



## مدل سازی لایه مرزی اتمسفری آشفته و پراکندگی ذرات آلاینده ریزمقیاس جامد در یک محدوده شهری به کمک الگوی شبیه سازی گردابه های بزرگ

محمد کاظم مویدی\*، وحید آزادی طلب

آزمایشگاه پژوهشی توربولانس، دینامیک سیالات محاسباتی و احتراق، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، قم، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۳  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۲۲  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۳۱  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۷/۲۴

### کلمات کلیدی:

شبیه سازی گردابه های بزرگ  
آلودگی هوا  
دینامیک سیالات محاسباتی  
آلاینده های ذرات جامد  
دینامیک سیالات زیست محیطی

**خلاصه:** یکی از عوامل مهم در میزان کیفیت هوای کلان شهرها وزش باد در آن محیط است. به طوری که اگر برای مدت طولانی پدیده سکون هوا رخ دهد در نتیجه آن، افزایش غلظت آلاینده ها ایجاد و منجر به شرایط بحرانی می شود. نحوه پراکندگی این ذرات به عواملی مانند سرعت باد، هندسه محیط و مشخصات فیزیکی آلاینده ها بستگی دارد. پیش بینی نحوه پراکندگی آنها در یک محیط شهری نیازمند مدل سازی دقیق و با قابلیت تفکیک پذیری بالا می باشد. در این پژوهش از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای مدل سازی میدان جریان هوا و پراکندگی ذرات آلاینده استفاده شده است. در بخش اول، یک مدل ساده شامل یک ساختمان شبیه سازی شده و نتایج حاصل با داده های تجربی مقایسه و اعتبارسنجی شده است. با شناخت پارامترهای بهینه برای تنظیم مدل، در بخش دوم یک منطقه از شهر تهران با ساختمان های بلند مرتبه و چیدمان نامنظم در نظر گرفته شده و میدان سرعت و پراکندگی و نشست ذرات آلاینده در این محیط واقعی نیز شبیه سازی شده است. با توجه به هندسه سه بعدی و پیچیدگی فیزیک جریان آشفته، از الگوی شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده شده است. نتایج پژوهش شامل تغییرات غلظت آلاینده ها در سطوح مختلف در طول زمان ارائه و پیرامون عوامل موثر در میزان غلظت آلاینده ها بحث شده است.

### ۱- مقدمه

و همچنین زمینه های مهندسی مانند محیط زیست و شیمی و مکانیک شکل گرفته است. در قرن نوزدهم میلادی با توجه به عدم پیشرفت رایانه ها و نرم افزارهای رایانه ای بیشتر پژوهش ها بر پایه روابط ریاضی و آماری و در مقیاس بزرگ و با هدف بررسی صرفاً پارامترهای اساسی در نحوه توزیع آلاینده ها صورت می گرفت و با ترکیب این روابط با آزمایش های میدانی<sup>۱</sup> نظریه هایی ارائه می شد. جیکمن و همکاران در سال ۱۹۸۸ این گونه پژوهش ها طبقه بندی کرده و برای تخمین توزیع آلاینده های گازی یک الگوریتم را ارائه نمودند [۲]. در اواخر قرن بیستم میلادی با پیشرفت پردازنده های رایانه ای، تحول اساسی در مدل سازی های دینامیک سیالات محاسباتی ایجاد شد. قدرت پردازش رایانه این امکان را برای پژوهشگران فراهم ساخت تا عوامل و پارامترهای گسترده تری را در شبیه سازی های خود دخیل کنند و در نتیجه به نتایج مطلوب تری برسند. زمینه مدل سازی نحوه پراکندگی آلاینده های هوا نیز از این مقوله مستثنی نبوده است

تا کنون تلاش های بسیاری برای کم کردن میزان تولید انواع آلاینده های مختلف چه در صنعت و حتی کنترل تولید آلاینده ها در طبیعت (مانند ریزگردها) صورت گرفته است اما امروزه با توجه به نیاز بشر برای استحصال انرژی و استفاده از منابع برای تولید توان امکان متوقف ساختن تکثیر انواع آلاینده ها در محیط های مختلف وجود ندارد لذا بیش از چهار دهه است که بحث مدیریت و کنترل آلاینده ها در جامعه مهندسی مطرح شده است [۱]. بدین منظور در علوم مرتبط با بحث مدیریت و کنترل آلودگی هوا طبقه بندی هایی مانند انواع آلاینده ها، منابع تولید، تعاریف و مفاهیم و غیره شکل گرفت تا پژوهش های مختلف دارای یک ساختار بندی متداول باشند. یکی بحث های مهم در این موضوع، مدل سازی انتقال و پخش و پراکندگی انواع آلاینده از منابع مختلف در محیط پیرامون می باشد و می توان گفت که مهمترین چالش در این مقوله نیز همین بحث است که تا کنون رویکردهای متفاوتی با بهره گیری از علوم پایه ریاضی و فیزیک

1 on site experiment

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: moayyedi@qom.ac.ir



اطراف ساختمان‌ها پرداخته و همچنین تمامی اصول و مزایای تحلیل این مسایل به کمک این روش را ذکر کرده است، توسط پی جی جونز در سال ۱۹۹۲ صورت گرفته است. در این پژوهش با در نظر گرفتن جریان هوا در داخل و خارج یک اتاق به عنوان مورد مطالعاتی روند تحلیل به کمک دینامیک سیالات محاسباتی شامل شبکه‌بندی، گسسته‌سازی معادلات حاکم، شرایط مرزی، مدل‌سازی آشفتگی و تمامی پیش‌نیازهای شبیه‌سازی به کمک این روش را ذکر کرده است [۵]. دنیس موون در سال ۱۹۹۷ با هدف بررسی کمی مقدار آلاینده‌های پراکنده شده از دودکش سیستم تهویه مطبوع یک ساختمان عمومی در شهر پاریس در شعاع ۵۰ متری ساختمان از دینامیک سیالات محاسباتی و کُد تجاری مرکوری<sup>۲</sup> استفاده نمود [۶]. نکته حائز اهمیت در این پژوهش ایجاد هندسه سه‌بعدی از ساختمان متناسب با مدل واقعی و شرایط فیزیکی مسئله شامل سرعت و جهت باد و شرایط دمایی است. شبیه‌سازی در این پژوهش برای ۸ حالت جهت وزش باد و یا به تعبیری قرارگیری موقعیت ساختمان نسبت به جهت باد انجام شده و میزان تمرکز آلاینده‌ها در هر مورد را ثبت شده است. با پیشرفت رایانه‌ها و کدهای تجاری در قرن بیستم میلادی شبیه‌سازی جریان هوا در اطراف ساختمان‌های شهری شتاب بیشتری گرفت و پژوهشگران در هر پژوهش میزان تاثیر هر عامل بر میزان دقت شبیه‌سازی را به منظور توسعه این روش بررسی نمودند. در سال ۲۰۰۱ کارایگ و همکاران به کمک کد تجاری استار سی-دی<sup>۳</sup> یک مدل شهری شامل یک آرایه متقارن شامل ۹ ساختمان با چیدمان ۳×۳ را به صورت سه‌بعدی با هدف یافتن محل تمرکز آلاینده موناوکسید کربن در تنگه‌های خیابانی<sup>۴</sup> شبیه‌سازی نمودند [۷]. ایشان همچنین از الگوریتم دینامیک-کیو<sup>۵</sup> به منظور بهینه‌سازی تعداد تکرار محاسبات بهره بردند. نتایج پژوهش ایشان به منظور طراحی بهینه آرایه‌های ساختمانی در محیط‌های شهری به منظور عدم تمرکز آلاینده‌ها در برخی نقاط منتشر شد. از دیگر موضوعاتی که در دهه اول قرن بیستم بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت بحث افزایش دقت محاسبات در روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی همزمان صرف میزان بهینه منابع محاسباتی بود.

و از اواخر قرن نوزدهم میلادی تا کنون رویکرد بکارگیری رایانه و نرم‌افزارهای شبیه ساز برای پیشبینی نحوه پراکندگی آلاینده‌ها و بررسی توزیع غلظت آلاینده‌ها در محیط پیرامونی منابع آلاینده‌ها به طور جدی توسط محققان و پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است. با این تحول تحقیقات صورت گرفته در این زمینه به طور عمومی در دو شاخه تحلیل به کمک مدل توده‌ای<sup>۱</sup> گاوسی و بکارگیری دینامیک سیالات محاسباتی صورت گرفته است. در مدل گاوسی بکارگیری فرضیاتی مانند جریان باد با سرعت کم و ثابت (جریان پایا)، هندسه دوبعدی، تک فاز بودن مخلوط آلاینده و هوا، عدم وجود گرادیان سرعت در جهت عمود بر زمین و غیره منجر به ساده‌سازی معادلات ریاضی توزیع غلظت ذرات در یک محیط پیوسته می‌شود [۳] و در نهایت با حل این معادله صرفاً می‌توان غلظت آلاینده گازی را در محدوده توده ذرات آلاینده به صورت پروفیل‌های مکانی بدست آورد. این نوع مدل‌سازی علی‌رغم وجود محدودیت‌های فراوان به دلیل عدم وابستگی و نیاز به رایانه‌های با قدرت پردازش بالا و همچنین زمان کوتاه محاسبات در مسایلی که نیاز به حل با تفکیک‌پذیری بالا وجود ندارد، کاربرد دارد. لی لاوسی و همکاران ضمن بررسی اصول روش گاوسی و فرمول‌بندی آن به کمک این روش خروج دود از یک دودکش و پراکندگی توده آلاینده در محیط اطراف آن را مدل‌سازی کرده و همچنین نتایج آن را با مدل تجربی و همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مقایسه نمودند [۴]. همانطور که ذکر شد حل مسئله انتقال ذرات آلاینده به کمک روش‌های گاوسی با محدودیت‌هایی مواجه است لذا نیاز است تا محققین رویکردهای دیگری را نیز در تحلیل‌های خود بکار ببرند، در میان روش‌های متعدد، در طول سه دهه اخیر روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی به طور گسترده در تحلیل این گونه مسایل بکار رفته است. دینامیک سیالات محاسباتی این امکان را برای محققین فراهم می‌آورد تا اثر تمامی عوامل، تاثیرگذار بر شبیه‌سازی جریان سیال و پراکندگی ذرات آلاینده (گازی، جامد) را بررسی نمایند، لذا تحقیقات صورت گرفته در این شاخه اغلب بر اساس عامل و یا عوامل تاثیرگذار مورد بررسی در هر تحقیق طبقه‌بندی شده‌اند. یکی از نخستین پژوهش‌ها که به طور جامع به بررسی سابقه کاربرد دینامیک سیالات محاسباتی در تحلیل مسایل مرتبط با جریان هوا در

2 MERCURE  
3 STAR-CD  
4 Street canyon  
5 DYNAMIC-Q

1 Plume

ساختمان را به صورت دوبعدی شبیه‌سازی نمودند به صورتی که در هر شبیه‌سازی صرفاً شکل هندسه پشت بام متفاوت است. ایشان همچنین سه مدل از این حالات را نیز در تونل باد مدل‌سازی و آزمایش نمودند. در این پژوهش وجود یک منبع آلاینده نقطه‌ای در وسط یکی از خیابان‌ها در هر حالت نیز بررسی شده است. ایشان با توجه به شکل دنباله جریان در هر حالت در رابطه با میزان تمرکز آلاینده‌ها در هر حالت بحث و نتیجه‌گیری نمودند. از دیگر مسایل چالش برانگیز در این مسایل وجود یک یا چند ساختمان بلند مرتبه در یک ناحیه شهری در میان تعداد زیادی ساختمان با ارتفاع کوتاه و اغلب یکسان است، زیرا این ساختمان بلند مرتبه تاثیر زیادی بر دنباله<sup>۲</sup> جریان در پایین دست داشته و موجب حبس شدن آلاینده‌ها در پایین دست جریان می‌شود [۱۱]. السا و همکاران در تحقیقی جریان سیال هوا را بر روی یک چیدمان از هفت ساختمان را در سه حالت مختلف که در هر حالت صرفاً ارتفاع ساختمان تغییر داشته را به صورت آزمایش تونل باد و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مورد تحقیق قرار دادند. در این مدل که نمونه‌ای از یک مدل واقعی در شهر لندن است، یک منبع آلاینده نقطه‌ای در میانه ساختمان وجود دارد، این منبع دودکش یک سیستم تولید همزمان برق و انرژی است. در این پژوهش نحوه پخش آلاینده‌ها در همسایگی این مجموع از ساختمان‌ها در هر بررسی شده و با توجه به نتایج پیشنهادهایی برای طراحی مبلمان شهری و جانمایی تجهیزات تولیدکننده آلاینده ارائه شده است [۱۲]. پژوهش حاضر با هدف شبیه‌سازی میدان جریان هوا در اطراف ساختمان‌های شهری و بررسی نحوه پراکندگی ذرات آلاینده در یک نمونه مدل شهری است. در این شبیه‌سازی برای مدل‌سازی میدان مغشوش جریان هوا در اطراف ساختمان‌ها از روش گردابه‌های بزرگ استفاده شده است.

## ۲- معادلات حاکم

پدیده‌های مرتبط با حرکت جریان سیال اغلب دارای رفتار مغشوش و ساختاری آشوبناک است و فرض جریان پایا صرفاً یک فرض ایده‌آل برای حل معادلات اساسی به صورت تحلیلی است. تاکنون تعریف دقیقی از جریان مغشوش ارائه نشده است و اغلب تعاریف موجود در واقع یک توصیف از ویژگی‌های این نوع ساختار

اینگونه پژوهش‌ها بیشتر با مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با کدهای تجاری مختلف با نتایج آزمایش تونل باد صورت گرفته است. سولازو و همکاران در سال ۲۰۰۹ با هدف بهینه‌سازی و افزایش کارایی کد تجاری فلوئنت و اصلاح برخی از مقادیر در روش  $k-\epsilon$ ، یک تنگه خیابانی را به صورت دوبعدی شبیه‌سازی کرده و نتایج حاصل را با نتایج آزمایش تونل باد مقایسه نمودند. ایشان به منظور بهتر شدن دقت محاسبات در این روش، شرایط بهینه برای پروفیل سرعت رادر ورودی دامنه محاسباتی ارائه نمودند. با پیشرفت و توسعه کدهای تجاری، یکی از موضوعاتی که بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت موضوع بررسی میزان تاثیر عوامل اصلی مانند هندسه ساختمان‌ها، مدل آشفتگی، شبکه محاسباتی، سرعت جریان هوا و غیره بر نحوه شکل‌گیری جریان سیال و پراکندگی و پخش ذرات آلاینده است [۸]. گوساوو برای یک مدل ساختمان بلند مرتبه در یک دامنه محاسباتی با در نظر گرفتن شرایط متفاوت برای اندازه شبکه، شرایط جریان در ورودی و مدل آشفتگی، مدل مذکور را برای هشت نوبت مدل‌سازی نموده و میزان تاثیر هر عامل را با مقایسه مقدار خطای هریک با نتایج تونل باد را بررسی نموده است. ایشان برخی از مقادیر و شرایط بهینه برای شبیه‌سازی میدان جریان سیال را ارائه نمودند [۹]. جین پارک تاثیر وجود پوشش گیاهی در پشت بام ساختمان‌های شهری (بام سبز<sup>۱</sup>) را بر میزان تهویه جریان هوا در تنگه‌های خیابانی به کمک خنک‌سازی جریان هوا را بررسی نمود. این پژوهش که ترکیبی از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی و مدل‌سازی واکنش‌های شیمیایی است در ایجاد شرایط مرزی در سقف ساختمان‌های داری پوشش گیاهی با تحقیقات مشابه فاقد پوشش گیاهی متفاوت است. به منظور نزدیک نمودن شرایط شبیه‌سازی به شرایط واقعی در شرط مرزی وجود پوشش گیاهی ایشان مدل دینامیک سیالات محاسباتی بکار رفته را با برخی روابط شیمیایی کوپل نمودند. ایشان نتایج شبیه‌سازی خود را با تحقیقات با هندسه مشابه اما فاقد پوشش گیاهی مقایسه نمودند. هندسه پشت بام ساختمان‌ها نیز خود تاثیر زیادی بر شکل جریان هوا در اطراف ساختمان‌ها دارد [۱۰]. مایدر و همکاران تاثیر این مورد را بر شکل‌گیری جریان بررسی نمودند. بدین منظور ایشان برای پنج مدل مرسوم از شکل سقف ساختمان‌ها، جریان هوا بر روی چند ردیف

همان طور که ذکر شده یکی از مهمترین ویژگی‌های جریان آشفته وجود گردابه‌ها در آن است و این گردابه‌ها بر شکل و ساختار جریان تاثیر مستقیم دارند. واضح است که گردابه‌های بزرگتر از لحاظ اندازه، که حامل انرژی بیشتری هستند، در مقایسه با گردابه‌های کوچکتر، تاثیر بیشتری در ساختار جریان دارند. به زبان ساده ایده اصلی روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ<sup>۶</sup> بر این اساس است که می‌توان با اعمال یک فیلتر در معادلات اساسی گردابه‌های بزرگ را از گردابه‌های کوچکتر جداسازی نمود و گردابه‌های بزرگ، که نقش اساسی در ساختار جریان دارند، را به طور مستقیم تحلیل نمود و گردابه‌های کوچکتر را بر اساس مدل‌های زیر شبکه مدل‌سازی نمود. در واقع این روش از مزایای تحلیل عددی مستقیم و مدل‌سازی تانسور تنش به صورت همزمان بهره می‌برد. با این تفاوت که در مدل‌سازی زیر شبکه جمله زمان در معادلات دیفرانسیلی وجود داشته و حل معادلات در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ وابسته به زمان است. امکان آشکار سازی جزئیات ساختار جریان با تفکیک بالا در این روش وجود دارد و در مسایلی که نیاز به ثبت داده‌ها در گذر زمان و همچنین دقت بالا مورد نیاز است این روش بسیار پر کاربرد است. لازم به ذکر است که بکارگیری این روش نسبت به روش‌های متوسط‌گیری شده رینولدز به منابع محاسباتی بیشتر نیاز داشته و زمان شبیه‌سازی نیز طولانی‌تر و در نتیجه هزینه‌های محاسباتی بیشتری را دارد. این روش نخستین بار توسط اسماکورینسکی (۱۹۶۰) برای شبیه‌سازی جریان‌های اتمسفری معرفی شد [۱۳] اما به دلیل عدم پیشرفت پردازشگرهای رایانه در نیمه دوم قرن نوزدهم بکارگیری این روش بسیار محدود بود و با پیشرفت پردازشگرهای رایانه‌ای امروزه این روش یکی از پر کاربردترین روش‌ها در تحلیل مسایل مهندسی است.

## ۱-۲ معادلات حرکت سیال

در پژوهش حاضر به منظور تحلیل میدان سرعت جریان سیال روش گردابه‌های بزرگ بکار برده شده است. در این روش با اعمال یک جداساز<sup>۷</sup> مکانی گردابه‌های بزرگ از گردابه‌های کوچک جداسازی می‌شوند. در نتیجه اعمال این جداسازی، معادلات پیوستگی و اندازه حرکت جداسازی شده ناویر-استوکس غیر قابل تراکم به صورت زیر خواهد بود [۱۴]:

جریان است. مهمترین ویژگی‌های جریان مغشوش وجود گردابه<sup>۱</sup> ها در جریان و تغییر تصادفی مقادیر میدان جریان (فشار و سرعت) است. این ویژگی‌ها سبب شده است که در این نوع جریان امکان حل دقیق و تحلیلی میدان سرعت جریان سیال وجود نداشته باشد. در دینامیک سیالات محاسباتی به منظور حل میدان سرعت جریان مغشوش با دقت مناسب سه رویکرد اساسی وجود دارد: الف) حل عددی معادلات ناویر-استوکس به صورت مستقیم برای تمام دامنه محاسباتی<sup>۲</sup>، ب) میانگین‌گیری زمانی از مقادیر میدان جریان<sup>۳</sup> و ج) حل بخشی از میدان جریان سیال به صورت مستقیم و مدل‌سازی بخش دیگر، تفکیک این دو بخش با استفاده از فیلتر کردن گردابه‌ها بر اساس اندازه صورت می‌گیرد. در روش شبیه‌سازی عددی مستقیم معادلات ناویر-استوکس بدون هیچ گونه مدل‌سازی آشفتگی حل می‌شوند، این روش علی‌رغم داشتن دقت بالا به دلیل نیاز به شبکه محاسباتی ریز و همچنین مدت زمان محاسبات خیلی زیاد، اغلب دارای کاربرد محدود در مدل‌های با هندسه و ابعاد کوچک است و به طور گسترده در کاربردهای مهندسی از این روش استفاده نمی‌شود. در روش‌های مبتنی بر معادلات متوسط‌گیری شده رینولدز، برای محاسبه مقادیر میدانی، تانسور تنش رینولدز که در معادلات جریان آشفته ظاهر می‌شود به صورت یک مجهول در نظر گرفته شده و برای محاسبه این مقدار مدل‌سازی‌هایی صورت می‌گیرد. دسته‌بندی این مدل‌ها بر اساس تعداد معادلات در هر یک از آن‌ها است، معروف ترین مدل‌های دو معادله‌ای عبارتند از کی-اپسیلون<sup>۴</sup> و کی-امگا<sup>۵</sup>. در روش‌های متوسط‌گیری شده رینولدز به دلیل اینکه معادلات دیفرانسیل بکار گرفته شده در مدل‌سازی تنش رینولدز وابسته به زمان نبوده و به عبارتی میانگین‌گیری زمانی بر روی آن‌ها اعمال شده است، امکان بررسی و ثبت داده‌ها در طول زمان وجود ندارد و این مورد یکی از محدودیت‌های اساسی در این روش است. از طرفی در مسایلی که صرفاً میانگین زمانی مقادیر میدان مورد اهمیت است و نیاز به ثبت مقادیر در طول زمان وجود ندارد، روش متوسط‌گیری شده رینولدز به دلیل بهینه بودن زمان محاسبات و حجم محاسبات و همچنین قابل قبول بودن دقت آن بسیار کاربرد دارد.

- 1 Eddy
- 2 Direct Numerical Solution(DNS)
- 3 Reynolds Average Navier-Stokes(RANS)
- 4 k-ε
- 5 k-ω

- 6 Large Eddy Simulation(LES)
- 7 Filter

می‌شود:

$$\Delta = V^{\frac{1}{3}} \quad (۸)$$

لازم به ذکر است که ثابت CS یک مقدار عمومی نداشته و با توجه به مسئله تعیین می‌شود اما در اغلب جریان‌ها مقدار ۰/۱ برای این ثابت مناسب بوده و از دقت مناسبی برخوردار است و در پژوهش حاضر نیز این مقدار برای این ثابت فرض شده است. ضریب فون کارمن نیز در این پژوهش برابر ۰/۴ فرض شده است.

## ۲-۲ معادلات انتقال ذرات آلاینده

برای بررسی ساز و کار پراکندگی و یا پخش شدن آلاینده‌ها در هوا ابتدا می‌بایست طبقه‌بندی انواع آلاینده‌ها را در نظر گرفت. به طور کلی برای طبقه‌بندی انواع آلاینده رویکردهای متفاوتی وجود دارد. برای مثال آلاینده‌های هوا را می‌توان بر اساس منشاء (طبیعی، انسان ساخت)، از نظر منبع تولید (نقطه‌ای، خطی و سطحی)، از نظر شیمیایی (آلی، معدنی)، فیزیولوژیکی (تحریک‌کننده، سموم، آلرژیک، غیره)، فرم آلاینده (اولیه و ثانویه) و غیره تقسیم‌بندی نمود که هر یک از این نوع طبقه‌بندی‌ها بسته به نوع کاربرد و نیاز در مباحث پژوهشی و مدیریتی بکار می‌روند. از طرف دیگر انسان در محیط‌های عمومی (بالاخص محیط‌های شهری) به طور عمده با گروه خاصی از آلاینده‌ها شامل اوزون، مونو اکسید کربن، دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد، سرب و ذرات جامد معلق<sup>۳</sup> مواجه بوده [۱۷] که این شش نوع آلاینده را آلاینده‌های معیار می‌نامند.

توجه به این نکته نیز ضروری است که فاز آلاینده (جامد، مایع و گازی) در فرمول‌بندی انتقال و یا پخش ذرات آلاینده اهمیت دارد، پراکندگی ذرات جامد آلاینده در هوا منجر به ایجاد دو فاز مجزا<sup>۴</sup> می‌شود و پخش شدن آلاینده‌های گازی در هوا به صورت فاز پیوسته<sup>۵</sup> است. از طرفی در تعریف آلاینده‌های معیار، هرگونه ذره جامد معلق در هوا با قطر کمتر از ۱۰ میکرون را PM<sub>۱۰</sub> و ذرات با قطر کمتر از ۲/۵ میکرون را PM<sub>۲/۵</sub> می‌نامند که این نوع آلاینده بسیار خطرناک بوده و در محیط‌های شهری به وفور یافت می‌شوند. لذا آلاینده‌ها مفروض در این پژوهش صرفاً در فاز جامد و از نوع PM و روش

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial t}} = 0 \quad (۱)$$

$$\overline{\frac{\partial u_i}{\partial t}} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} \quad (۲)$$

که در اینجا نماد بالا خط نشان دهنده جداسازی مکانی (نه میانگین‌گیری زمانی مانند روش متوسط‌گیری‌شده رینولدز) است، بنابراین مقادیر  $\overline{u_i}$  و  $\overline{p}$  به ترتیب سرعت و فشار جداسازی شده هستند. تانسور  $\overline{\tau_{ij}} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_j} \overline{u_i}$  به دلیل اعمال تابع جداساز در معادله اندازه حرکت ظاهر شده است (مانند تانسور تنش رینولدز در مدل‌سازی با روش‌های متوسط‌گیری‌شده رینولدز) که این تانسور را تنش زیر شبکه<sup>۱</sup> می‌نامند. در این پژوهش برای محاسبه تنش‌های زیر شبکه از فرضیه بوزینسک استفاده شده است [۱۵]:

$$\overline{\tau_{ij}} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\mu_t \overline{S_{ij}} \quad (۳)$$

که در رابطه فوق  $\mu_t$  لزجت آشفتگی در مقیاس زیر شبکه و  $\overline{S_{ij}}$  تانسور نرخ کرنش در مقیاس حل مستقیم بوده و به صورت زیر تعریف

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (۴)$$

می‌شود:

لزجت گردابه با بکارگیری مدل اسمگورینسکی-لیلی<sup>۲</sup> نیز به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۶]:

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\overline{S}| \quad (۵)$$

که در این رابطه LS طول اختلاط در مقیاس زیر شبکه است و مقدار  $|\overline{S}|$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$|\overline{S}| = \sqrt{2\overline{S_{ij}}\overline{S_{ji}}} \quad (۶)$$

$$L_s = \min(kd, C_s \Delta) \quad (۷)$$

در روابط فوق K ضریب فون کارمن، d فاصله تا نزدیک‌ترین دیواره، CS ثابت اسمگورینسکی و مقدار  $\Delta$  برابر با مقیاس زیر شبکه محلی است که بر اساس حجم سلول محاسباتی به صورت زیر تعریف

3 Particulate Material(PM)

4 Discrete phase

5 Continues phase

1 Subgrid-Scale Stresses (SGS)

2 Smagorinsky-Lily

رینولدز توسط مورسی و الکساندر ارائه گردیده است [۱۹].

### ۳- روش حل عددی

به منظور تحلیل این مسئله نیاز است تا در ابتدا میدان سرعت جریان هوا برای مدت زمان مناسبی شبیه‌سازی شده و جریان سیال در دامنه محاسباتی شکل بگیرد و یا به عبارتی پیش نیاز تحلیل نحوه پراکندگی ذرات آلاینده در دامنه محاسباتی، شبیه‌سازی مناسب میدان سرعت جریان هوا است. بر این اساس در پژوهش حاضر با به کارگیری الگوی ساده برای کوپل کردن سرعت و فشار و همچنین روش گسسته‌سازی مکانی مرکزی محدود<sup>۳</sup> برای مومنتوم، گسسته‌سازی استاندارد برای فشار و روش حداقل مربعات بر پایه سلول برای سایر گرادیان‌ها این شبیه‌سازی صورت گرفته است.

در پژوهش حاضر از کد تجاری انسیس فلونت نسخه ۱۹ برای شبیه‌سازی استفاده شده است. سخت افزار و منابع محاسباتی مورد استفاده شامل یک پردازنده Intel Core i7 4770 K ۴۷۷۰ با هشت هسته منطقی با فرکانس پردازش پایه ۳/۵ گیگاهرتز و همچنین ظرفیت حافظه اصلی<sup>۴</sup> بکار رفته نیز ۱۶ گیگابایت است. با توجه به این منابع محاسباتی شبیه‌سازی میدان جریان سیال برای مدل معیار ۸۰ و برای مدل شهری ۳۷۵ ساعت زمان برده است.

### ۴- مدل معیار و اعتبارسنجی شبیه‌سازی

در این پژوهش به منظور بررسی میزان دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی نحوه انتقال و پراکندگی ذرات آلاینده، این شبیه‌سازی در ابتدا برای یک نمونه مدل ساده صورت گرفته است. این مدل قبلاً توسط منگ و هیبی [۲۰] در تونل باد مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج تجربی شامل مقادیر مولفه‌های سرعت میانگین جریان سیال در نقاط متعدد در اطراف ساختمان منتشر شده است و در اینجا به منظور اعتبارسنجی میدان سرعت جریان سیال، نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی مذکور مقایسه شده و نمودارهای این مقایسه در چند مقطع ارائه شده است. این مدل معیار<sup>۵</sup> شامل یک ساختمان با قاعده مربعی با نسبت ابعاد ۱:۱:۲ است که در یک دامنه محاسباتی مطابق شکل ۱ قرار گرفته است به طوری که مرکز قاعده ساختمان در مبدا

مطالعه پراکندگی آن‌ها در محیط روش فاز گسسته<sup>۱</sup> است.

برای فرمولبندی معادلات انتقال ذرات آلاینده جامد کروی شکل در این پژوهش فرض شده است که این ذرات در هوا به صورت معلق بوده و فاقد نیروی جنبشی<sup>۲</sup> و همچنین فاقد جرم محسوس می‌باشند. همانطور که بخش قبل ذکر شد، در شبیه‌سازی این مدل از اثرات حرارتی صرف نظر شده و در نتیجه حرکت سیال صرفاً ناشی از سرعت سیال و یا به عبارتی گرادیان فشار بوده و گرادیان‌های دمایی (اثر بویانسی) در سرعت ذرات تأثیری ندارند. با بکارگیری دیدگاه لاگرانژی و با فرضیات مفروض تعادل نیرویی برای هر ذره به صورت زیر می‌باشد [۱۸]:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (9)$$

که در این رابطه مقادیر با زیرنویس p مربوط به ذره است و نیروی F برآیند نیروهای خارجی بر ذره است که در اینجا این نیرو صرفاً نیروی برآی ساکن است. این نیرو برای ذرات کوچک در اعداد رینولدز پایین به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{F}_{(L-S)} = \frac{1}{2} \frac{2k\nu^2 \rho d_{ij}}{d_p \rho_p (d_{ik} d_{kl})} (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (10)$$

جمله  $\frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r}$ : نیروی پسا بر واحد جرم ذره بوده که در آن  $\tau_r$  زمان آسودگی بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \times \frac{24}{C_d \text{Re}} \quad (11)$$

زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Re} \equiv \frac{\rho d_p |\vec{u} - \vec{u}_p|}{\mu} \quad (12)$$

$$C_d = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}^2} \quad (13)$$

3 Bounded central differencing

4 Random Access Memory, RAM

5 Benchmark

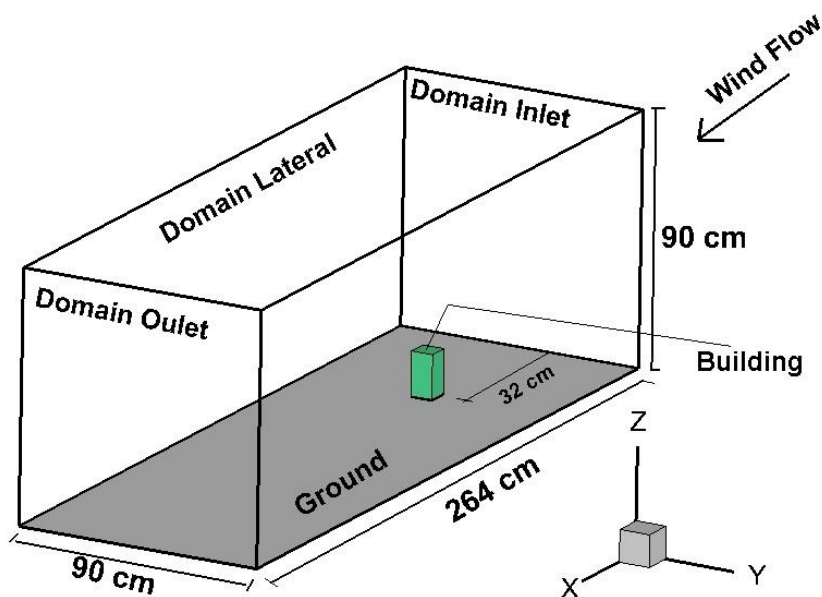
1 Discrete Phase Method, DPM

2 Inert Particle

جدول ۱. مشخصات ابعاد مدل معیار و شرایط مرزی آن

Table 1. Geometric dimensions and boundary conditions of the benchmark model

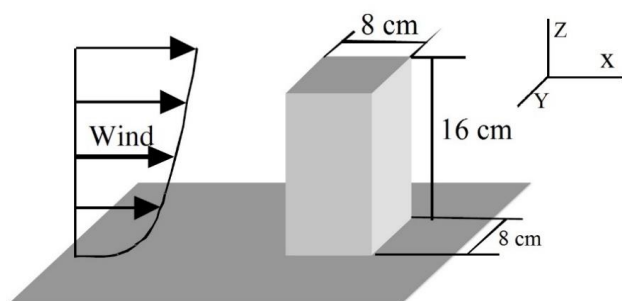
شرایط مرزی (متناسب با نام گذاری در شکل ۱)		مشخصات ابعادی بر حسب cm	
شرط مرزی دیواره	زمین و دیواره‌های ساختمان	۱۶×۸×۸	ابعاد ساختمان
شرط مرزی سرعت ورودی	ورودی دامنه	۲۶۴×۹۰×۹۰	ابعاد دامنه محاسباتی
شرط مرزی فشار در خروجی	خروجی دامنه	۳۲	فاصله وجه (مقابل جریان) ساختمان تا ورودی دامنه
شرط مرزی دیواره غیر لزج	دیواره‌های جانبی و بالا		مرکز قاعده ساختمان در مبدا مختصات است.



شکل ۱. دامنه محاسباتی، موقعیت ساختمان و جهت جریان

Fig. 1. Computational domain, building position and flow direction

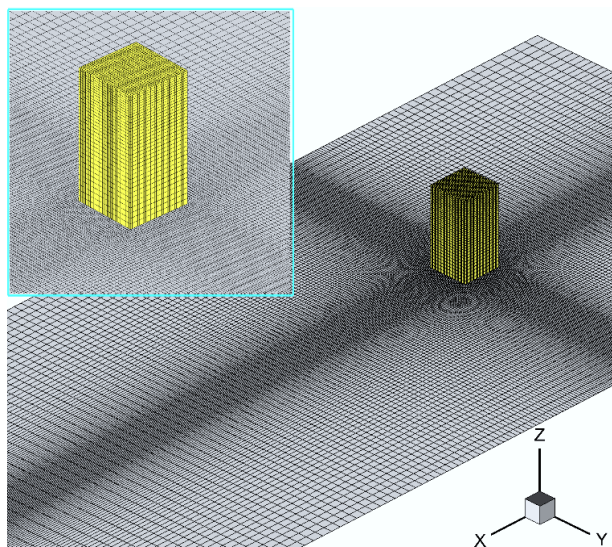
مختصات دامنه قرار گرفته است. در جدول ۱ مشخصات ابعادی و شرایط مرزی مربوط به این مدل (مطابق شکل ۱) ذکر شده است. در آزمایش تونل باد این مدل سرعت جریان باد به صورت تابعی از ارتفاع  $Z$  و در راستای طول دامنه  $(X)$  (شکل ۲) وارد دامنه محاسباتی می‌شود. این تابع به صورت  $U \propto A(z)^\alpha$  است که تعیین ضرایب  $A$  و  $\alpha$  وابسته به شرایط فیزیکی و شرایط جغرافیایی است. در آزمایش منگ و هیبی این تابع به صورت رابطه (۱۴) بوده که به منظور وارد کردن این تابع در نرم‌افزار از قابلیت تعریف تابع توسط کاربر<sup>۱</sup> استفاده شده است. همچنین جریان ورودی در این شبیه‌سازی می‌بایست به صورت آشفته باشد [۲۱] و به منظور ایجاد اغتشاش در ورودی دامنه،



شکل ۲. جهت جریان نسبت به ساختمان و پروفیل سرعت آن.

Fig. 2. The direction of flow relative to the building and the velocity profile

1 User Defined Function, UDF



شکل ۳. شبکه محاسباتی برای مدل معیار

Fig. 3. Computational grid in benchmark model

گسترده‌ای از آلاینده‌ها با قطر متفاوت هستند فرض شده است که از هر طیف ۴ قطر انتخاب شده و نرخ ورود هریک از این ۴ آلاینده با قطر مشخص به گونه‌ای تنظیم شده است که مجموع نرخ ورودی از هر طیف با مقادیر محاسبه شده در مرحله قبل برابری کند. همانطور که ذکر شد در این پژوهش شبیه‌سازی میدان جریان سیال برای مدت ۱۵۰ ثانیه صورت گرفته و از آن پس برای مدت ۱ ثانیه ذرات آلاینده همراه با هوا وارد دامنه محاسباتی شده است. با توجه به ابعاد دامنه و سرعت جریان، شبیه‌سازی برای بررسی نحوه انتقال، با ردیابی ذرات<sup>۳</sup> آلاینده برای مدت ۶ ثانیه (از ۱۵۰ تا ۱۵۶ ثانیه) صورت گرفته است. ذکر این نکته ضروری است که این مدت زمان کافی است زیرا همانطور که نتایج ارائه شده نشان می‌دهند پس از ۴ ثانیه از ورود ذرات آلاینده بیش از ۹۹ درصد جرم آلاینده‌های ورودی به دامنه از آن خارج می‌شوند و لذا در نمودارهای تغییرات غلظت بر حسب زمان، محور زمان از ۱ تا ۴ ثانیه مدرج شده است.

بدیهی است که در این شبیه‌سازی یکی از تاثیرگذارترین عوامل مقدار سرعت جریان ورودی بوده و با افزایش سرعت باد، قدرت آن برای انتشار و جابه‌جایی آلاینده‌ها بیشتر خواهد بود. لذا به منظور بررسی میزان تاثیر عامل سرعت بر نحوه پراکندگی ذرات آلاینده، شبیه‌سازی میدان سرعت و همچنین ردیابی آلاینده‌ها در مدل معیار برای پنج پروفیل مختلف سرعت انجام شده است. این پروفیل‌ها با

روش ورتکس<sup>۱</sup> با ۵۰۰ گردابه روی سطح ورودی، بکار برده شده است. شبکه محاسباتی در مدل معیار به صورت شبکه با سازمان در نظر

$$U = 6.93(Z)^{0.23} \quad (14)$$

گرفته شده و همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده تمرکز شبکه در راستای طولی و عرضی به روی خطوط  $X=0$  و  $Y=0$  و در راستای عمودی تمرکز به شبکه به سمت زمین و همچنین اطراف سقف ساختمان بوده و جمعاً این مدل دارای ۲۶۹۹۴۹۶ گره محاسباتی است. مدل اغتشاشی بکار رفته در شبیه‌سازی جریان سیال مدل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با الگوی زیر شبکه<sup>۲</sup> اسماگورینسکی-لیلی با ثابت  $CS = 0.1$  است. شبیه‌سازی میدان جریان برای مدت زمان ۱۵۰ ثانیه صورت گرفته و مقادیر میدان جریان شامل مولفه‌های سرعت میانگین‌گیری شده و نتایج برای صحنه‌گذاری ثبت شده است. پس از شکل‌گیری میدان سرعت فرض شده که جریان هوای ورودی به دامنه به مدت یک ثانیه حامل ذرات آلاینده بوده و یا به عبارتی یک توده از ذرات آلاینده در دور دست وارد جریان هوا شده و در نتیجه جریان هوای ورودی به دامنه حاوی ذرات آلاینده با غلظت معین است.

در مورد غلظت آلاینده‌های جامد ( $PM_{10}$  و  $PM_{2.5}$ ) موجود در هوای ورودی به دامنه ذکر این نکته ضروری است که به منظور ثبت مقادیر واقعی از مقادیر موجود گزارش کیفیت هوا و صدای شهر تهران در سال ۱۳۹۷ [۲۲] استفاده شده است. در این گزارش مقادیر میانگین غلظت آلاینده‌های مختلف در طول سال ۹۷ در ۱۴ ایستگاه سنجش آلودگی هوا ثبت شده و میانگین مقادیر گزارش شده از این ایستگاه‌ها که در نقاط مختلف شهر تهران قرار گرفته‌اند، به خوبی بیانگر مقدار غلظت یک نوع از آلاینده در یک شهر با هوای آلوده است. میانگین غلظت در طول سال ۹۷ برای آلاینده  $PM_{10}$  و  $PM_{2.5}$  در شهر تهران به ترتیب برابر ۲۸ و  $73/6$  میکروگرم بر متر مکعب ثبت شده است و با توجه به ابعاد دامنه و سرعت جریان هوای ورودی به آن در این پژوهش، حجم هوای وارد شده به دامنه محاسباتی در مدت زمان تزریق آلاینده‌ها محاسبه و نهایت نرخ ورود آلاینده‌ها به دامنه محاسباتی بر حسب میکروگرم بر ثانیه لحاظ شده است. از طرفی با توجه به اینکه هریک از آلاینده‌های  $PM_{10}$  و  $PM_{2.5}$  خود شامل طیف

1 Vortex Method (VM)

2 Subgrid-Scale Model, SGS Model



جدول ۲. مشخصات پروفیل سرعت باد در حالت‌های مورد بررسی.

Table 2. Characteristics of wind velocity profiles for the desired conditions

میزان قدرت انتشار	مقدار سرعت در هر ارتفاع* (cm)					ضریب $\alpha$	ضریب A	نام
	$Z_{max} = 90$	$Z_{2h} = 32$	$Z_h = 16$	$Z_{h/2} = 8$	$Z_{GND} \sim 0$			
متوسط	۵/۰۰	۴/۰۲	۳/۴۸	۳/۰۱	۱/۹۴	۰/۲۱	۵/۱۱	مورد مطالعاتی ۰۲
کم	۴/۰۰	۳/۲۲	۲/۷۸	۲/۴۱	۱/۵۵	۰/۲۱	۴/۰۹	مورد مطالعاتی ۰۳
خیلی کم	۳/۰۰	۲/۴۲	۲/۰۹	۱/۸۱	۱/۱۷	۰/۲۱	۳/۰۷	مورد مطالعاتی ۰۴

\*- ارتفاع ساختمان h=۱۶cm

شده است (شکل ۴). دلایل انتخاب این ناحیه بدین شرح است: الف) وجود ساختمان‌های بلند مرتبه با موقعیت قرارگیری نامنظم نسبت به هم، ب) عدم وجود عوارض زمین در فواصل نزدیک به محدوده مورد بررسی، ج) زاویه مناسب بلوک ساختمان‌ها نسبت به جهت باد غالب با توجه به گلباد منطقه، د) باز بودن زمین<sup>۲</sup> در زاویه ورودی جریان باد. شکل ۴ تصویر هوایی محدوده مورد بررسی را نمایش می‌دهد. با توجه به اطلاعات گلباد نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی در این محدوده (ایستگاه مهرآباد) جهت باد غالب از سمت غرب به شرق در این محدوده است.

برای ساخت مدل هندسی این بلوک شهری فرضیاتی صورت گرفته است: الف) ساختمان‌ها و سازه‌های کوتاه از نظر ارتفاع در مدل وارد نشده‌اند. ب) جزئیات کوچک مقیاس<sup>۳</sup> مانند شکل مقاطع ساختمان‌ها و پوشش گیاهی در نظر گرفته نشده است. ج) ساختمان‌های پشت جریان (بعد از آخرین ساختمان در محدوده مورد بررسی) در نظر گرفته نشده‌اند و محدوده پشت جریان به صورت زمین باز فرض شده است. د) پروفیل سرعت باد براین مدل با توجه به رابطه (۱۴) اصلاح شده است (تعیین مقادیر  $\alpha$  و A).

با توجه به فرضیات بالا مدل هندسی مجموع ساختمان‌ها ایجاد و شبکه‌بندی شده است (شکل ۵)، شبکه‌بندی مورد استفاده در این مدل از نوع شبکه با سازمان برای لایه مرزی و شبکه بی‌سازمان برای سایر قسمت‌ها بوده و در مجموع این مدل دارای ۱۰۲۴۵۷۷ گره محاسباتی است. دامنه محاسباتی در این مدل نیز مانند مدل معیار به صورت یک مکعب مستطیل بوده و دارای شرایط مرزی مشابه است (جدول ۱). ابعاد دامنه به صورت ۷ متر طول دامنه، ۲/۳۵ متر عرض

تغییر مقادیر  $\alpha$  و A در رابطه (۱) ایجاد شده‌اند. از آنجا که تشدید آلودگی هوا و پدیده سکون آلاینده‌ها بر اثر عدم وزش باد و یا وزش باد با سرعت ناچیز صورت می‌گیرد در گزارش‌های منتشر شده در این پژوهش صرفاً میزان غلظت آلاینده‌ها در سطوح مختلف برای حالت‌های وزش باد با سرعت متوسط تا ناچیز بررسی شده است. در جدول ۲ مشخصات این سه حالت ذکر شده، همچنین برای درک بهتر میزان رشد سرعت با افزایش ارتفاع، مقدار سرعت در مقاطع مختلف ارتفاع نیز آمده است.

شکل ذرات آلاینده در این پژوهش همگی به صورت کروی فرض شده‌اند و با توجه به مطالب ذکر شده در بخش ۲-۲ از آنجا که ذرات آلاینده جامد معلق (PM<sub>x</sub>) از یک جنس و ماده بخصوصی نیستند، چگالی این طیف آلاینده‌ها به صورت میانگینی از چند نوع ماده بالک<sup>۱</sup> مانند گرد و غبار، خاکستر چوب، دوده و غیره فرض شده که همگی این مواد اولاً به صورت جامد بوده و ثانیاً به طور معمول در هوای اغلب محیط‌هایی شهری وجود دارند. در این پژوهش برای ذرات آلاینده چگالی ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب فرض شده است.

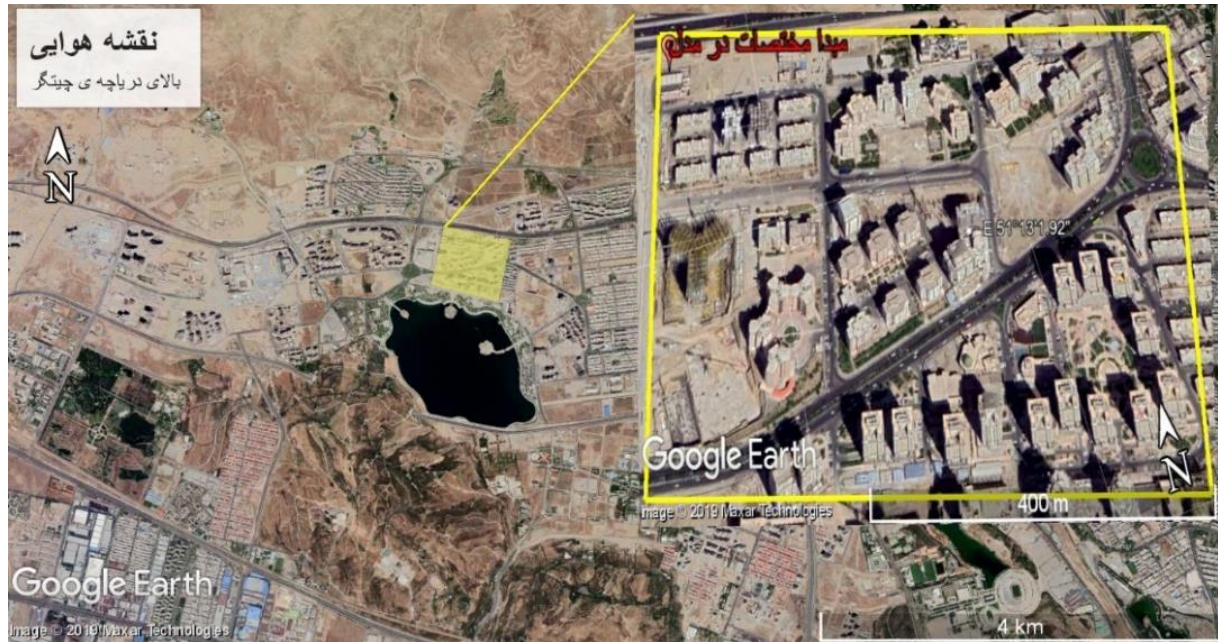
## ۵- مدل شهری واقعی

شبیه‌سازی صورت گرفته برای مدل معیار در بخش قبلی اطلاعات مورد نیاز شامل تنظیمات بهینه و عوامل تاثیرگذار بر مدل‌سازی را در اختیار قرار داده و می‌توان به کمک این اطلاعات مدل معیار را توسعه داده و یک بلوک شهری شامل چندین ساختمان با چیدمان نامنظم و ابعاد و اندازه‌های متفاوت را مدل‌سازی نمود. بدین منظور در این پژوهش یک ناحیه از شهر تهران واقع در منطقه ۲۲ شهرداری انتخاب

2 Open field

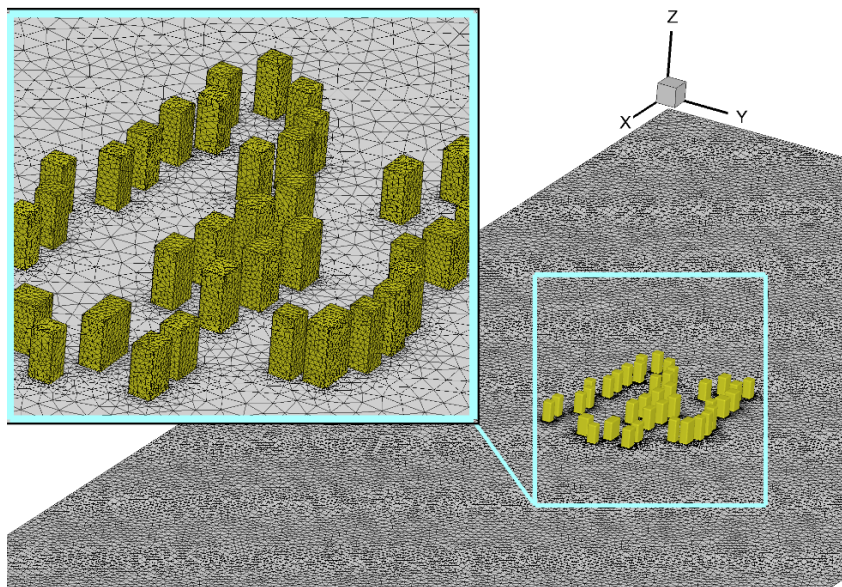
3 Small Scale

1 Bulk Material



شکل ۴. تصویر هوایی محدوده شهری مورد نظر.

Fig. 4. Satellite image of the desired urban area



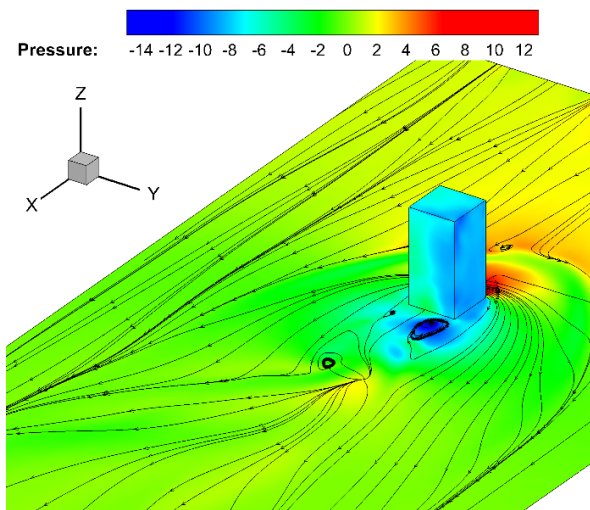
شکل ۵. شبکه محاسباتی برای مدل محیط شهری واقعی

Fig. 5. Computational grid for a real urban area

و قطر ذره وارد دامنه محاسباتی می‌شود. با توجه به بزرگتر بودن سطح ورودی دامنه در مدل شهری حجم هوای ورودی در مدت زمان تزریق آلاینده‌ها بیشتر بوده و در نتیجه مقدار جرم ورودی به دامنه نیز بیشتر است و این مورد در نمودارهای مربوط به غلظت آلاینده‌ها روی سطوح نیز به وضوح دیده می‌شود.

#### ۶- نتایج و بحث

و ۱ متر ارتفاع است و مبدا مختصات نیز در ضلع شمالی مجموع بلوک ساختمان‌ها و در صفحه مقابل جریان اولین ساختمان قرار گرفته است (شکل ۴). مدت زمان شبیه‌سازی برای میدان سرعت در این مدل نیز مانند مدل معیار ۱۵۰ ثانیه بوده و پس از آن فرض شده که به مدت ۱ ثانیه جریان هوای آلوده به ذرات جامد آلاینده با شرایطی فیزیکی مشابه مدل معیار از نظر شکل ذره، چگالی، غلظت



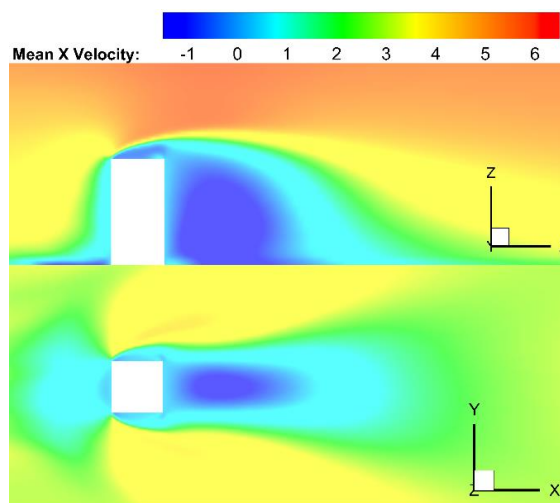
شکل ۷. توزیع فشار استاتیک روی سطوح ساختمان و روی زمین و خطوط جریان روی زمین

Fig. 7. Contours of static pressure on the building surfaces and the ground and stream lines on the ground

را به خوبی نشان می‌دهد. همانطور که پیشتر ذکر شد میدان سرعت سیال برای این مدل قبلاً توسط منگ و هیبی [۲۰] در تونل باد به صورت تجربی مدل‌سازی شده‌است. نتایج میدان سرعت شامل مقادیر میانگین مولفه‌های سرعت جریان سیال در نقاط متعدد در اطراف ساختمان مدل توسط حسگرهای سرعت سنجش و ثبت شده و در این پژوهش به منظور اعتبارسنجی شبیه‌سازی، داده‌های آن با نتایج کار حاضر مقایسه شده‌است.

در آزمایش تونل باد حسگرهای سرعت در صفحه عرضی میانی ( $y=0$ ) و همچنین تعدادی از صفحات موازی با زمین قرار گرفته و جمعا در ۱۷۶ نقطه در اطراف مدل ثبت داده‌ها در طول زمان صورت گرفته و مقدار میانگین این داده‌ها به ثبت رسیده‌است. از طرفی با توجه به تقارن هندسی مدل و همچنین جهت جریان، یکی از مناسب‌ترین صفحات برای بررسی توزیع مقادیر و سایر تحلیل‌ها نیز صفحه  $y=0$  بوده که اغلب نمودارهای ارائه شده در این بخش روی این صفحه می‌باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده در شکل‌های ۸، ۹، ۱۰، ۱۱ مقدار متوسط مولفه سرعت راستای جریان روی صفحه میانی و در مقاطع طولی با مختصات ۱۶، ۸، ۰، -۶ X نمایش داده شده و با نتایج تجربی نیز مقایسه شده است. مقطع مورد نظر در شکل ۸ قبل از دیواره مقابل جریان ساختمان در نظر گرفته شده است و نشان دهنده این است که شرایط جریان ورودی باد از نظر پروفیل سرعت با مقادیر



شکل ۶. الف: خطوط همتراز مولفه افقی سرعت میانگین در صفحه  $y=0$ ، ب: در صفحه  $z=0.01$  m

Fig. 6. Contours of Mean x-velocity on planes at (a):  $y=0$  m and (b): at  $z=0.01$  m

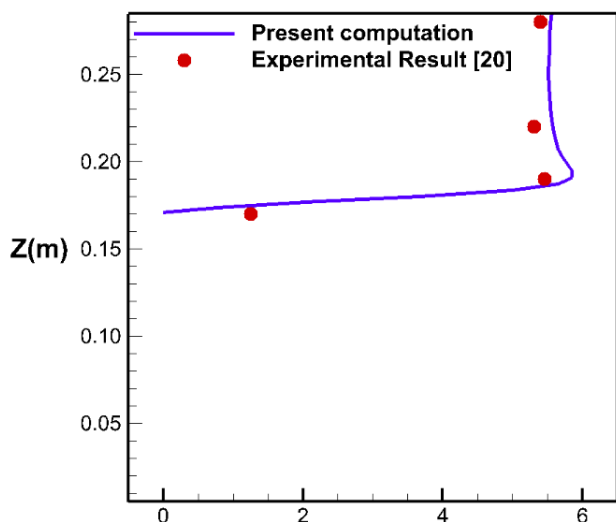
در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی میدان جریان سیال هوا در اطراف مدل‌های مورد استفاده و نیز نحوه پراکندگی ذرات آلاینده جامد در دامنه محاسباتی بررسی شده است.

#### ۱-۶- مدل معیار

در این شبیه‌سازی یکی از مهمترین پارامترها، مولفه سرعت میانگین در راستای جریان<sup>۱</sup> بوده که با بررسی آن می‌توان دنباله جریان و اثر حضور ساختمان در دامنه محاسباتی و نیز جریان برگشتی، که منجر به تمرکز آلاینده‌ها می‌شود، را بررسی نمود، شکل ۶-الف خطوط همتراز این پارامتر را در صفحه  $y=0$  و شکل ۶-ب در صفحه  $Z=0.01$  m (نزدیک به سطح زمین) را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان انتظار داشت که تمرکز غلظت آلاینده‌ها در نواحی با سرعت کم بیشتر بوده و در طول زمان دارای نوساناتی باشد. لازم به ذکر است که تحلیل‌ها و اشکال ارائه شده برای میدان سرعت همگی در زمان ۱۵۰ ثانیه پس از شروع شبیه‌سازی بوده و همگی به صورت میانگین زمانی در این مدت زمان ثبت شده‌اند.

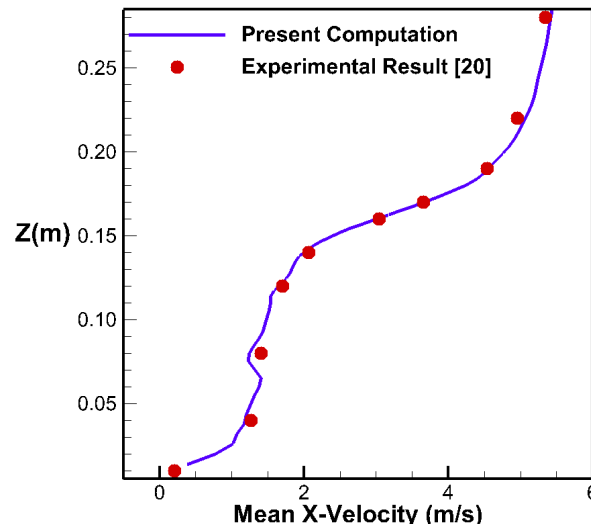
شکل ۷ توزیع فشار استاتیک در سطوح ساختمان و روی زمین را نشان می‌دهد. خطوط جریان بر روی زمین نیز در این شکل ترسیم شده است. این شکل رابطه بین گرادیان‌های فشار و ایجاد ورتکس<sup>۲</sup>ها

1 Mean X-Velocity  
2 Vortex



شکل ۹. تغییرات مولفه افقی سرعت متوسط در راستای محور جریان در مقطع  $x = 0$

Fig. 9. Distribution of the mean x-velocity along vertical direction at the  $x=0$  cm



شکل ۸. تغییرات مولفه افقی سرعت متوسط در راستای محور جریان در مقطع  $x = -6$  cm

Fig. 8. Distribution of the mean x-velocity along vertical direction at the  $x=-6$  cm

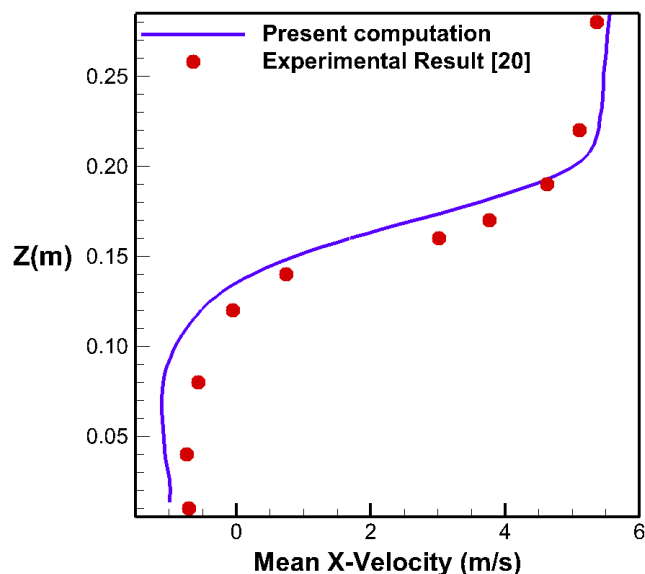
۱۵۲ ثانیه را نشان می‌دهد. در رابطه با نمایش ذرات در این نما ذکر چند نکته ضروری است، اولاً با توجه به اندازه بسیار ریز ذرات در این نمایش اندازه ذرات تا ۱۰۰۰ برابر اندازه واقعی بزرگ نمایی شده‌اند، از هر ۵۰ ذره در امتداد سه بعد تنها ۱ ذره نمایش داده شده است و از نمایش بقیه ذرات صرف نظر شده است، ذرات آلاینده بر اساس سرعت لحظه‌ای رنگ بندی شده‌اند و ذرات در ارتفاع بیش از  $Z=0/2$  m

آزمایش تجربی توافق قابل قبولی دارد.

مقطع مورد نظر در شکل ۹ در میانه ساختمان قرار داشته و در نتیجه در ارتفاع کمتر از ارتفاع ساختمان ( $Z=0/16$  m) مقداری برای سرعت ثبت نشده است. با افزایش ارتفاع ساختمان از روی سقف گردابان بزرگ سرعت مشاهده می‌شود که این مورد نشان‌دهنده ساختار لایه مرزی سرعت در این ناحیه است.

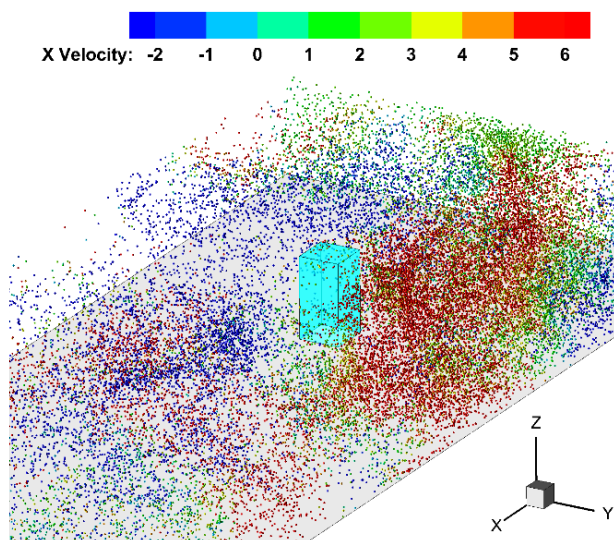
شکل ۱۰ نشان‌دهنده تغییرات سرعت در مقطع پشت ساختمان نسبت به جهت جریان است. مقادیر سرعت کمتر از صفر نشان‌دهنده جریان برگشتی در این ناحیه است همچنین در این مقطع اختلاف ناچیزی بین نتایج محسوس است که این موضوع به دلیل وجود گردابه‌های زیاد و گردابان‌های بزرگ سرعت در این ناحیه است. با شکل‌گیری جریان در مقاطع دور از ساختمان انتظار می‌رود اولاً از اختلاف موجود بین نتایج عددی و آزمایشگاهی کاسته شده و همچنین پروفیل سرعت به شکل پروفیل سرعت در ورودی نزدیک شود. شکل ۱۱ این مسئله را در مقطع  $x=16$  cm نشان می‌دهد.

مطابق با مطالبی که در بخش ۲-۲-۱ ذکر شد پس از ۱۵۰ ثانیه از شبیه‌سازی میدان جریان سیال، ذرات آلاینده جامد وارد میدان محاسباتی می‌شوند و برای مدت ۶ ثانیه بعد از آن انتقال و پراکندگی این ذرات در دامنه محاسباتی شبیه‌سازی و ردیابی شده است. شکل ۱۲ نمایی از پراکندگی ذرات آلاینده در دامنه محاسباتی در لحظه



شکل ۱۰. تغییرات مولفه افقی سرعت متوسط در راستای محور جریان در مقطع  $x = 10$  cm

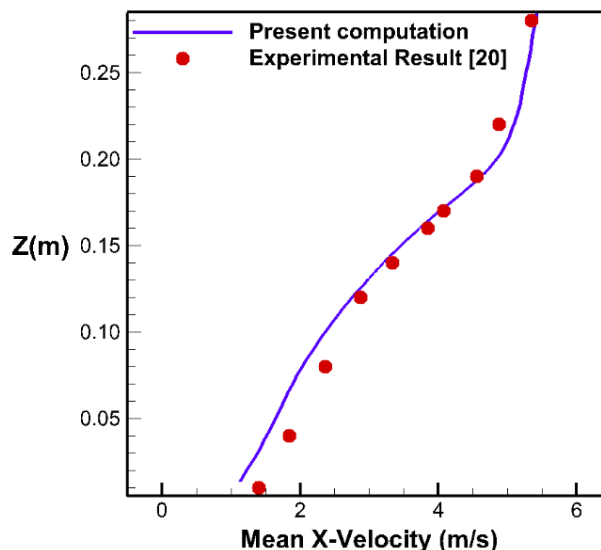
Fig. 10. Distribution of the mean x-velocity along vertical direction at the  $x=10$  cm



شکل ۱۲. پراکندگی ذرات آلاینده در لحظه ۱۵۲ ثانیه  
**Fig. 12. Dispersion of pollutant particles at 152 s**

$X = -4$  بعد از عبور ذرات آلاینده مقدار غلظت به عدد صفر رسیده و تغییرات محسوسی در این مقدار مشاهده نمی‌شود اما در دو صفحه دیگر که در پشت ساختمان قرار گرفته‌اند نوساناتی در مقدار غلظت آلاینده‌ها مشاهده می‌شود که نشانگر باقی ماندن مقداری از آلاینده‌ها در این صفحات است و در صورتی که جریان هوای حاوی آلاینده‌ها به طور مداوم وارد دامنه محاسباتی شود به مرور زمان مقدار قابل توجهی از آلاینده‌ها در این نواحی محبوس شده و نشست خواهند کرد.

همان طور که در بخش ۲-۲-۱ ذکر شد به منظور بررسی تاثیر سرعت باد بر میزان پراکندگی ذرات آلاینده در دامنه محاسباتی شبیه‌سازی میدان سرعت و پراکندگی ذرات آلاینده در مدل معیار برای سه حالت با پروفیل سرعت متفاوت در ورودی مطابق با مقادیر ارائه شده در جدول ۲ انجام شده است. در این بخش نیز انتگرال غلظت آلاینده‌ها روی سطح زمین برای این سه حالت در طول زمان در شکل ۱۴ ارائه شده است. با توجه به جدول ۲ قدرت انتشار باد و در نتیجه حمل آلاینده‌ها در مورد مطالعاتی ۰۲ بیشتر از دو مورد دیگر بوده و همانطور که در شکل ۱۴ ارائه شده است، حداکثر میزان غلظت روی زمین در مورد مطالعاتی دوم از سایر موارد کمتر است و همچنین سطح زیر منحنی که نشانگر مجموع غلظت نشسته شده بر روی سطح زمین در طول است در این مورد از سایر موارد کمتر است. دقت شود که سطح با توجه به اینکه در هر سه مورد با گذشت

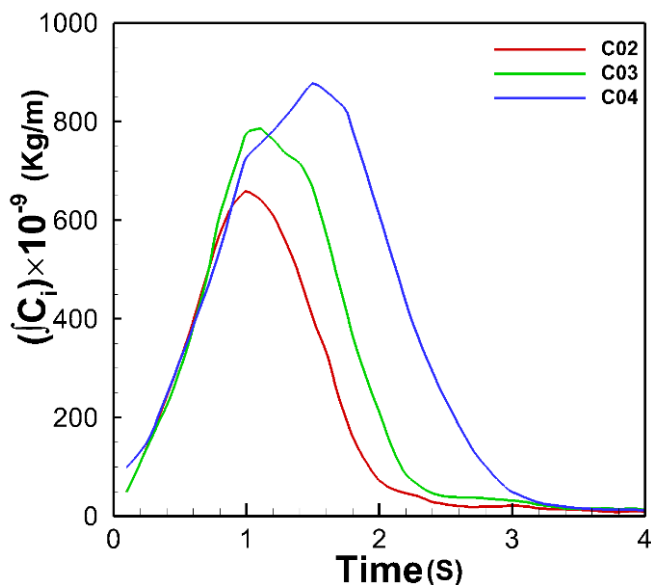


شکل ۱۱. تغییرات مولفه افقی سرعت متوسط در راستای محور جریان در مقطع  $x = 16$  cm  
**Fig. 11. Distribution of the mean x-velocity along vertical direction at the  $x = 16$  cm**

نمایش داده نشده‌اند. عدم توزیع یکسان ذرات در این دامنه و وجود توده‌هایی از آلاینده‌ها در برخی نقاط نشان دهنده ماهیت آشفته جریان و در نتیجه پخش این ذرات در دامنه به صورت تصادفی است، همچنین با مقایسه شکل ۷ و ۱۱ می‌توان دریافت که محل تمرکز آلاینده‌ها با محل تشکیل گردابه‌ها رابطه مستقیم دارد.

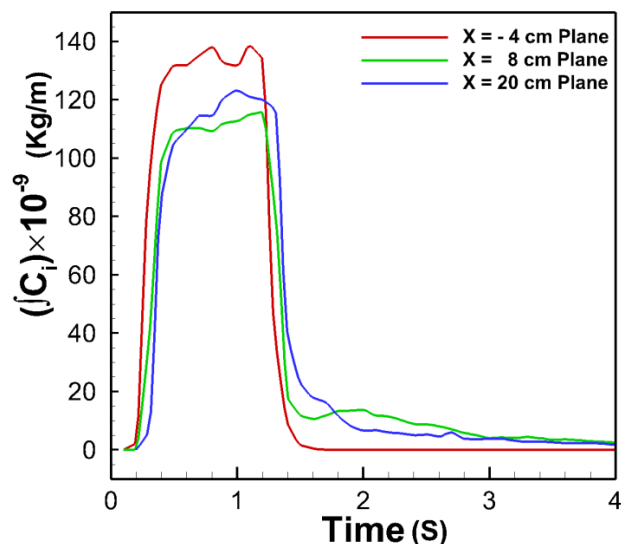
به منظور بررسی کمی پراکندگی ذرات آلاینده در دامنه محاسباتی یکی از راهکارهای مرسوم محاسبه انتگرال غلظت آلاینده‌ها روی سطوح در طول زمان است. بدین منظور در پژوهش حاضر انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده روی سطح زمین و همچنین برخی از صفحات عمود بر جهت جریان با مختصات  $20$  cm،  $8$ ،  $X = -4$  در مدت شبیه‌سازی ثبت و به صورت نمودار ارائه شده است. در این نمودارها محور عمودی بر حسب غلظت در واحد سطح  $(\text{m}^2) \times (\text{kg})$  و محور افقی بر حسب زمان است. لازم به ذکر است که در این نمودارها محور زمان از مقدار صفر (زمان شروع تزریق آلاینده‌ها) تا ۴ ثانیه پس از آن مدرج شده است.

برای مدل معیار انتگرال غلظت آلاینده‌ها در سه صفحه  $20$  cm،  $8$ ،  $X = -4$  که در واقع در سه مقطع روی سطح مقابل جریان ساختمان، پشت ساختمان (در محل تمرکز گردابه‌ها) و در پایین دست و دور از ساختمان قرار دارند در طول مدت شبیه‌سازی ثبت و در شکل ۱۳ ارائه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در صفحه  $20$  cm



شکل ۱۴. تغییرات انتگرال غلظت آلاینده‌ها روی سطح زمین در طول زمان برای سه مورد مطالعاتی.

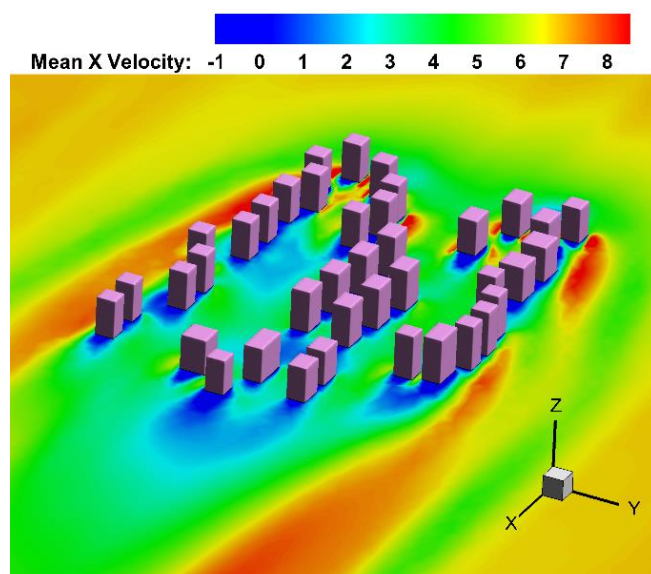
**Fig. 14. Variations of the integral of concentration of pollutants on the ground surface versus time for three test cases**



شکل ۱۳. تغییرات انتگرال غلظت آلاینده‌ها روی سطح در صفحات  $x = -4, 8, 20$  cm در طول زمان.

**Fig. 13. Variations of the integral of concentration of pollutants versus time on planes placed at the  $x = -4, 8, 20$  cm**

شکل ۱۵ این توزیع سرعت به صورت سطوح همتراز ارائه شده است. در این شکل با توجه به اینکه در این شبیه‌سازی سرعت جریان هوا در ورودی دامنه به صورت تابع نمایی از ارتفاع  $Z$  افزایش می‌یابد (رابطه (۱))، مقدار مولفه افقی سرعت در راستای جریان در این سطح کم و در برخی نقاط با مقدار منفی (جریان برگشتی) مشاهده می‌شود و



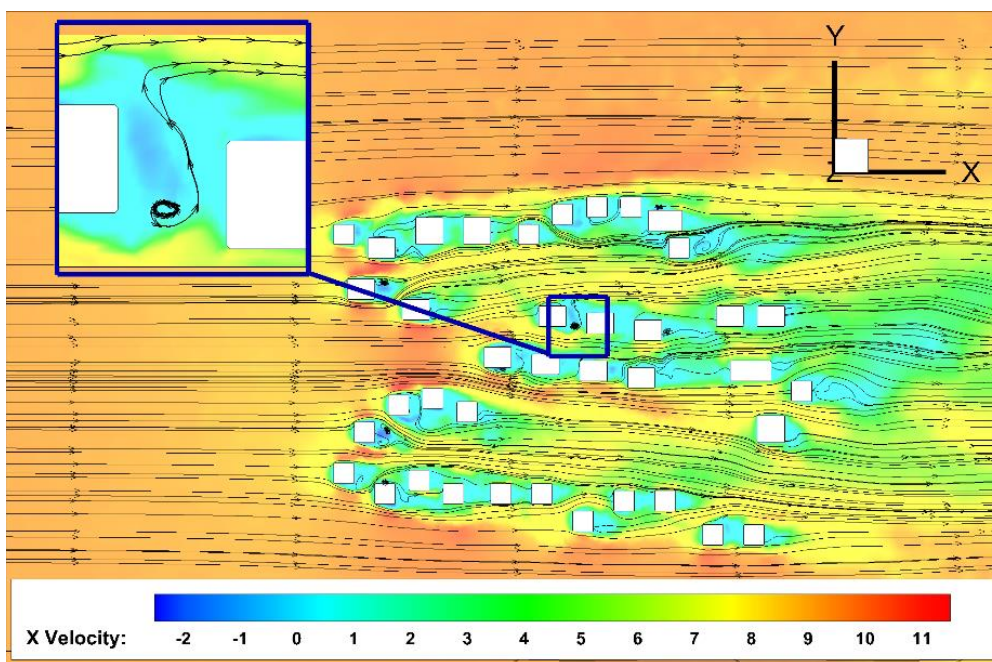
شکل ۱۵. توزیع مولفه افقی سرعت میانگین در راستای جریان در صفحه  $z=1$  cm

**Fig. 15. Contours of Mean x-velocity on plane at  $z=1$  cm**

زمان میزان غلظت تقریباً به عدد صفر میل می‌کند پس در نتیجه در هر سه حالت اکثر آلاینده‌ها از روی سطح زمین برخاسته و از دامنه محاسباتی خارج می‌شوند ولیکن در حالتی که سرعت باد در ورودی کمتر است ماندگاری ذرات در دامنه محاسباتی بیشتر خواهد بود و همانطور که گفته شد در صورت استمرار ورود آلاینده‌ها به دامنه محاسباتی با گذشت زمان مقداری قابل توجهی از آلاینده‌ها روی سطح زمین باقی خواهد ماند. نکته قابل توجه دیگر در این نمودار این است که به حداکثر رسیدن میزان انتگرال غلظت روی سطح زمین در مورد مطالعاتی چهارم با تاخیر زمانی بیشتری نسبت به دو مورد دیگر رخ داده و همچنین خروج آلاینده‌ها از دامنه محاسباتی کندتر است. تحلیل این موضوع با توجه به پروفیل سرعت در مورد مطالعاتی چهارم ساده است اما تحلیل این نمودار با فرض سرعت باد با قدرت انتشار بسیار کمتر همان مسئله پدیده سکون هوا و تمرکز آلاینده‌ها را می‌رساند.

## ۲-۶-۲ مدل واقعی

در این مدل با توجه به عدم تقارن هندسی در چیدمان ساختمان‌ها به منظور بررسی توزیع مولفه افقی سرعت میانگین در راستای محور جریان یک سطح در نزدیکی زمین ( $Z = 0.5$  cm) انتخاب شده و در

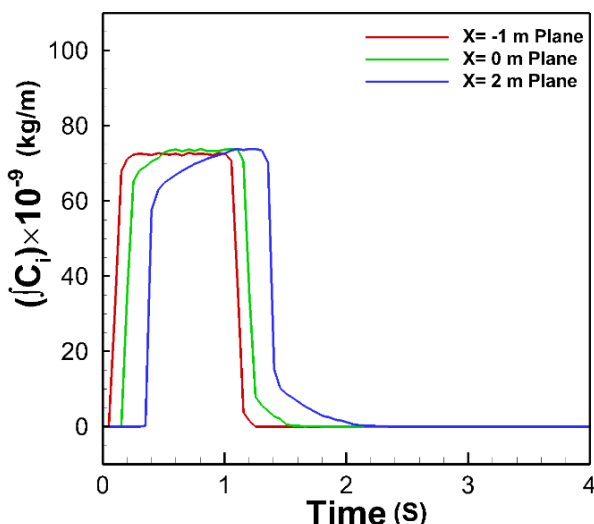


شکل ۱۶. توزیع مولفه افقی سرعت لحظه در راستای جریان در لحظه  $t=150$  s در صفحه  $z=4$  cm و خطوط جریان روی این صفحه.  
**Fig. 16. Contours of instantaneous x-velocity for  $t=150$  s, on plane at  $z=4$  cm and streamlines on this plane**

حداکثر خود در مدت زمانی کوتاهی به صفر رسیده است و این حالی است که در دو صفحه دیگر چنین رفتاری مشاهده نمی‌شود و این موضوع به دلیل اثرات دنباله جریان در پایین دست جریان است. در این مدل اگر راستای موازی با محور جریان (محور X)، که طول آن ۷ متر است، از  $-2$  m در ورودی تا  $5$  m در خروجی دامنه

با توجه به تراکم ساختمان‌ها در این مدل نسبت به مدل معیار این جریان برگشتی به صورت گسترده‌تر وجود دارد.

در شکل ۱۶ توزیع مولفه افقی سرعت لحظه‌ای در راستای جریان در زمان  $150$  ثانیه در صفحه  $Z=10$  cm و همچنین خطوط جریان در این لحظه نشان داده شده است. در این صفحه و در لحظه مورد اشاره، تعدادی گردابه در نواحی که مولفه افقی سرعت نزدیک به صفر است مشاهده می‌شود. مسلماً در لحظات دیگر و سایر نقاط نیز تعداد متعددی گردابه تشکیل می‌شود. لیکن احتمال تشکیل این گردابه‌ها در پشت ساختمان‌ها (نسبت به جهت جریان) بیشتر خواهد بود.



شکل ۱۷. تغییرات انتگرال غلظت آلاینده‌ها روی سطح در صفحات  $x=-1, 0, 2$  m در طول زمان.  
**Fig. 17. Variations of the integral of concentration of pollutants versus the time on the planes placed at  $x=-1, 0, 2$  m**

به منظور بررسی کمی نحوه انتقال ذرات آلاینده جامد در دامنه محاسباتی در این مدل نیز انتگرال سطحی غلظت ذرات روی سطوح مختلف محاسبه شده است. نحوه مدرج کردن محورهای نمودارها از نظر کمیت و واحد اندازه‌گیری و همچنین بازه زمانی در محور افقی، برای این مدل نیز مانند مدل معیار است. در شکل ۱۷ تغییرات انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده‌ها روی سطوح صفحات  $2$  m،  $0$ ،  $-1$  X ارائه شده است. در این نمودار مشاهده می‌شود که تغییرات غلظت در صفحه  $X=0$  در زمان عبور ذرات آلاینده از آن صفحه با نوساناتی همراه بوده که دلیل آن قرارگیری موقعیت این صفحه در روی وجه رو به جریان اولین ساختمان در دامنه محاسباتی است. همچنین مقدار انتگرال غلظت روی صفحه  $X=-1$  m از مقدار

جامد برای دو مدل مورد بررسی قرار گرفته است. مدل اول یک مدل ساده شامل یک ساختمان است که با هدف بررسی میزان دقت مدل‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. میدان سرعت در این مدل قبلاً در تونل باد مورد آزمایش قرار گرفته و برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، این نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مذکور مقایسه شده و توافق قابل قبولی مشاهده شده است. هندسه مدل دوم متناسب با یک ناحیه در شهر تهران ایجاد شده و متناسب با شرایط بهینه‌ای که از شبیه‌سازی مدل مطالعاتی اول بدست آمده است، میدان سرعت و پراکندگی ذرات آلاینده جامد برای این مدل نیز شبیه‌سازی شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده کارایی بالای روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای مدل‌سازی این گونه مسائل است. این روش از نقطه نظر صرف بهینه مقدار منابع محاسباتی و در عین حال دقت بالا و امکان ثبت نتایج به صورت وابسته به زمان، نسبت به روش‌های میانگین‌گیری رینولدز برتری دارد. تحقیق این دو مدل مطالعاتی به کمک روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ نشان می‌دهد که روش دینامیک سیالات محاسباتی امکان بررسی تغییرات مقادیر مختلف در اینگونه مسایل را با تفکیک پذیری بالا در اختیار قرار داده و می‌تواند به کمک آن به پیش‌بینی نحوه پراکندگی و تجمع ذرات آلاینده جامد در محیط‌های شهری در مقیاس کوچک پرداخت. نتایج ارائه شده در این پژوهش همبستگی مناسبی دارند به طوری که می‌توان با تحلیل نتایج میدان سرعت و مقایسه آن با مقدار کمی غلظت آلاینده‌ها در روی سطوح عوامل موثر بر تراکم میزان آلاینده‌ها در هر سطح را شناسایی کرد. در نمودارهای ارائه شده مربوط به تغییرات غلظت آلاینده‌ها نسبت به زمان علی‌رغم ناچیز بودن میزان غلظت، تغییرات این مقدار نسبت به زمان با وضوح و دقت بالا ثبت شده است که این مورد نشان دهنده قدرت بالای مدل بکار رفته و حساسیت بالای این مدل نسبت به عوامل تاثیرگذار و توان آن در ثبت مقادیر با تفکیک بالا است. پژوهش‌هایی مانند پژوهش حاضر می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مربوط به توسعه محیط‌های شهری در مرحله طراحی حائز اهمیت باشد و قبل از توسعه ساختمان‌ها و به ویژه بلند مرتبه سازی آن‌ها پیامدها ناشی از این تغییرات در مبلمان شهری در نحوه پراکندگی ذرات جامد آلاینده را بررسی نمود.

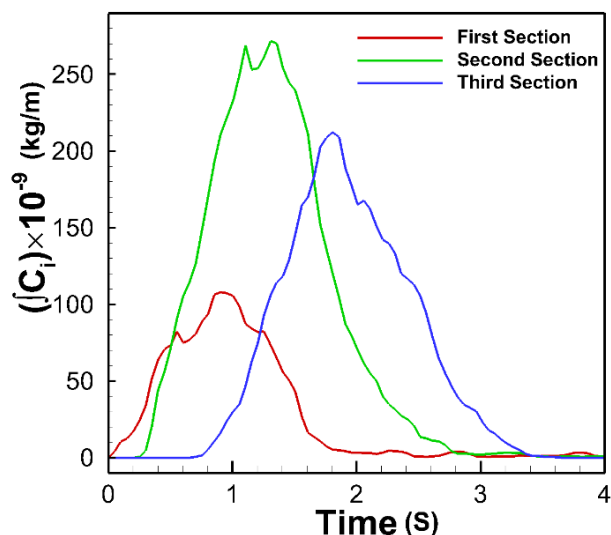
#### تشکر و قدردانی

نویسندگان از محققین آزمایشگاه پژوهشی دینامیک سیالات

محاسباتی در نظر گرفته شود، قرارگیری موقعیت ساختمان‌ها در این مدل از نظر فاصله از ورودی جریان، در راستای جریان (محور X)، به این صورت است که در فاصله طولی ۲ متر اول از ورودی (از ۰ تا ۲ متر) هیچ‌گونه ساختمانی وجود نداشته و وجه مقابل جریان اولین ساختمان روی صفحه  $X=0$  قرار گرفته است. از طرفی کلیه ساختمان‌ها در فاصله طولی ۲ متر دوم (از ۰ تا ۲ متر) قرار گرفته‌اند و در فاصله طولی ۲ متری سوم (از ۲ متر تا ۴ متر) نیز علاوه بر اینکه هیچ ساختمانی وجود ندارد، متاثر از دنباله جریان است. با توجه به این موارد برای بررسی میزان غلظت روی سطح زمین در این مدل است سطح به سه قسمت تقسیم شده و انتگرال سطحی غلظت روی هر بخش محاسبه و در شکل ۱۸ ارائه شده است. نکته حائز اهمیت در این شکل وجود چندین نقطه ماکزیمم نسبی در هر نمودار است که نشان دهنده رفتار آشفته پدیده انتقال ذرات آلاینده در این مدل است. از طرفی علاوه بر اینکه مقدار بیشینه در بخش دوم از مساحت سطح بیشتر از دو مورد دیگر است، سطح زیر منحنی برای این بخش نیز بیشتر از دو بخش دیگر است.

#### ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش میدان سرعت و همچنین پراکندگی ذرات آلاینده



شکل ۱۸. تغییرات انتگرال غلظت آلاینده‌ها روی سطح در سه بخش از سطح زمین.

Fig. 18. Variations of the integral of concentration of pollutants on three parts of ground surface



- [4] Á. Leelőssy, F. Molnár, F. Izsák, Á. Havasi, I. Lagzi, R. Mészáros, Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review, *Central European Journal of Geosciences*, 6(3) (2014) 257-278.
- [5] P. Jones, G. Whittle, Computational fluid dynamics for building air flow prediction—current status and capabilities, *Building and Environment*, 27(3) (1992) 321-338.
- [6] D. Moon, A. Albergel, F. Jasmin, G. Thibaut, The use of the MERCURE CFD code to deal with an air pollution problem due to building wake effects, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 67 (1997) 781-791.
- [7] K. Craig, D. De Kock, Snyman, Minimizing the effect of automotive pollution in urban geometry using mathematical optimization, *Atmospheric Environment*, 35(3) (2001) 579-587.
- [8] E. Solazzo, X. Cai, S. Vardoulakis, Improved parameterisation for the numerical modelling of air pollution within an urban street canyon, *Environmental Modelling & Software*, 24(3) (2009) 381-388.
- [9] P. Gousseau, B. Blocken, G. Van Heijst, Quality assessment of large-eddy simulation of wind flow around a high-rise building: validation and solution verification, *Computers & Fluids*, 79 (2013) 120-133.
- [10] S.-J. Park, W. Choi, J.-J. Kim, M.J. Kim, R.J. Park, K.-S. Han, G.J.B. Kang, Environment, Effects of building–roof cooling on the flow and dispersion of reactive pollutants in an idealized urban street canyon, *Building & Environmental*, 109 (2016) 175-189.
- [11] M. Llaguno-Munitxa, E. Bou-Zeid, M. Hultmark, The influence of building geometry on street canyon air flow: validation of large eddy simulations against wind tunnel experiments, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 165 (2017) 115-130.
- [12] E. Aristodemou, L.M. Boganegra, L. Mottet, D. Pavlidis, A. Constantinou, C. Pain, A. Robins, H. ApSimon, How tall buildings affect turbulent

محاسباتی، توربولانس و احتراق بخش مهندسی مکانیک و مسئولین و کارشناسان مرکز محاسبات پیشرفته دانشگاه قم نهایت تشکر و قدردانی را برای فراهم آوردن امکانات محاسباتی به عمل می‌آورند.

#### فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

CS	ثابت اسماگورینسکس
$C_d$	ضریب نیروی پسا
LS	طول اختلاط
Re	عدد رینولدز
$S_{ij}^-$	تانسور نرخ کرنش
U	سرعت، m/s

#### علائم یونانی

$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\tau_r$	زمان آسودگی، s
$\kappa$	ضریب فون کارمن
$\mu_t$	لزجت آشفتگی

#### زیرنویس

F	سیال
P	ذره
L-S	لیف سافمن

#### مراجع

- [1] H.R.J.A.E. Anderson, Air pollution and mortality: A history, *Atmospheric Environment*, 43(1) (2009) 142-152.
- [2] A. Jakeman, R. Simpson, J. Taylor, Modeling distributions of air pollutant concentrations—III. The hybrid deterministic-statistical distribution approach, *Atmospheric Environment*, 22(1) (1988) 163-174.
- [3] J. Lents, M. Walsh, K. He, N. Davis, M. Osses, S. Tolvett, L. Hu, *Handbook of air quality management*, (2011).

- in Surface Contamination and Cleaning, Elsevier, 2012, pp. 81-105.
- [19] S. Morsi, A. Alexander, An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems, *Journal of Fluid Mechanics*, 55(2) (1972) 193-208.
- [20] Y. MENG, K. HIBI, Turbulent measurements of the flow field around a high-rise building, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1998(76) (1998) 55-64.
- [21] F. Mathey, D. Cokljat, J.P. Bertoglio, E. Sergent, Assessment of the vortex method for large eddy simulation inlet conditions, *Progress in Computational Fluid Dynamics: An International Journal*, 6(1-3) (2006) 58-67.
- [22] Tehran Air and Sound Quality Report in 1397" Presented by Air Quality Control Company, 1398, Report No. QM98 / 02/01 (U) / 1, Online Version on the Website: <http://air.tehran.ir>, (in Persian).
- air flows and dispersion of pollution within a neighbourhood, *Environmental Pollution*, 233 (2018) 782-796.
- [13] Y. Zhiyin, Large-eddy simulation: Past, present and the future, *Chinese journal of Aeronautics*, 28(1) (2015) 11-24.
- [14] S.M. Salim, S.C. Cheah, A. Chan, Numerical simulation of dispersion in urban street canyons with avenue-like tree plantings: comparison between RANS and LES, *Building & Environment*, 46(9) (2011) 1735-1746.
- [15] J. Hinze, *Turbulence*. ed. BJ Clark. 1975, in, New York, NY: McGraw-Hill Book Company.
- [16] J. Smagorinsky, General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment, *Monthly weather review*, 91(3) (1963) 99-164.
- [17] P. Saxena, S. Sonwani, *Primary criteria air pollutants: environmental health effects*, Springer, 2019.
- [18] G. Ahmadi, *Computational Fluid Dynamics of Particle Transport and Deposition*, in: *Developments*

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. K. Moayedi, V. Azaditalab, *Modeling of Turbulent Atmospheric Boundary Layer and Dispersion of Solid Pollutant Particles in an Urban Area Using Large Eddy Simulation*, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(5) (2021) 2839-2856.  
DOI: [10.22060/mej.2020.17685.6656](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17685.6656)

