14} h_{14}^{neq} \quad (15)$$

$$S_{xz} = -\frac{3}{2\rho} s_{15} h_{15}^{neq} \quad (16)$$

$$h_\alpha^{neq} = R_\alpha - R_\alpha^{eq} \quad (17)$$

در رابطه ۱  $c_i$  نشان دهنده سرعت ذرات بوده که برای شبکه D3Q19 به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$c_i = \begin{cases} (0,0) & i=0 \\ c(\pm 1, 0, 0), c(0, \pm 1, 0), c(0, 0, \pm 1) & i=1-6 \\ c(\pm 1, \pm 1, 0), c(\pm 1, 0, \pm 1), c(0, \pm 1, \pm 1) & i=7-18 \end{cases} \quad \text{for } D3Q19 \quad (18)$$

که در آن  $c = \delta x / \delta t$ ،  $\delta x$  و  $\delta t$  به ترتیب مقادیر ثابت طول و زمان در شبکه هستند که برابر یک در نظر گرفته شده اند. همچنین برای  $R$  داریم:

$$R = MF \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)  $F$  ماتریس توابع توزیع ( $f$ ) است و ماتریس  $M$  از رابطه زیر محاسبه می‌شود:



$$M = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -30 & -11 & -11 & -11 & -11 & -11 & -11 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 \\ 12 & -4 & -4 & -4 & -4 & -4 & -4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -4 & 4 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 2 & 2 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -2 & -2 & -2 \\ 0 & -4 & -4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -2 & -2 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2 & -2 & 2 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

در نهایت با مشخص شدن تمام پارامترهای رابطه (۱)، پس از محاسبه توابع توزیع سرعت، مقادیر ماکروسکوپی سرعت و چگالی از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\rho(x,t) = \sum_i f_i(x,t), \quad \rho u(x,t) = \sum_i f_i(x,t) c_i \quad (21)$$

پس از بدست آوردن میدان جریان با استفاده از روش شبکه بولتزمن با زمان آرامش چندگانه، به منظور بررسی رفتار ذرات، تعداد ۱۴۴ ذره با اندازه یک میکرومتر با فاصله زمانی ۰/۰۵ ثانیه و به مدت ۳۰ ثانیه (تعداد کل ۸۶۴۰۰) از ورودی هوا به داخل اتاق تزریق گردید و تا زمان ۶۰ ثانیه حرکت ذره مورد بررسی قرار گرفت. برای رهگیری حرکت ذره معادله کلی حرکت ذره که به صورت رابطه ۲۲ بیان می‌شود حل شد.

$$\frac{du_i^p}{dt} = \frac{1}{\tau_p} \frac{C_D \text{Re}_p}{24} (u_i - u_i^p) + (1 - \frac{1}{s}) g_i + n_i(t) \quad (22)$$

پارامترهای موجود در بخش اول سمت راست رابطه (۲۲) که بیانگر نیروی پسا بر واحد جرم ذره می‌باشد به شرح زیر محاسبه می‌شوند [۸]:

$$\tau_p = \frac{Sd^2 C_c}{18\nu} \quad (23)$$

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d} (1.257 + 0.4e^{-\frac{1.1d}{\lambda}}) \quad (24)$$

$C_D$  ضریب پسا می‌باشد و از رابطه بدست می‌آید [۸]:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad Re_p < 1 \quad (25)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad 1 < Re_p < 400$$

که  $Re_p$  معرف عدد رینولدز ذره می باشد و داریم  $u_{rel} = u_j - u_j^p$   $Re_p = \frac{d|u_{rel}|}{\nu}$  در نهایت برای محاسبه نیروی برونین<sup>۱</sup> از رابطه زیر استفاده می شود [۸]:

$$n_i(t) = \zeta_i \sqrt{\frac{\pi S_1}{\Delta t}} \quad (26)$$

$$S_1 = \frac{216\nu k_b T}{\pi^2 \rho d^5 S^2 C_c}$$

### ۳-۲- روش تاگوچی

در روش تاگوچی، پارامترها یا متغیرهای مسئله به دو گروه پارامترهای قابل کنترل و غیر قابل کنترل تقسیم می شوند. عوامل کنترلی<sup>۲</sup> آن دسته از عواملی هستند که کنترل آن‌ها به راحتی امکان پذیر است و به منظور انتخاب بهترین شرایط در مسئله بکار می روند. عوامل غیر کنترلی<sup>۳</sup> تمام عواملی هستند که باعث ایجاد تغییرات می شوند؛ اما به دلیل آنکه کنترل آن‌ها مشکل است یا شناخت کافی از آن‌ها وجود ندارد ثابت در نظر گرفته می شوند.

نسبت سیگنال به نویز، نشان دهنده حساسیت مشخصه مورد بررسی به پارامترهای ورودی در یک فرآیند کنترل شده است. مقدار این تابع با توجه به ماهیت تابع پاسخ از میان سه حالت هر چه کمتر بهتر<sup>۴</sup>، هر چه به مقدار اسمی نزدیک تر بهتر<sup>۵</sup> و هر چه بزرگ تر بهتر<sup>۶</sup> انتخاب می شود که روابط آنها به ترتیب برای هر یک از حالت‌ها به صورت زیر محاسبه می گردد [۱۲]:

$$SN_{LB} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (27)$$

$$SN_{SB} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (28)$$

$$SN_{NB} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2 \right) \quad (29)$$

<sup>1</sup> Brownian force

<sup>2</sup> Signal Factor

<sup>3</sup> Noise Factor

<sup>4</sup> Smaller the better

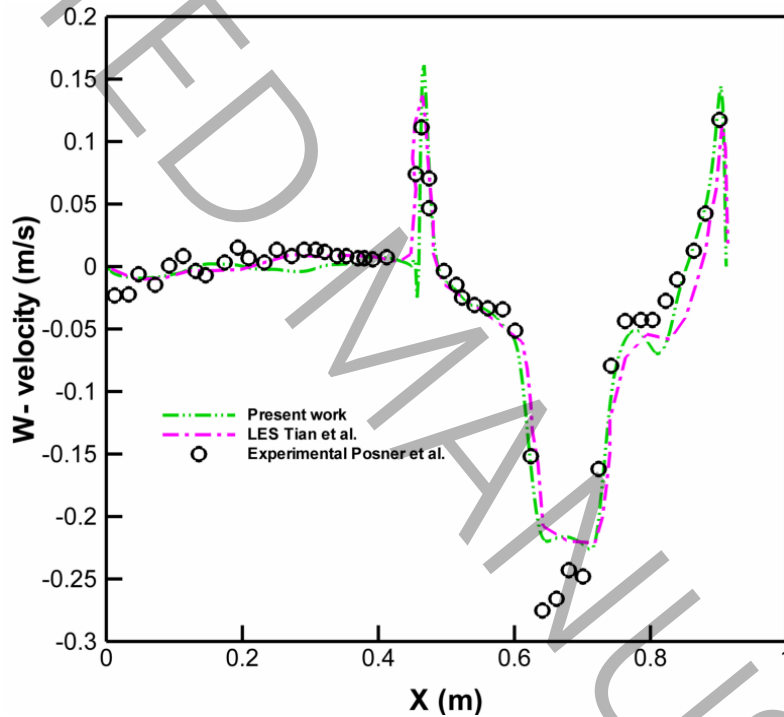
<sup>5</sup> Nominal the best

<sup>6</sup> Larger the better

که در آن  $n$  تعداد تکرار آزمایش‌ها،  $y_i$  خروجی اندازه‌گیری شده از داده‌های آزمایشگاهی و  $y_0$  اندازه مقدار مطلوب است. در هر صورت، به منظور پیدا کردن شرایط بهینه همواره بالاترین نسبت سیگنال به نویز مطلوب است. مقادیر بالای نسبت سیگنال به نویز نشان‌دهنده‌ی این است که اثر پارامترهای قابل کنترل بیشتر از اثر پارامترهای غیر قابل کنترل و اغتشاشی است.

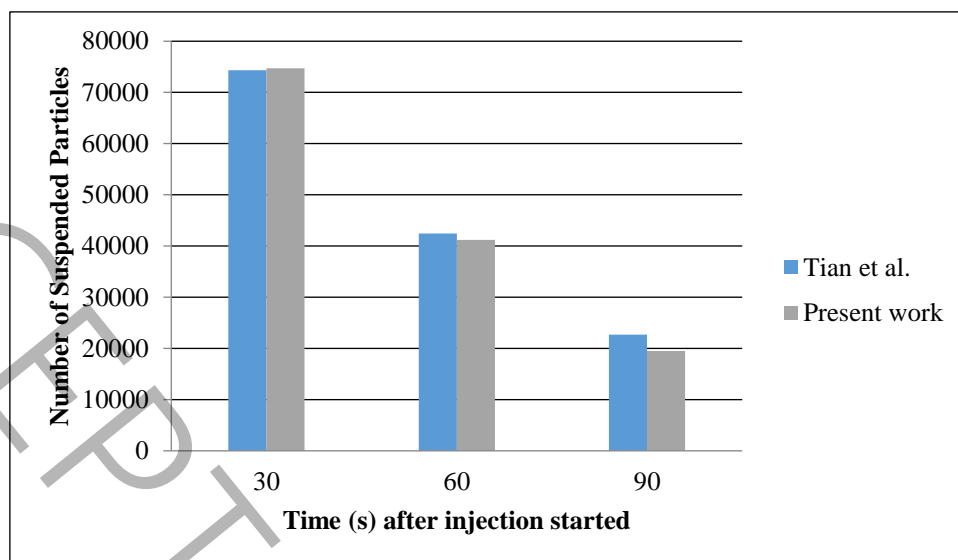
#### ۴- اعتبار سنجی

در این بخش به منظور بررسی صحت حل انجام شده، نتایج بدست آمده برای میدان جریان و رفتار ذرات با نتایج کارهای قبلی که به صورت آزمایشگاهی [۲۳] و عددی [۲۴] در هندسه‌ی تقریباً مشابه هندسه حاضر انجام شده است مقایسه گردید. شکل (۴) مولفه عمودی سرعت را در امتداد یک خط افقی نمایش داده است همانطور که مشاهده می‌شود نتایج همخوانی بسیار خوبی با نتایج عددی و آزمایشگاهی گذشته دارد و صحت حل انجام شده برای میدان جریان را تایید می‌کند. شکل (۵) مقایسه نتایج بدست آمده برای تعداد ذرات معلق در اتاق را برای ذره با اندازه یک میکرومتر نمایش داده است که با توجه به خطای ناچیز (کمتر از ۵ درصد) صحت حل انجام شده قابل مشاهده است.



شکل ۴: مؤلفه عمودی سرعت در امتداد یک خط افقی از دیواره سمت چپ اتاق تا دیواره سمت راست اتاق.

Figure 4: The vertical component of velocity along a horizontal line from the left wall of the room to the right wall of the room

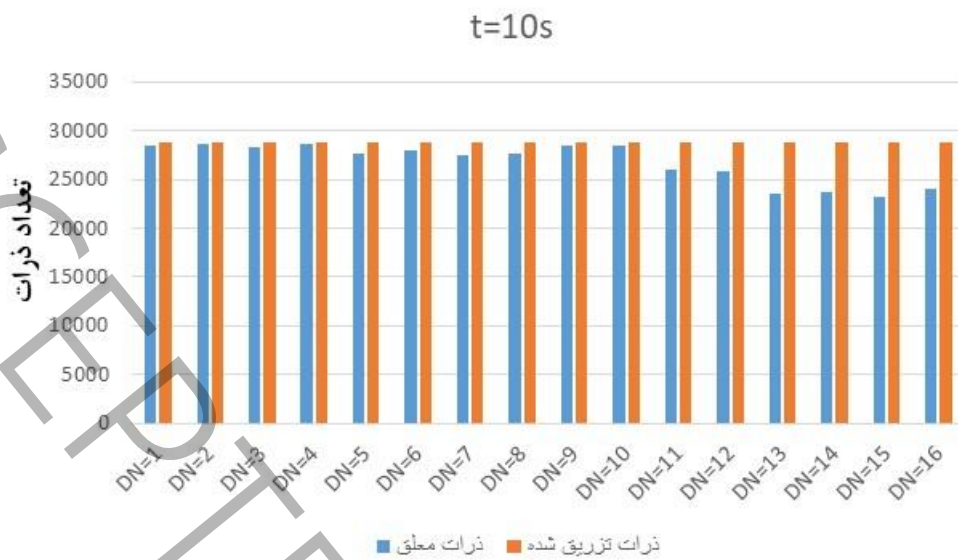


شکل ۵: مقایسه تعداد ذرات معلق در اتاق بر حسب زمان (یک میکرومتر)

Figure 5: Comparison of the number of suspended particles in the room over time (1  $\mu\text{m}$ )

#### ۵- نتایج

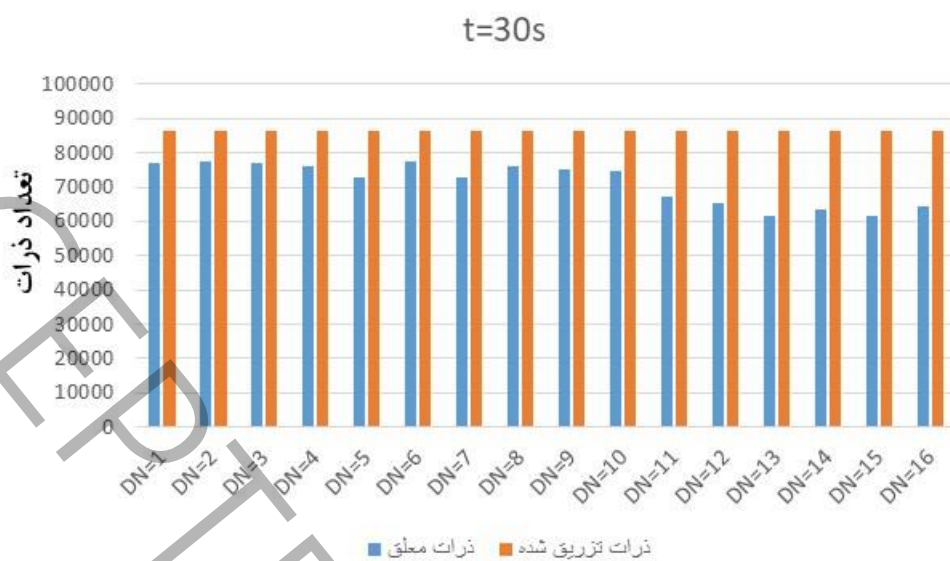
در این بخش ابتدا نتایج به دست آمده از اجرای برنامه برای موقعیت‌های مختلف دریچه ورودی و خروجی هوا که در جدول ۲ نمایش داده شده اند، در زمان‌های مختلف ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با تغییر مکان خروجی و ورودی جریان میزان ذرات معلق در اتاق تغییر می‌کند. از آنجاییکه تا زمان ۳۰ ثانیه تزریق ذره به داخل اتاق ادامه دارد، در شکل‌های ۶ تا ۸ تعداد ذرات تزریق شده و همچنین تعداد ذرات معلق افزایش می‌یابد، سپس با توقف تزریق ذره، در شکل‌های ۹ تا ۱۱ کاهش در تعداد ذرات معلق قابل مشاهده است. دلیل کاهش تعداد ذرات معلق این واقعیت است که با گذر زمان تعدادی از ذرات داخل اتاق بر روی دیواره‌ها ته نشین می‌شوند و همچنین تعدادی از آنها در مسیر جریان هوا از دریچه خروجی جریان از اتاق خارج خواهند شد. برای محاسبه تعداد ذرات معلق در اتاق، مجموع ذرات ته نشین شده بر روی دیواره‌های اتاق و خارج شده از دریچه خروجی اتاق از کل ذرات تزریق شده کم شده است. بر اساس داده‌های نمایش داده شده در شکل‌های ۶ تا ۱۱ نمی‌توان تشخیص داد که کدام پارامتر تاثیر بیشتر یا کمتری بر میزان ذرات معلق در اتاق دارد، لذا به منظور بررسی این موضوع که هر پارامتر چه میزان می‌تواند در ماکزیمم سازی و یا مینیمم سازی میزان ذرات معلق در اتاق اثر داشته باشد باید تغییرات شاخص نسبت سیگنال به نویز در هر پارامتر به صورت مجزا محاسبه گردد.



شکل ۶: تعداد ذرات تزریق شده و معلق در زمان ۱۰ ثانیه  
**Figure 6: The number of injected and suspended particles at time t=10 s**



شکل ۷: تعداد ذرات تزریق شده و معلق در زمان ۲۰ ثانیه  
**Figure 7: The number of injected and suspended particles at time t=20 s**



شکل ۸: تعداد ذرات تزریق شده و معلق در زمان ۳۰ ثانیه  
**Figure 8: The number of injected and suspended particles at time t=30 s**



شکل ۹: تعداد ذرات تزریق شده و معلق در زمان ۴۰ ثانیه  
**Figure 9: The number of injected and suspended particles at time t=40 s**



شکل ۱۰: تعداد ذرات تزریق شده و معلق در زمان ۵۰ ثانیه

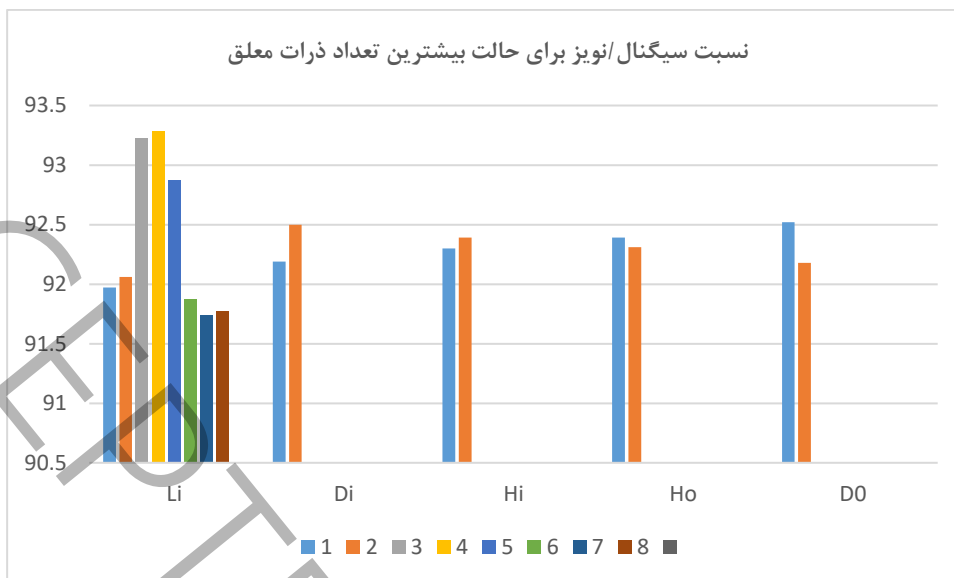
Figure 10: The number of injected and suspended particles at time t=50 s



شکل ۱۱: تعداد ذرات تزریق شده و معلق در زمان ۶۰ ثانیه

Figure 11: The number of injected and suspended particles at time t=60 s

شکل ۱۲ برای حالت بیشترین تعداد ذرات معلق در اتاق، مقدار نسبت سیگنال به نویز را نشان می‌دهد. با توجه به معادلات ۲۷ و ۲۸ که تفاوت آن‌ها فقط در یک علامت منفی است، بدون شک برای حالت کمترین ذرات معلق شکلی مشابه حاصل می‌شود که تنها اعداد آن در علامت منفی ضرب شده است. حال برای تحلیل حساسیت پارامترهای مدنظر باید تغییرات نسبت سیگنال به نویز را برای هر پارامتر مشخص کرد.



شکل ۱۲: مقادیر نسبت سیگنال به نویز با در نظر گرفتن بیشترین تعداد ذرات معلق در اتاق

Figure 12: Signal to noise ratio values considering the maximum number of suspended particles in the room

جدول ۳ میزان تغییرات نسبت سیگنال به نویز را برای پارامترهای مختلف نشان داده است. هر چه این تغییرات بیشتر باشد اثرگذاری آن پارامتر بر خروجی مسئله بیشتر است. از آنجایی که تفاوت حالت بیشترین و کمترین میزان ذرات معلق فقط یک علامت منفی در داده‌های مربوط به نسبت سیگنال به نویز است، لذا میزان تغییرات نسبت سیگنال به نویز برای هر پارامتر و هر دو ماهیت مسئله تفاوتی نمی‌کند و جدول ۳ برای هر دو حالت صادق است. در جدول ۳ ردیف مربوط به دلتا<sup>۱</sup>، تفاوت مقادیرهای بیشینه و کمینه‌ی نسبت سیگنال به نویز را برای هر یک از پارامترها معرفی می‌کند که دلتای بزرگ‌تر معرف تاثیرگذاری بیشتر است. بدین ترتیب می‌توان پارامترها را بر اساس میزان تاثیرگذاری آن‌ها دسته‌بندی کرد که در ردیف مربوط به رنک<sup>۲</sup>، این مورد نشان داده شده است.

جدول ۳: میزان اهمیت هر یک از پارامترهای مسئله بر اساس تعداد ذرات معلق در اتاق

Table 3: The importance of each of the parameters of the problem based on the number of suspended particles in the room

$H_o$	$D_o$	$H_i$	$D_i$	$L_i$	سطح
۹۲/۳۹	۹۲/۵۲	۹۲/۳۰	۹۲/۱۹	۹۱/۹۷	۱
۹۲/۳۱	۹۲/۱۸	۹۲/۳۹	۹۲/۵۰	۹۲/۰۶	۲
				۹۳/۲۲	۳
				۹۳/۲۸	۴
				۹۲/۸۷	۵
				۹۱/۸۷	۶
				۹۱/۷۳	۷
				۹۱/۷۷	۸
۰/۰۸	۰/۳۵	۰/۰۹	۰/۳۱	۱/۵۵	تغییرات
۵	۲	۴	۳	۱	درجه اهمیت

<sup>1</sup> Delta

<sup>2</sup> Rank



بر اساس داده‌های جدول ۳ مشاهده گردید که پارامتر  $L_i$  بالاترین اهمیت و پارامتر  $H_0$  کمترین اهمیت را در مسئله ماکزیمم سازی و مینیمم سازی تعداد ذرات معلق در اتاق دارد. پارامترهای  $D_0$ ،  $D_i$  و  $H_i$  نیز در رتبه‌های بعدی از نظر درجه اهمیت و بین این دو پارامتر قرار دارند.

آنالیز واریانس میزان مشارکت هر یک از پارامترهای مؤثر در مسئله را بر تابع هدف مشخص می‌نماید. در تحلیل واریانس درجه آزادی هر پارامتر به صورت یک واحد کمتر از تعداد سطوح هر پارامتر در آرایه متعامد تعریف می‌شود. همچنین واریانس یک پارامتر از تقسیم مجموع مربعات بر درجه آزادی تعیین می‌شود که مشخص می‌کند چگونه مقدار پاسخ به آن متغیر بستگی دارد؛ به نحوی که پارامتری با واریانس بیشتر، تأثیرگذاری بیشتری خواهد داشت. علاوه بر این، سهم مشارکت هر متغیر به صورت نسبت مجموع مربعات آن متغیر بر مجموع مربعات همه متغیرها تعریف می‌شود. جدول ۴ نتایج آنالیز واریانس را نمایش داده است.

جدول ۴: نتایج تحلیل واریانس برای تعداد ذرات معلق در اتاق

Table 4: Results of analysis of variance for the number of suspended particles in the room

پارامتر	درجه آزادی	مجموع متوالی مربعها	میانگین مربعات	آزمون $F$	درصد توزیع مشارکت
$L_i$	۷	۶/۱۵۹	۰/۸۸۰	۵۰/۸۶۷	٪ ۸۴/۴۲
$D_i$	۱	۰/۳۸۷	۰/۳۸۷	۲۲/۳۷۰	٪ ۵/۱۷
$H_i$	۱	۰/۰۳۱	۰/۰۳۱	۱/۷۹۲	٪ ۰/۱۹
$D_0$	۱	۰/۴۷۷	۰/۴۷۷	۲۷/۵۷۲	٪ ۶/۴۳
$H_0$	۱	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹	۱/۶۷۶	٪ ۰/۱۶
خطای باقیمانده	۴	۰/۰۶۹	۰/۰۱۷۳		
مجموع	۱۵	۷/۱۵۲			

مطابق با جدول ۴، نتایج تحلیل واریانس و ترتیب اثرگذاری پارامترها بر اساس میزان مشارکت، یافته‌های روش تاگوچی را تایید می‌کنند. مشخص است که پارامتر  $L_i$  با سهم ۸۴/۴۲ درصد در مقایسه با سایر پارامترها، بیشترین تأثیر بر تعداد ذرات معلق در اتاق را دارد. پارامترهای بعدی یعنی  $D_0$ ،  $D_i$ ،  $H_i$  و  $H_0$  به ترتیب با سهم ۶/۴۳ درصد، ۵/۱۷ درصد، ۰/۱۹ درصد و ۰/۱۶ درصد در ردیف‌های بعدی این درجه اهمیت قرار دارند. نحوه محاسبات مربوط به مقادیر جدول ۴ در ضمیمه ۱ ذکر شده است.

#### ۵- نتیجه‌گیری:

در پژوهش حاضر با استفاده از روش بهینه‌سازی تاگوچی و آنالیز واریانس، میزان حساسیت انتشار ذرات داخل اتاق به موقعیت مکانی دریچه ورودی و خروجی هوا مورد بررسی قرار گرفت. به منظور حساسیت سنجی موقعیت دریچه‌ها، ۳۲ موقعیت مختلف از لحاظ طول و عرض و ارتفاع برای دریچه ورودی جریان و ۴ موقعیت مختلف برای دریچه خروجی جریان در نظر گرفته شده است. تعداد کل آزمایش‌های مورد نیاز برای بررسی این مساله برابر  $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 128$  است که با استفاده از روش تاگوچی و آرایه‌های متعامد  $L_{16}$  تعداد آزمایش‌ها به ۱۶ کاهش یافت. نتایج بدست آمده نشان داد که تغییر مکان دریچه‌ها، میزان ذرات معلق را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده موقعیت طولی دریچه ورودی هوا ( $L_i$ ) با سهم ۸۴/۴۲ درصد بیشترین تأثیر را بر میزان ذرات معلق در اتاق داشت، موقعیت عرضی دریچه خروجی ( $D_0$ ) با سهم ۶/۴۳ درصد، موقعیت عرضی دریچه ورودی ( $D_i$ ) با سهم ۵/۱۷ درصد، موقعیت ارتفاعی دریچه ورودی ( $H_i$ ) با سهم ۰/۱۹ درصد و موقعیت ارتفاعی دریچه خروجی ( $H_0$ ) با سهم ۰/۱۶ درصد به ترتیب در رده دوم، سوم، چهارم، پنجم و آخر، از لحاظ تأثیر بر میزان ذرات معلق در اتاق قرار دارند.

۶- ضمیمه ۱:

پارامتر  $L_i$  دارای ۸ سطح است لذا درجه آزادی آن برابر ۷ و باقی پارامترها دارای ۲ سطح هستند که درجه آزادی آن‌ها برابر ۱ می‌باشد. درجه آزادی کل، یک واحد کمتر از تعداد آزمایش‌های کل است. لذا مقدار عدد ۱۵ به عنوان درجه آزادی کل در نظر گرفته شده است. درجه آزادی خطا نیز برابر تفاضل درجه آزادی کل و مجموع درجات آزادی فاکتورها است. لذا درجه آزادی خطا برابر مقدار ۴ در ردیف مربوط به خطای باقیمانده<sup>۱</sup> آورده شده است. در این جدول همچنین مجموع متوالی مربع‌ها<sup>۲</sup>، میانگین مربعات<sup>۳</sup>، آزمون فیشر<sup>۴</sup> و همچنین درصد توزیع<sup>۵</sup> آورده شده است که هر یک از آن‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$S_m = \text{Correction Factor} = \frac{\left(\sum SN_i\right)^2}{N} \quad (\text{ض-۱})$$

$$S_T = \text{Total Sum of squares} = \sum (SN_i)^2 - S_m \quad (\text{ض-۲})$$

$$SS_A = \frac{A_1^2}{N_{A1}} + \frac{A_2^2}{N_{A2}} + \dots + \frac{A_n^2}{N_{An}} - S_m \quad (\text{ض-۳})$$

$$MS_i = \frac{SS_i}{\text{DoF of } i} \quad (\text{ض-۴})$$

$$F_i = \frac{MS_i}{MS \text{ of error}} \quad (\text{ض-۵})$$

$$\rho(\%) = \frac{SS_i - (\text{DoF of } i)(MS \text{ of error})}{S_T} \times 100 \quad (\text{ض-۶})$$

در معادلات بالا  $N$  تعداد نسبت سیگنال به نویزها،  $A_i$  مجموع مقادیر سیگنال به نویزها برای فاکتور  $A$  و در سطح  $i$  و پارامتر  $N_{Ai}$  تعداد مقادیر سیگنال به نویز فاکتور  $A$  و در سطح  $i$  است. مطابق نتایج نشان داده شده در شکل ۸ و ۹ مقادیر جدول ۴ برای پارامتر  $L_i$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_m = \frac{(92.053 + 91.893 + 92.011 + ? + 91.535 + 92.003)^2}{16} = 136452.859 \quad (\text{ض-۷})$$

$$S_T = (92.053^2 + 91.893^2 + 92.011^2 + \dots + 91.535^2 + 92.003^2) - 136452.859 = 7.152 \quad (\text{ض-۸})$$

$$SS_{L_i} = \frac{(92.053 + 91.893)^2}{2} + \frac{(92.011 + 92.110)^2}{2} + \dots + \frac{(91.535 + 92.003)^2}{2} - 136452.859 = 6.159 \quad (\text{ض-۹})$$

<sup>1</sup> Residual Error

<sup>2</sup> Seq SS

<sup>3</sup> Adj MS

<sup>4</sup> F-Value

<sup>5</sup> Percent Contribution

$$MS_{L_i} = \frac{6.159}{(8-1)} = 0.880 \quad (\text{ض-۱۰})$$

$$F_{L_i} = \frac{0.880}{0.0173} = 50.867 \quad (\text{ض-۱۱})$$

$$\rho(\%) = \frac{6.159 - (8-1)(0.0173)}{7.152} \times 100 = 84.42\% \quad (\text{ض-۱۲})$$

همچنین می‌توان مقادیر جدول ۴ برای پارامتر  $D_i$  را به صورت زیر محاسبه کرد که خواهیم داشت:

$$SS_{D_i} = \frac{(92.053 + 92.011 + 92.797 + 92.880 + \dots + 91.535)^2}{8} + \frac{(91.893 + 92.110 + 93.650 + \dots + 92.003)^2}{8} - 136452.859 = 0.387 \quad (\text{ض-۱۳})$$

$$MS_{D_i} = \frac{0.387}{(2-1)} = 0.387 \quad (\text{ض-۱۴})$$

$$F_{D_i} = \frac{0.387}{0.0173} = 22.370 \quad (\text{ض-۱۵})$$

$$\rho(\%) = \frac{0.387 - (2-1)(0.0173)}{7.152} \times 100 = 5.17\% \quad (\text{ض-۱۶})$$

مقادیر جدول ۴ برای پارامتر  $H_i$  به صورت زیر محاسبه می‌شود و داریم:

$$SS_{H_i} = \frac{(92.053 + 92.011 + 92.797 + \dots + 92.003)^2}{8} + \frac{(91.893 + 92.110 + 93.650 + \dots + 91.535)^2}{8} - 136452.859 = 0.031 \quad (\text{ض-۱۷})$$

$$MS_{H_i} = \frac{0.031}{(2-1)} = 0.031 \quad (\text{ض-۱۸})$$

$$F_{H_i} = \frac{0.031}{0.0173} = 1.792 \quad (\text{ض-۱۹})$$

$$\rho(\%) = \frac{0.031 - (2-1)(0.0173)}{7.152} \times 100 = 0.19\% \quad (\text{ض-۲۰})$$

مقادیر جدول ۴ برای پارامتر  $D_o$  به صورت زیر محاسبه می‌شود و داریم:

$$SS_{D_o} = \frac{(92.053 + 92.011 + 93.650 + \dots + 92.003)^2}{8} + \frac{(91.893 + 92.110 + 92.797 + \dots + 91.535)^2}{8} - 136452.859 = 0.477 \quad (\text{ض-۲۱})$$

$$MS_{D_o} = \frac{0.477}{(2-1)} = 0.477 \quad (\text{ض-۲۲})$$

$$F_{D_o} = \frac{0.477}{0.0173} = 27.527 \quad (\text{ض-۲۳})$$

$$\rho(\%) = \frac{0.477 - (2-1)(0.0173)}{7.152} \times 100 = 6.43\% \quad (\text{ض-}24)$$

مقادیر جدول ۴ برای پارامتر  $H_0$  به صورت زیر محاسبه می‌شود و داریم:

$$SS_{H_0} = \frac{(92.053 + 92.011 + 93.650 + \dots + 91.535)^2}{8} + \frac{(91.893 + 92.110 + 92.797 + \dots + 92.003)^2}{8} - 136452.859 = 0.029 \quad (\text{ض-}25)$$

$$MS_{H_0} = \frac{0.029}{(2-1)} = 0.029 \quad (\text{ض-}26)$$

$$F_{H_0} = \frac{0.029}{0.0173} = 1.676 \quad (\text{ض-}27)$$

$$\rho(\%) = \frac{0.029 - (2-1)(0.0173)}{7.152} \times 100 = 0.16\% \quad (\text{ض-}28)$$

## ۷. تشکر و قدردانی:

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم تحقیقات و فناوری انجام شده است.

## فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$C_c$	ضریب تصحیح کانینگهام
$\Delta$	مقیاس فیلتر (m)
$k_b$	ثابت بولتزمن
$C_i$	سرعت ذرات در شبکه بولتزمن (LL/Lt)
$\Delta t$	گام زمانی (s)
$\tau_p$	زمان آرامش ذره (s)
$Re$	عدد رینولدز
$d$	قطر ذره (m)
$S$	نسبت چگالی ذره به سیال
$SN_{LB}$	نسبت سیگنال به نویز برای حالت "بزرگتر بهتر است"
$SN_{SB}$	نسبت سیگنال به نویز برای حالت "کوچکتر بهتر است"
$SN_{NB}$	نسبت سیگنال به نویز برای حالت "هر چه به مقدار اسمی نزدیکتر بهتر است"
$n$	تعداد تکرار آزمایش‌ها
$y_i$	خروجی اندازه‌گیری شده از داده‌های آزمایشگاهی
$y_0$	مقدار مطلوب اندازه‌گیری
$f$	تابع توزیع سرعت
$t$	زمان، (s)
$T$	دمای، (k)

$g$  شتاب جاذبه زمین ( $m/s^2$ )

علائم یونانی

$\lambda$  متوسط پویش مولکولی  $7 \times 10^{-8}$

$\rho$  چگالی، ( $kg/m^3$ )

$\tau_p$  زمان آرامش ذره ( $m/s$ )

$\nu_i$  ویسکوزیته سینماتیکی معشوش، ( $m^2/s$ )

$\zeta_i$  عدد تخمینی گوسین

- [1] N.H. Leung, D.K. Chu, E.Y. Shiu, K.-H. Chan, J.J. McDevitt, B.J. Hau, H.-L. Yen, Y. Li, D.K. Ip, J. Peiris, Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks, *Nature medicine*, 26(5) (2020) 676-680.
- [2] Y. Bu, R. Ooka, H. Kikumoto, W. Oh, Recent research on expiratory particles in respiratory viral infection and control strategies: A review, *Sustainable Cities and Society*, 73 (2021) 103106.
- [3] F. Mohamadi, A. Fazeli, A review on applications of CFD modeling in COVID-19 pandemic, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29(6) (2022) 3567-3586.
- [4] S. Peng, Q. Chen, E. Liu, The role of computational fluid dynamics tools on investigation of pathogen transmission: Prevention and control, *Science of The Total Environment*, 746 (2020) 142090.
- [5] R.K. Bhagat, M.D. Wykes, S.B. Dalziel, P. Linden, Effects of ventilation on the indoor spread of COVID-19, *Journal of Fluid Mechanics*, 903 (2020) F1.
- [6] A. Goldblatt, M.J. Loccisano, M.I. Mahe, J.J. Dennehy, F. Spagnolo, Risk of Infection Due to Airborne Virus in Classroom Environments Lacking Mechanical Ventilation, *bioRxiv*, (2022) 2022.2012.2015.520644.
- [7] M. Ahmadzadeh, M. Shams, A numerical approach for preventing the dispersion of infectious disease in a meeting room, *Scientific Reports*, 12(1) (2022) 16959.
- [8] H. Sajjadi, A. Amiri Delouei, G. Ahmadi, Investigation of the Effect of Ventilation System Inlet Location on Particle Motion in a Room Using Multi Relaxation Time-Lattice Boltzmann Method, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(3) (2021) 1457-1468.
- [9] Z. Younsi, L. Koufi, H. Naji, Numerical study of the effects of ventilated cavities outlet location on thermal comfort and air quality, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 29(11) (2019) 4462-4483.
- [10] Y. Jiang, J. Ma, Y. Cheng, Effect of Air Inlet Spacing on Air Distribution and Ventilation Performance of Stratum Ventilation Using Multiple Parallel Jets, *Applied Sciences*, 13(7) (2023) 4143.
- [11] J. Antony, *Design of experiments for engineers and scientists*, Elsevier, 2023.
- [12] R.K. Roy, *A primer on the Taguchi method*, Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [13] A. Akbarzadeh, M. Fallah, N. Mahpeykar, N. Nabavi, Application of Taguchi optimization method in active vibration control of a smart beam, *Advanced Materials Research*, 488 (2012) 1777-1782.
- [14] M. Khalili, M. Taheri, H. Hoshangi, F. Shakeri, A. Tahmasbi, Investigation of the effect of parameters related to the absorbent fabric on the performance of the stepped solar still using the Taguchi method, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 55(1) (2023) 2-2.
- [15] O. Ramezani Azghandi, M.J. Maghrebi, A. Teymourtash, Experimental Investigation of Flow Rate and Concentration Effects of Graphene-Water Nanofluid and Finding the Optimal Conditions Using Taguchi Method, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 54(3) (2022) 629-648.
- [16] A. Falahat, Sensitivity analysis of boehmite alumina nanofluid in a novel cylindrical heat sink with hybrid helical-straight minichannels using the taguchi method and statistical analysis, *International Journal of Thermal Sciences*, 185 (2023) 108035.
- [17] A.M. Darbari, M.A. Alavi, S.R. Saleh, V. Nejati, Sensitivity analysis of nanofluid flow over different flat tubes confined between two parallel plates using Taguchi method and statistical analysis of variance, *International Journal of Thermal Sciences*, 173 (2022) 107428.
- [18] H. Bahrami, A. Nadery, A. Moghaddas Ahangari, H. Ghasemi, Using the Propeller Pre-swirl stator to reduce underwater vehicle roll motion and increase Propeller efficiency, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 55(1) (2023) 7-7.

- [19] D. Karadimou, N. Markatos, Modelling of two-phase, transient airflow and particles distribution in the indoor environment by Large Eddy Simulation, *Journal of Turbulence*, 17(2) (2016) 216-236.
- [20] H. Sajjadi, M. Salmanzadeh, G. Ahmadi, S. Jafari, Turbulent indoor airflow simulation using hybrid LES/RANS model utilizing Lattice Boltzmann method, *Computers & Fluids*, 150 (2017) 66-73.
- [21] C. Li, Y. Zhao, Y. He, K.H. Luo, Y. Li, Simulation of indoor harmful gas dispersion and airflow using three-dimensional lattice Boltzmann method based large-eddy simulation, *AIP Advances*, 11(3) (2021).
- [22] F. Bazdidi-Tehrani, M.S. Sargazizadeh, Large eddy simulation of flow field and particle dispersion in a ventilated model room using a parallel lattice Boltzmann method, *Aerosol Science and Technology*, 57(6) (2023) 577-595.
- [23] J. Posner, C. Buchanan, D. Dunn-Rankin, Measurement and prediction of indoor air flow in a model room, *Energy and buildings*, 35(5) (2003) 515-526.
- [24] Z.F. Tian, J.Y. Tu, G. Yeoh, R. Yuen, On the numerical study of contaminant particle concentration in indoor airflow, *Building and Environment*, 41(11) (2006) 1504-1514.

# Sensitivity Analysis of the Location of Inlet and Outlet Air on the Particle Transmission in a Modeled Room Utilizing Taguchi Method and ANOVA

H. Sajjadi<sup>a,c1</sup>, S. N. Nabavi<sup>a,c</sup>, G. Ahmadi<sup>b</sup>, A. Amiri. Delouei<sup>a,c</sup>, H. Naeimi<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Engineering, University of Bojnord, Iran

<sup>b</sup> Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Clarkson University, Potsdam, USA

<sup>c</sup> Center for International Scientific Studies and Collaboration, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran

## ABSTRACT

In the present study, the sensitivity of particle dispersion within a room to the spatial position of the inlet and outlet air register was investigated using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA). For this purpose, a total of 86400 particles with a size of 1 $\mu$ m were uniformly injected from the inlet register into the room at equal time intervals. Different positions for the inlet register (32 positions) and outlet register (4 positions) on the ceiling and floor of the room were considered. Subsequently, the behavior of the particles, as well as the particle deposition and dispersion within the room over a 60-second time period, were examined using the multi relaxation time lattice Boltzmann method. By employing the Taguchi method and L<sub>16</sub> orthogonal arrays, the required number of experiments was reduced by  $\frac{1}{8}$ . All specified experiments which suggested by orthogonal array are simulated, and the number of suspended particles in the room were measured. Following the experiments, the effects of each parameter on the output of the problem were determined based on a factor called the signal-to-noise (S/N) ratio and analysis of variance. According to the obtained results, the longitudinal position of the inlet register had the highest impact on the number of suspended particles in the room, accounting for 84.42% contribution. Additionally, the vertical position of the outlet register had the least impact, contributing only 0.16%.

## KEYWORDS

ANOVA, Taguchi method, Sensitivity analysis, Particle dispersion

---

<sup>1</sup> Corresponding Author: [h.sajjadi@ub.ac.ir](mailto:h.sajjadi@ub.ac.ir), [hasansajadi@gmail.com](mailto:hasansajadi@gmail.com)