



## شبیه‌سازی عددی جریان دو فازی ذرات معلق در هوا و مطالعه پیرامون رفتار ذرات گردوغبار تحت شرایط مختلف جوی و فرآیند رسوب ذرات گرد و غبار

محمد مهدی هاشمی پرینجی<sup>۱\*</sup>، محمد کاظم مؤیدی<sup>۲</sup> و احسان جباری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، بخش مهندسی عمران، دانشگاه قم

<sup>۲</sup> استادیار، آزمایشگاه پژوهشی دینامیک سیالات محاسباتی، بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه قم

<sup>۳</sup> استادیار، بخش مهندسی عمران، دانشگاه قم

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۹/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۱۹

### چکیده

حرکت توده ریزگردها، انتشار آلاینده‌ها و پیامدهای آن‌ها امروزه تبدیل به مسئله‌ای مهم در مباحث محیط زیست شده و بسیاری از فعالیت‌های پژوهشی و توسعه فناوری‌های صنعتی با محوریت این موضوع انجام می‌گیرد. در پژوهش حاضر ابتدا مروری اجمالی از وضعیت ریزگردها و معضلات زیست محیطی آن‌ها در کشور بیان شده و نحوه مدل‌سازی حرکت ریزگردها در محدوده دانشگاه قم با استفاده از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی تشریح گردیده است. سپس به نحوه تأثیر شرایط جوی و رسوب این ذرات در بخشی از دانشگاه قم و به صورت عددی پرداخته می‌شود. نتایج نشان داد که معماری ساختمان اثر قابل توجهی در توزیع ریزگردها در اطراف ساختمان دارد. سپس اثر جهت وزش باد بر توزیع ریزگردها بررسی شده است. در حالت قرارگیری ساختمان به صورتی که نیروی وارد بر آن کمینه باشد، میزان حبس ذره‌های ریزگرد کاهش چشمگیری می‌یابد. سپس اثر دما بر روی پراکنش ریزگردها مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر فصول مختلف بر پراکندگی ریزگردها بررسی شده است. در محوطه مرکزی ساختمان با در نظر گرفتن دما غلظت ذره‌های گردوغبار را تا نود درصد کاهش داده است. در بخش آخر تجمع ذره‌ها در سطح زمین بررسی گردیده و بر اساس نتایج، تأثیرپذیری انباشت ذره‌های گردوغبار از جهت باد در محوطه مرکزی ساختمان، مورد مطالعه قرار گرفته است.

**کلمات کلیدی:** رسوب ریزگرد؛ گردوغبار؛ محیط‌زیست؛ کانون فرسایش؛ آلاینده هوا؛ تخمین غلظت.

## Numerical Simulation of Two-Phase Flow and Study Behavior of Aerosols and Dust Particles Under Different Weather Conditions and Sedimentation Process of Dusts

M. M. Hashemi<sup>1,\*</sup>, M. K. Moayyedi<sup>2</sup>, E. Jabbari<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, University of Qom, Iran.

<sup>2</sup>CFD and Turbulence Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Qom, Iran.

### Abstract

Today, Moving the mass of dust, releasing pollutants and their consequences has become an important issue in environmental topics and many research and development activities focus on this issue. In the present study, expressed an overview of the status of dust and environmental problems in the country and described how to model the motion of dust in the range of University of Qom using computational fluid dynamics tools. Then it is said how are atmospheric conditions effect and the deposition of these particles on the part of the University of Qom numerically. The results showed that the building architecture has a significant effect on the distribution of dust concentration around the building. Then, the effects of wind direction are also studied. The trapped dust particles will be minimized for a specific angle between the wind and building directions. The effects of temperature gradient (daily and seasonal) on dust concentration are also studied and then the effects of various temperatures on the dust emission studied. It has been observed that considering the temperature variation in computational model leads to reduction of concentration of dust particles up to %90. Finally, accumulation of settled particles on the ground level was considered. The results proved the considerable influence of wind direction on accumulation of settled particles in the central yard of the building.

**Keywords:** Dust Deposition; Particles; Environmental; Erosion Centers; Air Pollution; Estimates of Concentration.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۵۳۷۷۴۵۳۱۱؛ فکس: ۰۲۵۳۷۷۴۵۳۱۱

آدرس پست الکترونیک: [hashemipar@gmail.com](mailto:hashemipar@gmail.com)

## ۱- مقدمه

با توجه به اینکه بیش از دو سوم مساحت کشومان در اقلیم خشک و نیمه خشک قرار گرفته و از سوی دیگر میانگین بارش سالیانه ایران، نصف میانگین بارش سالانه در جهان است، بیش از ۸۰ درصد استان های کشور در معرض وقوع بحران های ناشی از پدیده گرد و غبار در مقیاس های محلی، منطقه ای و جهانی قرار دارند. در این پژوهش به صورت اجمالی به پدیده ریزگردها و آثاری که بر محیط پیرامون می گذارند پرداخته شده است. در ابتدا معرفی و تعریف ریزگردها و ویژگی های آنها بیان و سپس فرآیند تشکیل و جابجایی آنها مطرح می شود. سپس استانداردهای آلودگی هوا در رابطه با ذرات معلق آورده شده است. سپس رخداد پدیده ریزگردها در ایران، شهر قم و استان خوزستان که بارها این پدیده را تجربه نموده مطرح می شود.

انجمن مهندسان آلودگی هوا و کنترل آن، آلودگی هوا را بصورت وجود یک یا چند آلاینده در اتمسفر مانند گردوغبار، فیومها، گازها و بخارات، بو و دود بطوریکه باعث آسیب و صدمه به انسان، حیوانات، گیاهان و یا مایملک شوند، تعریف می کند. حوادث طبیعی همیشه علت مستقیم ایجاد مقادیر آلاینده هوا می شود. برآورد شده است که کل آلودگی های هوای ناشی از فعالیت های انسان معادل مقدار آلاینده های منتشر شده از آتشفشان ها نمی باشد. گفته می شود اغلب تلاش های اساسی در دنیا از سال ۱۹۴۵ میلادی شروع شده است. در سال ۱۹۸۰ مقوله جدیدی بنام آلودگی جهانی هوا در عرصه آلودگی هوا ظهور کرد. تا قبل از این سال کنترل آلودگی هوا به صورت محلی تلقی می شد [۱]. آلاینده های هوا به دو گروه اصلی ذرات و گازها تقسیم می شوند. چون ذرات مرکب از مواد جامد و یا مایع هستند، بنابراین آلاینده های هوا در سه گروه کلی بر اساس قطر تقسیم می شوند.

## ۲- شناخت ریزگردها

گردوغبار ذراتی بسیار کوچک و سبک از جنس سیلت، رس و دیگر عناصر بوده که در هوا انتقال می یابند. نوع و ساختمان شیمیایی ذرات معلق در هوا مهمترین عامل در تعیین خطرات آن برای محیط زیست به ویژه سلامتی افراد محسوب می شود. ذرات گردوغبار با آلاینده های شهری ترکیب و تبدیل به ریزگرد (HAZE) می شوند که به دلیل آغشته شدن به

مواد آلی حالت چسبندگی پیدا کرده و به راحتی بر سطح اشیاء می چسبند و به این طریق می توانند سبب آلودگی و از کار افتادن وسایل و ابزار صنعتی و الکتریکی شده و همچنین شیوع بیماری های عفونی و آلرژیک را افزایش دهند و تاثیرات مخرب بر سلامت بشر، کشاورزی و محیط زیست داشته باشند [۲]. دو شاخص معروف برای کیفیت هوا وجود دارد. این شاخص ها عبارتند از: شاخص کیفیت هوا<sup>۱</sup> و شاخص استاندارد آلودگی<sup>۲</sup> [۳]. از سال ۱۹۹۰ با گسترش فناوری و گسترش گستره وسایل اندازه گیری ذرات، ذرات دیگری بنام PM10 از سوی US-EPA معرفی شد که شامل کلیه ذرات با قطر ائرودینامیکی کمتر از ۱۵ میکرون هستند. با ادامه این روند از سوی همین سازمان، در سال ۱۹۹۷ ذرات PM2.5 و PM1 گزارش شدند [۲].

## ۳- فرآیند تشکیل گرد و غبار

به علت فرسایش خاک و بسته به پوشش زمین و سرعت باد و اندازه ذرات خاک، مواد به روش غلتان، جهشی و معلق جابه جا می شوند. ذرات متوسط به صورت مجموعه ای از پرش ها به جلو حرکت می کنند، ذرات مذکور به هوا بلند شده و معمولاً چهار برابر ارتفاعی که به هوا بلند می شوند به جلو رانده می شوند. اما ذرات بسیار ریز مانند ذرات سیلت و رس به علت سبک بودن تا ارتفاع زیادی از سطح زمین بلند شده و مدت زیادی در هوا به صورت معلق باقی مانده و پس از مسافت طولانی فرو می نشینند [۴].

## ۴- استاندارد آلودگی هوا در رابطه با ریزگردها

به طور کلی می توان گفت تأثیر هر آلاینده بر سلامت انسان بستگی به غلظت و مدت زمان تماس دارد. به همین دلیل استاندارد کیفیت هوا به منظور مشخص ساختن حد بالای مواجهه، به طوری که آسیب جدی به بدن نرسد، تعریف می شود. برای محاسبه استاندارد کوتاه مدت آلاینده ها، از معیارهای سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا استفاده می شود. در جدول ۱ استاندارد هوای پاک ایران مشاهده می شود [۵].

<sup>1</sup> Air Quality Index (A.Q.I)

<sup>2</sup> Pollution Standard Index (P.S.I)

عمودی شده که این موضوع از اهمیت ویژه ای در حمل و نقل هوایی برخوردار است [۷].

کاهش دید تا ۵۰ متر و خسارت‌های محصولات کشاورزی در طی سالیان اخیر تشدید یافته‌است. ابتلا به انواع بیماری‌های قلبی، عروقی و تنفسی، آلرژی‌ها و... تأثیر گرد و غبار بر رشد جسمی و ضریب هوشی کودکان، اثر گرد و غبار بر سلامت روان افراد اختلال در حمل و نقل زمینی و هوایی، تعطیلی صنایع، خسارت محصولات کشاورزی، زراعی، باغی و دامی، تهدید اقتصاد مناطق روستایی به عنوان نقاط با آسیب پذیری بیشتر، مشکلات آموزشی از جمله مهمترین آسیب‌های این پدیده به‌شمار می‌رود. پدیده گرد و غبار می‌تواند دارای نقش مثبت به علت بلندکردن املاح و مواد معدنی خاک به درون جو و انتقال آنها به مناطق دیگر نیز باشد [۸].

ریزگردها تنها به سلامت انسانها زیان نرسانده بلکه مزارع، کشتزارها و باغات را نیز هدف گرفته و با گستردن لایه مخملی خاک رسی، مجال نفس کشیدن را از آنها گرفته و سبزی درخشان نباتات و رستنی‌ها را به زردی گرایانده است. ذرات ریزگردها این قابلیت را دارند که مانع از رسیدن نور خورشید و تابش مستقیم آن بر سطح زمین شوند. گیاه برای تولید گل، میوه و دانه به نور مستقیم خورشید نیاز داشته اما ریزگردها مانع از رسیدن نور مستقیم به گیاه می‌شوند. در نتیجه عمل فتوسنتز انجام نشده و باعث کاهش تولید محصول می‌شود.

نشستن ریزگردها روی برگ‌ها، که به انسداد روزنه‌های تنفسی منجر می‌شود، دیگر اثر مخرب گرد و غبار است. این عمل سبب می‌شود تا تبدلات گازی گیاه متوقف شده و علاوه بر اختلال در عمل فتوسنتز باعث بر هم خوردن توازن گازهای موجود می‌شود. کارشناسان کشاورزی به باغداران توصیه می‌کنند که برای مناطق با شدت کم ریزگردها، از سم‌پاش‌های زنبه‌ای استفاده نموده و درختان و مزارع خود را دو یا سه بار با آب شستشو دهند. برای مناطق با غبار شدید از همان روش اول اما با این تفاوت که به ازای هر تانکر آب یک هزار و ۲۰۰ لیتری، یک لیوان مایع ظرفشویی جهت زدودن ریزگردها اضافه می‌شود [۸] و [۹].

#### جدول ۱- استاندارد هوای پاک ایران در مورد ریزگردها

نوع آلاینده	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
ذرات معلق ( $\text{PM}_{10}$ ) متوسط سالانه	۵۰	۴۰	۲۰
ذرات معلق ( $\text{PM}_{10}$ ) حداکثر ۲۴ ساعته	۱۵۰	۹۰	۵۰
ذرات معلق ( $\text{PM}_{2.5}$ ) متوسط سالانه	۱۵۰	۱۲	۱۰
ذرات معلق ( $\text{PM}_{2.5}$ ) حداکثر ۲۴ ساعته	۳۰	۳۰	۲۵

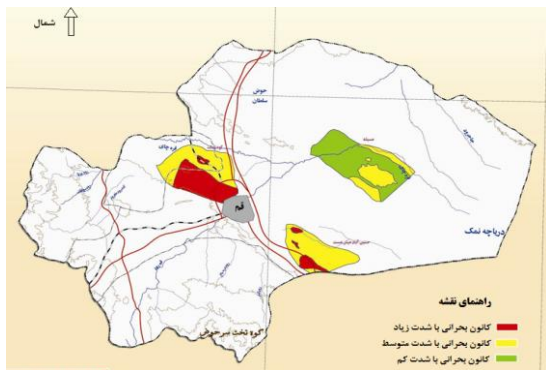
استاندارد دیگری که در ایران در مورد آلودگی ریزگردها وجود دارد شاخص استاندارد آلاینده است. در جدول ۲ مقادیر مجاز دامنه غلظت آلاینده‌های هوا را که از سازمان محیط زیست گرفته شده است را مشاهده می‌نمایید [۵].

#### جدول ۲- شاخص استاندارد آلاینده

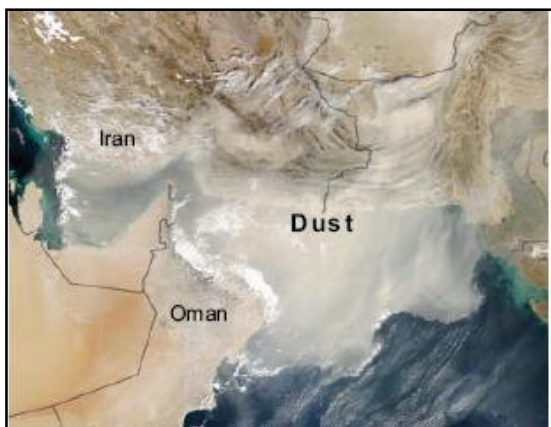
طبقه	خوب	سالم	ناسالم	بسیار ناسالم	خطرناک
PM10	۰-۵۰	۵۰-۱۵۰	۱۵۰-۳۵۰	۳۵۰-۴۲۰	۴۲۰>

#### ۵- اثرات ریزگردها

دو نوع آلاینده اصلی در ریزگردها تشخیص داده شده‌است. گونه اول فلزات سنگین شامل ترکیبات سرب و کادمیوم و گونه دوم شامل اجزای شیمیایی، فیزیکی و زیست‌شناختی است. معمولا خواستگاه ذرات  $\text{PM}_{10}$  را طبیعی و ذرات  $\text{PM}_{2.5}$  را انسان‌زاد یا دارای خواستگاه غیر طبیعی می‌دانند [۲]. اندازه‌گیری‌های متعدد از ایستگاه‌های زمینی و ماهواره‌ای نشان می‌دهد که این ریزدانه‌ها برای مدت زمان بسیار زیادی در طبیعت باقی مانده و می‌توانند به وسیله باد صدها کیلومتر از مبدا تولیدی خود دورتر شوند. به تعبیر دیگر هوایی که در یک کشور تنفس می‌شود به میزان بسیار زیادی تحت تأثیر فعالیت‌های صنعتی کشورهای دیگر است [۶]. علاوه بر این، گرد و غبار منتشره در جو و محیط اطراف می‌تواند منجر به کاهش دید افقی و حتی در مواردی دید



شکل ۲- کانون‌های فرسایش بادی استان قم



شکل ۳- تصاویر ماهواره‌ی مدیس

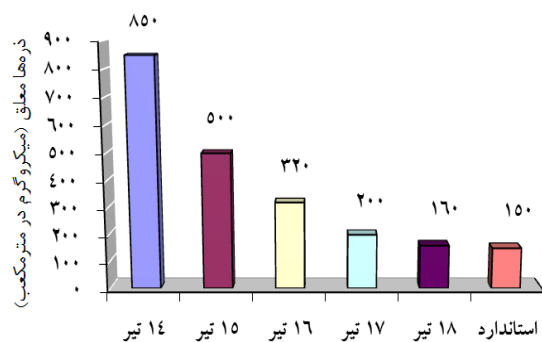
امیرعبدالله لواسانی و همکاران به بررسی حرکت ذرات شن در سیال با استفاده از نرم‌افزار فلونت به صورت دو بعدی پرداخته و برای تخلخل‌های ۵۰ درصد و ۲۰ درصد مزایای استفاده از فیلتر را با استفاده از نحوه‌ی حرکت ذرات و روش لاگرانژی و تزریق ذرات به محیط پیوسته بررسی کرده‌اند. استفاده از فیلتر باعث تغییر جهت ذرات شن شده، به نحوی که ذرات به صورت منظم تری حرکت نموده و در نزدیکی دیواره بیشتر ته‌نشین می‌شوند [۱۳].

مؤیدی و بشردوست بلندشدن ذرات ریز آهن را از پشته‌های انباشت مواد اولیه مطالعه نموده و نقش هندسه و چینش پشته (ها) را در میزان بادبردگی با استفاده از مدل سازی سه بعدی در نرم‌افزار فلونت بررسی نموده‌اند [۱۴].

ترکیان و همکاران پاشش مواد افزودنی بر روی پشته‌ی سنگ آهن و تاثیر آن در میزان بادبردگی را با استفاده از تونل باد بررسی کرده‌اند [۱۵].

## ۶- تاریخچه

امروزه بررسی رفتار ریزگردها از نقطه نظر علم محیط‌زیست اهمیت پیدا کرده‌است. آلاینده ذرات معلق با اندازه کمتر از ۱۰ میکرون به صورت روزانه و ساعتی اندازه‌گیری می‌شود. پدیده‌ی ریزگرد بارها در شهرهای کشور رخ داده‌است. شهر قم نیز از این پدیده مستثنی نبوده و در تیرماه سال ۱۳۸۸ این پدیده رخ داده و حداقل تا شش روز ادامه داشت. در شکل ۱ نمودار روند کاهشی آلودگی ذره‌های معلق محیطی تا رسیدن به میزان استاندارد مشاهده می‌شود [۱۰].



شکل ۱- روند کاهش ذره‌های معلق از شروع دوره خطر تا رسیدن به استاندارد حداکثر ۲۴ ساعته  $PM_{10}$  در شهر قم

از علت‌های طبیعی وقوع این پدیده کانون‌های فرسایش بادی استان قم ذکر می‌گردد (شکل ۲). از دیگر معضلات شهر نیمه کویری قم، انباشت گرد و غبار در منطقه‌های مختلف است. کانون‌های فرسایش بادی استان قم شامل دشت و تالاب‌های استان می‌شود. دشت استان شامل دشت بزرگ مسیله، بزرگترین کانون القای ریزگرد و نزدیکترین کانون فعال به استان‌های تهران، البرز، قم، اصفهان، سمنان و مرکزی، می‌شود. تالاب‌های استان قم نیز شامل دریاچه نمک که در انتهای حوزه آبخیز هفت استان کشور شامل تهران، قم، البرز، قزوین، همدان، مرکزی و اصفهان قرار گرفته و تالاب‌های اقماری دریاچه نمک شامل تالاب شکار ممنوع حوض سلطان، تالاب مره، تالاب غدیر و آبگیر بهشت معصومه می‌باشد [۱۱].

در سالیان اخیر برخی به نحوه‌ی حرکت طوفان‌های گردوغباری با استفاده از نقشه‌های ماهواره‌ای پرداخته‌اند (شکل ۳) [۱۲].

دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> است. دینامیک سیالات محاسباتی عبارت است از تحلیل سیستم‌های شامل جریان سیال، انتقال حرارت و پدیده‌های همراه نظیر انتقال جرم و واکنش‌های شیمیایی، بر اساس شبیه‌سازی کامپیوتری [۲۲]. در پژوهش حاضر برای بررسی تاثیر معماری ساختمان بر مقدار ریزگردها، از روش شبیه‌سازی عددی یا به عبارتی دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده‌است.

در این مقاله سعی شده تا رفتار ریزگردها را در منطقه مشخصی، مستقر در فضای دانشگاه قم مورد بررسی قرار گیرد. ریزگردها ذرات عموماً جامد و بعضاً مایع با اندازه بسیار کوچک بوده و در سه اندازه‌ی شناخته شده‌ی ۱، ۲/۵ و ۱۰ میکرون دسته‌بندی می‌شوند. ریزگردها غالباً از اسیدها، فلزات و گردوغبار تشکیل می‌شوند. در این پژوهش هدف مطالعه‌ی ذرات گردوغبار آهکی بوده است. سوال اصلی مورد چالش این است که شرایط محیطی و معماری ساختمان چه اثری روی توزیع ریزگردها در محدوده‌ی مورد بررسی دارد. سپس با در نظر گرفتن این موارد چند هندسه‌ی مختلف طراحی شده، شرایط مرزی مناسب برای آنها تعریف و روش حل عددی سازگار با مسئله انتخاب شده‌است. در این خصوص در ادامه توضیحات بیشتر ارائه خواهد شد.

## ۷- معادلات حاکم

برای تحلیل جریان در محیط مسئله از فرض جریان تراکم ناپذیر استفاده شده، در این حالت معادلات بدون بعد پیوستگی و اندازه حرکت به صورت زیر می‌باشند [۱۴]:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} \quad (1)$$

به طوری که  $u$  بردار سرعت،  $P$  فشار و  $Re$  عدد رینولدز است.

### ۷-۱- معادلات آشفتگی

برای مدل‌سازی اثرات آشفتگی میدان جریان سیال و در نتیجه تاثیرات آن در نحوه‌ی پخش ذرات در اطراف ساختمان، از مدل آشفتگی کا-امگا-اساس‌تی<sup>۲</sup> استفاده شده‌است. این مدل یک الگوی متداول دو معادله‌ای لزجت-گردایی بوده که

قمی و قدیمی آلاینده‌های عناصر سنگین موجود در ریزگردهای شهر اراک را بررسی نموده و نشان داده‌اند که از ۲۹ محلی که اندازه‌گیری‌ها انجام گرفته هر یک چه غلظتی از عناصر را دارند و چه مقدار از ریزگردها منشأ طبیعی دارند و چه مقدار انسانی‌اند [۱۶]. همتی و رحیمی توزیع مکانی عناصر سنگین (فلزات) حاصل از ریزگردها را در شهر همدان بررسی نموده‌اند. یکی از نتایج این پژوهش نشان داد در مناطق پر ترافیک و صنعتی شهر همدان میزان عناصر سنگین زیاده‌تر و در پارک‌ها عناصر سنگین موجود در ریزگردها کمتر است [۱۷]. رفیعی و همکاران به چگونگی میانگین تغییرات ماهانه غلظت  $PM_{10}$  (ذرات با قطر ۱۰ میکرون و کمتر) در فصول زمستان و تابستان پرداخته و تاثیر سرعت باد بر روی تغییر غلظت ریزگردها در شهر اهواز (اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های سازمان محیط زیست) را با استفاده از روش‌های آماری مورد مطالعه قرار داده‌اند. یکی از نتایجی که آنها گرفته‌اند این است که به علت افزایش سرعت باد در فصل تابستان گرد و غبار از نواحی دوردست وارد شهر اهواز شده و این امر باعث افزایش غلظت این آلاینده با شروع دوره گرم می‌شود [۱۸].

ژانگ و همکاران انتشار ریزگردها را در میدان سرعت باد مطالعه نموده و از برنامه‌ای متن باز با نام CFD-WEM استفاده کرده‌اند. نتایج شامل خطوط هم‌تراز سرعت از سه برنامه‌ی مختلف بوده و آن را با نتایج مدل ساخته شده در تونل باد مقایسه کرده و نشان داده‌اند که از میان این سه برنامه، CFD-WEM سرعت محاسبه‌ی بیشتری دارد [۱۹]. هونگ و همکاران میزان بلند شدن ریزگردها از سطوح دارای پتانسیل را به کمک آزمایش در تونل باد مطالعه نموده و نتایج آن را با مقادیر پیش بینی شده از نرم افزار فلوئنت مقایسه کرده‌اند. آنها سپس برای منطقه مشخصی میزان تولید گرد و خاک را برای وزش باد از چهار جهت اصلی (شمالی، جنوبی، شرقی، غربی) پیش بینی نموده‌اند [۲۰]. لیو و همکاران از روش ترکیبی CFD-DEM برای پخش ماده در هندسه‌های پیچیده استفاده کرده‌اند. در این پژوهش اندرکنش گاز و ذرات جامد مدل شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌است [۲۱].

یکی از راه‌های پیش بینی رفتار دینامیکی و تغییرات غلظت آلاینده‌ها یا ذرات گرد و غبار، روش‌های عددی یا

<sup>1</sup> Computational Fluid Dynamics (CFD)

<sup>2</sup> K- $\omega$ -Shear Stress Transport (SST)

نیروهای ناشی از گرادیان فشار، متأثر از ساختارهای آشفته، نیروی سافمن و ناشی از تغییرات دما در نظر گرفته شده‌است. به منظور مدل‌سازی تغییرات دما در میدان جریان از معادله انرژی جریان تراکم‌ناپذیر استفاده شده که در فرم بی‌بعد به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)T = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \nabla^2 T \quad (۴)$$

در معادله فوق، Pr عدد پرائنتل بوده که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (۵)$$

که در آن  $\nu$  لزجت سینماتیکی و  $\alpha$  ضریب نفوذ گرمایی است.

### ۸- هندسه، شرایط مرزی و روش حل عددی

جهت ایجاد مدل محاسباتی، ابتدا مدل هندسی مورد نظر ساخته شده و سپس فرایند تحلیل بر روی آن انجام می‌گیرد. اطلاعات ورودی که از هواشناسی و آمارهای دیگر بدست آمده، در معرفی شرایط مرزی بکار گرفته شده‌اند. در نهایت برنامه اجرا، و اطلاعات مورد نیاز از آن استخراج شده و سپس تحلیل‌های آماری موردنظر با این نتایج انجام می‌شود. برای مدل کردن این مساله با روش حجم محدود نیاز به هندسه‌ای مناسب و فواصل متناسبی برای اعمال شرایط مرزی می‌باشد. هندسه‌ی مدل، شرایط مرزی و کیفیت شبکه تولید شده نقش به‌سزایی در حل و به دست آوردن نتایج درست دارند. در شکل ۴ مقطعی از شبکه تولیدشده نشان داده شده است.

از میان چندین شبکه محاسباتی تولیدشده، بهترین آنها برای محاسبات بعدی انتخاب شده‌است. انتخاب محیط پیرامونی به گونه‌ای بود که در آن، اثر گردابه‌های ثانویه در اطراف دیواره‌ها در نظر گرفته شده و بنابراین فضای اطراف از ابعاد مشخصی نباید کوچکتر باشد. با این شرایط سعی بر آن بوده تا محیطی در نظر گرفته شود که کمترین ابعاد مطلوب را داشته باشد.

از آنجا که چشمه ورود ریزگردها در نقاط شرط مرزی ورودی تعریف شده، تعداد نقاط ورودی غیر قابل انتخاب بوده و شرایط مسئله مقدار مشخصی را دیکته می‌کند. از طرفی نسبت تراکم نقاط شبکه به صورت ناگهانی نبایستی تغییر کند، در مدل‌سازی‌ها تعداد نقاط شبکه از مقدار

می‌تواند به عنوان یک مدل آشفته‌گی رینولدز پایین بدون هیچ گونه تابع میرایی اضافی مورد استفاده قرار گیرد. مدل کا-امگا-اساس‌تی در جریان آزاد رفتاری شبیه به مدل کا-اپسیلون داشته و عملکرد بهتری نسبت به خواص آشفته‌گی جریان آزاد ورودی دارد. معادلات این مدل برای یک جریان تراکم‌ناپذیر به صورت زیر می‌باشد [۲۳]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)k &= P - \beta^* \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\omega &= \frac{\gamma}{\nu_T} P - \beta^* \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right\} \\ &\quad + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_\omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \\ \mu_t &= \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \end{aligned} \quad (۲)$$

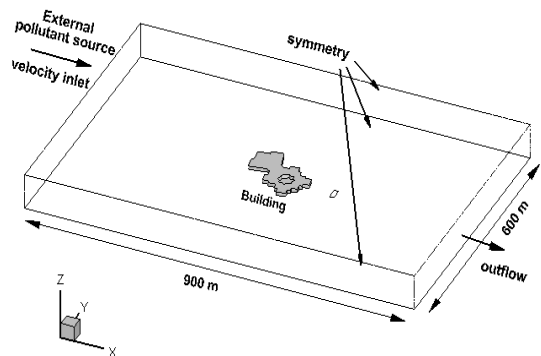
یک رویکرد مهم در نتایج این پژوهش، اثرات جریان سیال بر حرکت ریزگردها بوده که تحت تأثیر تغییرات سرعت و فشار سیال حرکت می‌کنند. الگوی مورد استفاده مبتنی بر یک رویکرد اوپلری- لاگرانژی بوده که در آن فاز گسسته (ریزگردها) در دستگاه مختصات لاگرانژی و در بستری از فاز پیوسته (با دستگاه مختصات اوپلری) مدل می‌شود. حرکت ذرات به کمک حل معادله‌ی تعادل نیروها بر روی یک ذره تخمین زده می‌شود. در واقع این تعادل نیرویی، میان اینرسی ذره، نیروی پسا و بویانسی وارد بر آن و هر نیروی اضافی دیگر بوده و به صورت زیر نوشته شود [۱۴]:

$$\begin{aligned} \frac{du_p}{dt} &= F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_{th} + a, \\ F_D &= \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24}, \\ Re &= \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \\ F_{th} &= - \frac{6\pi D_p \mu^2 C_s (K + C_t K_n)}{\rho M_p T (1 + 3C_m K_n)(1 + 2K + 2C_t K_n)} \nabla T \end{aligned} \quad (۳)$$

در این روابط  $F_D$  نیروی پسا بر واحد جرم ذره،  $F_{th}$  نیروی همرفتی (ترموپورتیک) وارد بر ذره،  $a$  شتاب ناشی از هر نیروی اضافی و  $Re$  عدد رینولدز است. در این پژوهش

۸-۱- شرایط مرزی

در شکل ۶ شمای کلی از حجم کنترل مفروض و شرایط مرزی تعریف شده بر وجوه آن مشاهده می‌شود. در تعریف مقادیر در برخی مرزها (ورودی) از اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه استفاده شده‌است.



شکل ۶- شمای سه‌بعدی از حجم کنترل مفروض و شرایط مرزی تعریف‌شده بر وجوه آن

در این مدل‌سازی بزرگی سرعت باد به میزان یک متر بر ثانیه و جهت آن به صورت غربی- شرقی در نظر گرفته شده است.

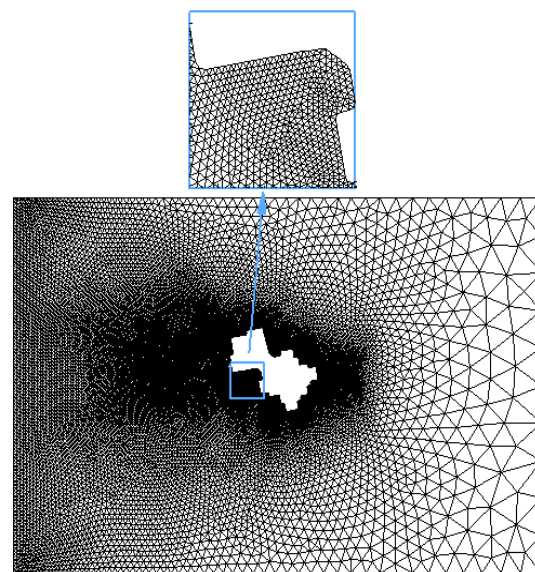
۸-۲- روش حل عددی

به منظور حل مسئله از روش سیمپل<sup>۱</sup> با دقت مرتبه دوم<sup>۲</sup> برای حل میدان فشار و سرعت استفاده شده‌است. همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد شبیه‌سازی دینامیک جریان سیال به با دیدگاه اولبری انجام و برای مدل‌سازی حرکت و توزیع ذرات گردوغبار الگوی فاز گسسته (مدل لاگرانژی) به کار برده شده است. به منظور محاسبه اثرات آشفته‌گی میدان جریان سیال از مدل آشفته‌گی  $k-\omega-SST$  و با تصحیح انحنای هندسی<sup>۳</sup> کمک گرفته شده‌است. به منظور تنظیم شرایط مربوط به مدل فاز گسسته نیاز به تعریف ویژگی‌های ذرات جامد (ریزگردها) بوده که این مشخصات در جدول ۳ مشخصات آمده است.

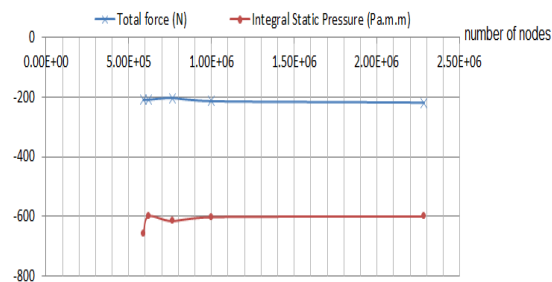
<sup>1</sup> Simple Method  
<sup>2</sup> Double Precision  
<sup>3</sup> Curvature Correction

۵۸۷۷۰۵ تا سه میلیون گره متغییر بوده که مدل‌سازی ۷۶۳۳۹۵ گره‌ای مناسب تشخیص داده شده و تعداد نقاط شبکه برای سایر مدل‌سازی‌ها نزدیک به این مقدار و بیشتر از آن است.

در شکل ۵ مقادیر نیروی کل و مجموع فشار استاتیکی وارد بر ساختمان بر حسب تعداد گره‌ها مشاهده می‌شود. همگرایی حل از مقایسه مقادیر به ازای شبکه‌های ریزتر و افقی شدن خط پارامترها قابل تحقیق است.



شکل ۴- مقطعی از شبکه شش وجهی تولید شده (پلان)



شکل ۵- مقادیر نیروی کل و مجموع فشار استاتیکی وارد بر ساختمان بر حسب تعداد گره‌ها

در فرآیند شبیه‌سازی مسئله، ابتدا چند هندسه‌ی مختلف طراحی شده، شرایط مرزی مناسب روی آنها تعریف و روش حل عددی سازگار با مسئله انتخاب شده‌است. در این خصوص در ادامه توضیحات بیشتر ارائه خواهد شد.

### ۹- نتایج

نتایج این پژوهش به پنج دسته کلی اثر هندسه ساختمان بر توزیع ریزگردها، تاثیر جهت باد بر ریزگردها، بررسی اثر تغییرات دمایی، تاثیرات فصول مختلف بر توزیع ریزگردها و مکان تجمع و رسوب ذرات در سطح زمین تقسیم می‌شود.

جدول ۳- مشخصات ریزگردها

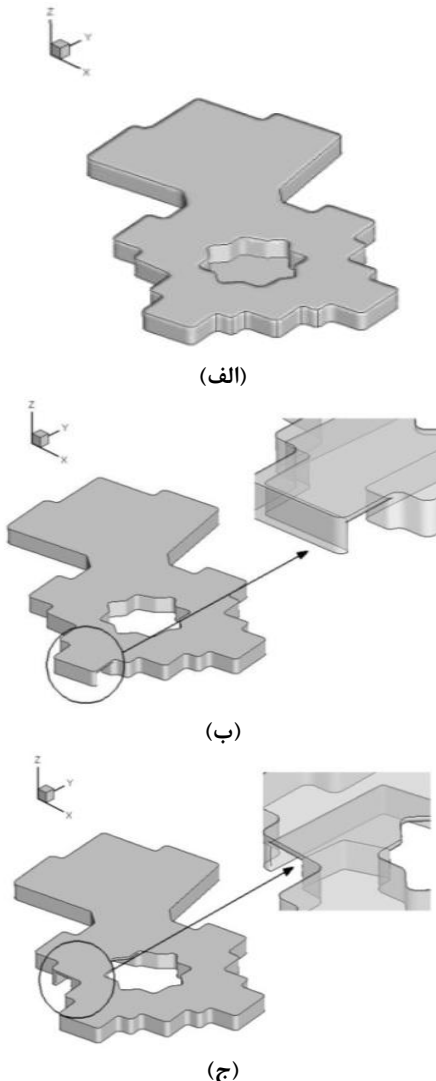
ویژگی	بررسی محلی ریزگردها	سایر مدل‌ها
شکل	کروی	کروی
قطر (میکرون)	۱۰	۱
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	۳۳۲۰	۳۳۲۰
تعداد کل (ذره)	۱۹۲۶۰۰	۷۸۲۰۰

### ۹-۱- تاثیر هندسه

برای بررسی اثر هندسه‌ی ورودی ساختمان در توزیع ریزگردها سه معماری مختلف طراحی شده‌است. برای همه مدل‌ها، شرایط مرزی یکسان ولی هندسه‌های ورودی ساختمان متفاوت می‌باشند. در معماری اول، هندسه‌ی ساختمان (مطابق شکل ۷ الف)) بدون ورودی است. برای معماری دوم (مطابق شکل ۷ ب)) ورودی در ضلع شرقی قرار داشته و در معماری سوم (مطابق شکل ۷ ج)) ورودی در جهت جنوبی قرار گرفته است. قرارگیری ورودی در حالت (ج) مطابق واقعیت موجود ساختمان است. الگوی جریان در نزدیکی ورودی مدل‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. همانطور که در شکل ۸ الف) مشاهده می‌شود در مدل شماره ۱، بیشترین ساختارهای چرخشی (گردابه‌ها) در مکان‌هایی که با دایره نشان داده شده، وجود دارند.

دایره‌های ۱ و ۲ مکان گردابه‌هایی را نشان می‌دهد که در سایر مدل‌ها نیز وجود دارد. در مدل شماره ۲ محل تشکیل گردابه‌ی سوم تغییر یافته و در مدل شماره ۳ علاوه بر تغییر اندک مکان گردابه سوم، اندازه‌ی گردابه دوم نیز کوچک‌تر شده‌است (مطابق شکل ۸ ب و ج)).

با توجه به شکل ۸ می‌توان انتظار داشت که توزیع غلظت ریزگردها با توجه به شکل هندسه‌ی ساختمان و محل قرارگیری ورودی متفاوت باشد. به منظور مقایسه توزیع ذره‌ها در مدل‌های مختلف، نمودار غلظت ریزگردها در



شکل ۷- ساختار هندسه‌ی معماری‌های ساختمان مورد نظر، الف) معماری شماره یک (بدون در ورودی)، ب) معماری شماره دو (ورودی در ضلع شرقی) و ج) معماری شماره سه (ورودی در ضلع جنوبی)

ارتفاع‌های یکسان رسم شده‌است (شکل ۹). از نظر فیزیکی با نزدیک شدن هرچه بیش‌تر به سطح زمین، تغییر هندسه اثر بیشتری بر سرعت جریان در ناحیه‌ی لایه مرزی داشته لذا این تغییرات بر رفتار دینامیکی ریزگردها در ارتفاعات کم، اثر بیشتری می‌گذارد. در نتیجه تغییرات غلظت ریزگردها نوسان‌هایی با دامنه‌ی بزرگتر در ارتفاع‌های پایین‌تر خواهد داشت. با توجه به شکل ۹ ج و د) تفاوت رفتار و غلظت



ریزگردها در معماری بدون ورودی با دو معماری دیگر مشهود است. دلیل این تفاوت تشکیل گردابه‌های حاصل از وجود ورودی‌ها می‌تواند باشد.

### ۲-۹- تاثیر جهت وزش باد در توزیع ریزگردها

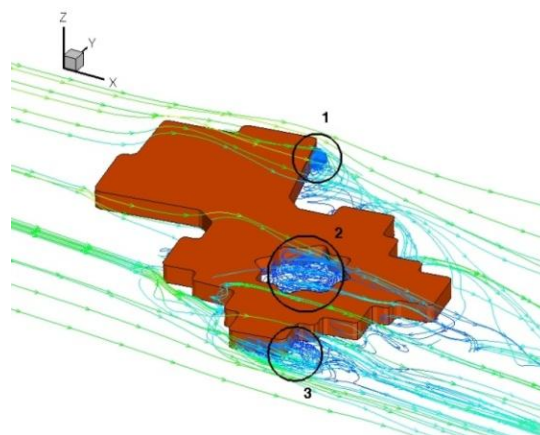
با هدف بررسی تاثیر جهت وزش باد در پراکندگی ذره‌های معلق در اطراف ساختمان، زاویه وزش باد سی درجه ساعتگرد تغییر داده و معماری جدیدی (شکل ۱۰) ساخته شد. در معماری جدید تمام شرایط اولیه و مرزی مشابه معماری اول (بدون درب ورودی) در نظر گرفته شده‌است.

نتایج غلظت ذره‌های آلاینده مشابه حالت‌های گذشته پس از اجرای مدل‌سازی بدست آمد. در شکل ۱۱ میزان آلاینده در حجم وسط ساختمان (شانزده ضلعی واقع در محوطه مرکزی در شکل ۱۰) با حالت قبل از دوران جهت باد (معماری اول) مقایسه شده‌است.

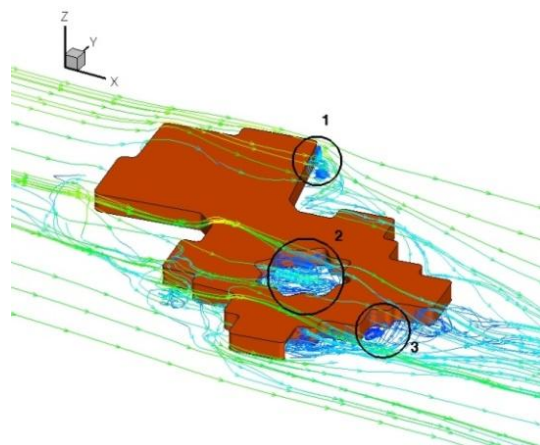
همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود با وزیدن باد در جهتی که نیروی وارد بر ساختمان در آن جهت کمینه است، حبس ذره‌های گردوغبار به مراتب کاهش یافته‌است. به عبارت دیگر می‌توان گفت در حالتی که کاهش سرعت باد با برخورد به ساختمان کم‌تر کاهش یابد، توانایی حمل ذره‌ها توسط باد بیش‌تر شده و انتظار می‌رود حبس ذره‌ها در قسمت‌های کنج و گوشه‌ها کم‌تر باشد.

### ۳-۹- تغییرات دما بر توزیع ریزگردها

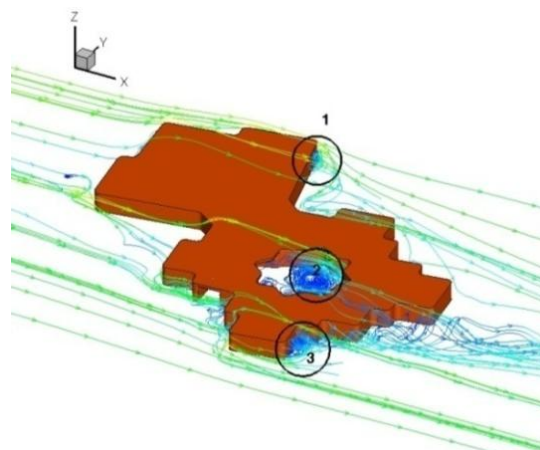
در این حالت با حل معادله‌ی انرژی علاوه بر معادلات دیگر، میدان جریان شبیه‌سازی شده و پخش ذرات گسسته در این محیط انجام گرفته‌است. برای شرایط مسئله موردنظر در این پژوهش، معادله انرژی مستقل از معادله اندازه حرکت، با در نظر گرفتن مقادیر سرعت محاسبه شده از این معادله و در هر گام به صورت مجموعه معادلات با پارامترهایی معلوم از گام قبلی حل می‌شود. در این حالت نیز نتایج غلظت در محوطه مرکزی ساختمان بر حسب زمان محاسبه شده و در شکل ۱۲ این نتایج با داده‌های بدست آمده بدون احتساب تغییرات دمایی مقایسه شده‌است. لازم به ذکر است که این حالت دمایی، در زمان‌های نزدیک به غروب خورشید رخ خواهد داد. از آنجا که به طور طبیعی، با افزایش ارتفاع، دمای هوا کاهش یافته، این حالت گرادیان معکوس دمایی نامیده



(الف)



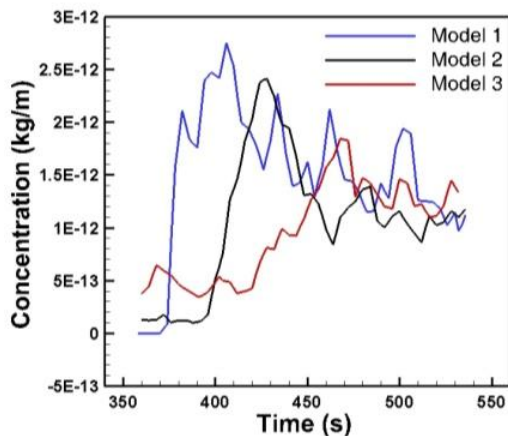
(ب)



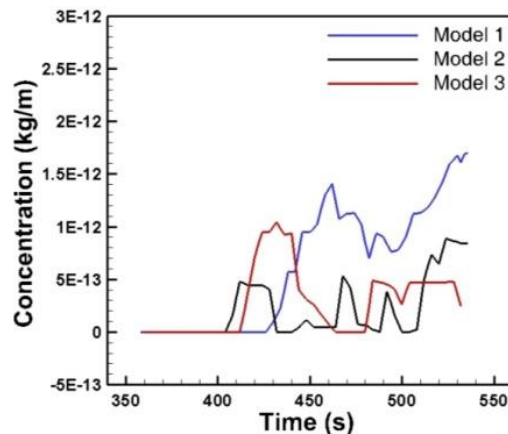
(ج)

Velocity Magnitude: 0.1 0.3 0.5 0.7 0.9 1.1 1.3 1.5

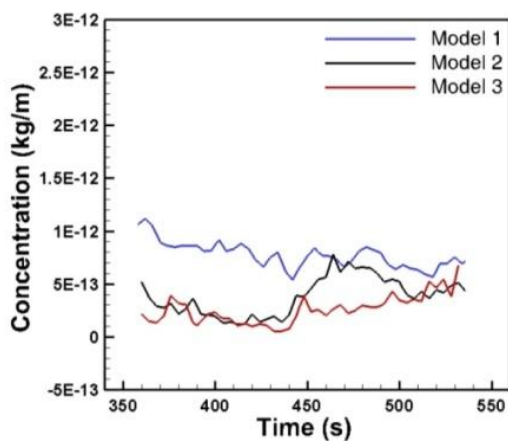
شکل ۸- خطوط جریان در اطراف ساختمان در سه مدل مختلف، رنگی شده با اندازه‌ی سرعت (متر بر ثانیه)؛ (الف) مدل‌سازی اول، (ب) مدل‌سازی دوم و (ج) مدل‌سازی سوم



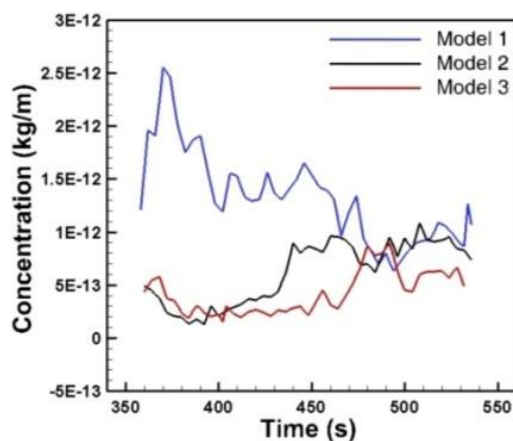
(ب)



(الف)

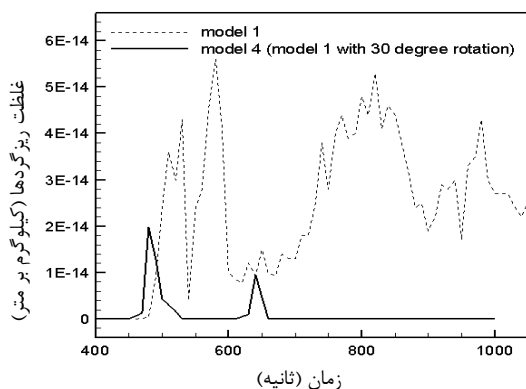


(د)

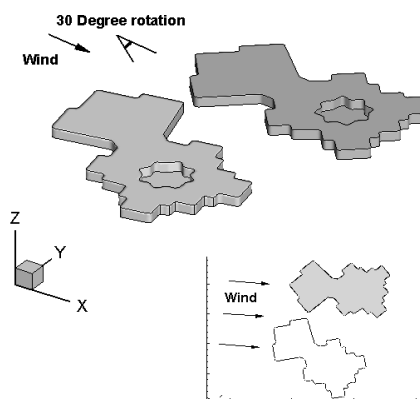


(ج)

شکل ۹- غلظت ریزگردها در سطح تعریف شده برحسب ارتفاع؛ الف) غلظت در  $Z=0$  m، ب) غلظت در  $Z=1$  m، ج) غلظت در  $Z=2$  m و د) غلظت در  $Z=3$  m



شکل ۱۱- مقایسه مقادیر حبس ذره‌های گردوغبار در محوطه مرکزی با تغییر جهت باد



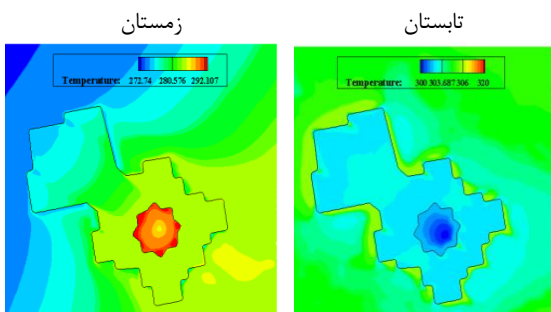
شکل ۱۰- تغییر زاویه وزش باد به میزان سی درجه ساعتگرد

خروج ذرات از حفره میانی بر حسب زمان بدست آورده شده است.

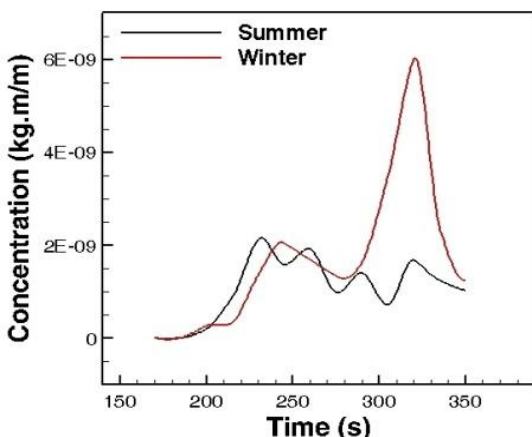
در شکل ۱۴ تغییرات غلظت ریزگردهای خارج شده بر حسب زمان و تا شش دقیقه پس از برخاست ذرات از محوطه نشان داده شده است. نتایج حاکی از تفاوت قابل ملاحظه ذرات خارج شده از محوطه مرکزی در دو فصل یاد شده می باشد. در جدول ۳ مقادیر تجمعی کل ذرات خارج شده از محیط مرکزی ساختمان پس از گذشت شش دقیقه مشاهده می شود.

جدول ۳- حداکثر و حداقل دمای استان قم و مقادیر تجمعی خروج ذرات از حفره میانی

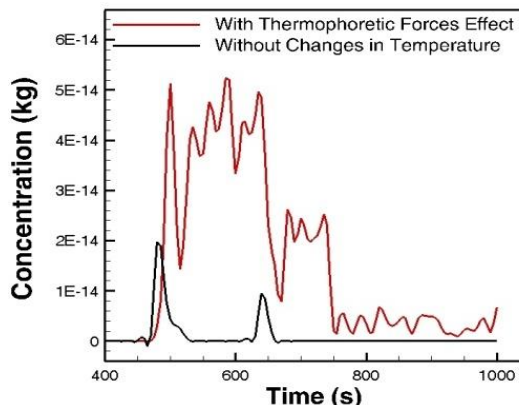
زمستان	تابستان	فصل
-۱۲	۴۶	حداکثر و حداقل دما
$2/173 \times 10^{-8}$	$1/372 \times 10^{-8}$	میزان ریزگرد خارج شده پس از ۶ دقیقه



شکل ۱۳- خطوط هم دما در فصل زمستان و تابستان



شکل ۱۴- نرخ خروج ذرات از حفره میانی



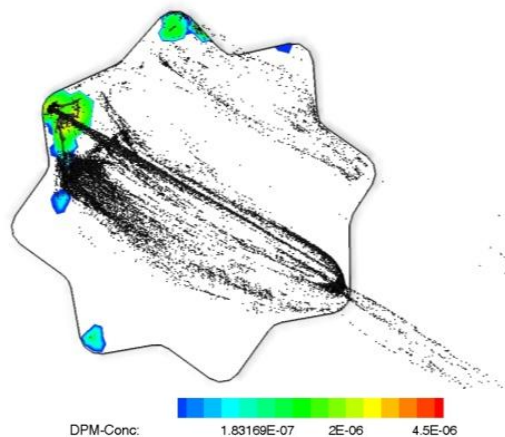
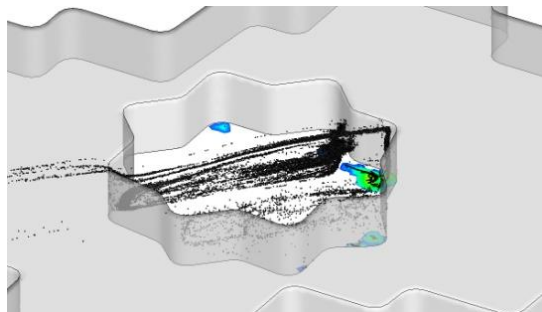
شکل ۱۲- مقایسه توزیع ریزگردها با در نظر گرفتن تفاوت دمایی

می شود. پس در گرادیان دمایی معکوس در محوطه ی بسته، میزان ورود ذرات گرد و غبار افزایش خواهد داشت. همچنین انتظار می رود که در این حالت میزان به دام افتادن ذرات در این محوطه نیز بیشتر باشد. از نظر فیزیکی نیروی وارد بر ذره ناشی از دمای آن، وقتی گرادیان معکوس دمایی وجود دارد رو به پایین بوده، لذا معادل حالتی است که ذره سنگین تر بوده و گرادیان دمایی وجود نداشته باشد. با فرض افزایش وزن ذرات می توان توجیه نمود که تجمع ذرات در محوطه مرکزی بیشتر باشد.

#### ۹-۴- بررسی تفاوت دمایی فصول و تاثیر آن در توزیع ریزگردها

متوسط دمای هوای قم در تابستان و در زمستان به صورتی که بیشترین اختلاف درجه حرارت را داشته باشند، برای بررسی تفاوت دمایی فصول مختلف در توزیع ریزگردها انتخاب شده است. در شکل ۱۳ خطوط هم دما در دو فصل مختلف مشاهده می شود. برای شبیه سازی دما در مدل از مقادیر جدول مقررات ملی ساختمان به منظور بدست آوردن پارامترهای انتقال حرارت برای ساختمان و محیط اطراف (شامل آسفالت، خاک و ...) استفاده شده است. دمای هوای ورودی معادل مقادیر حداکثر و حداقل دما در منطقه تعریف شده و جریان به صورت متغیر با زمان مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می دهند رفتار پخش شدن ذرات پس از خروج از محوطه مرکزی در دو فصل مختلف متفاوت می باشد. به منظور کمی سازی مشاهدات فوق نرخ

نتوانسته‌اند سوار بر جریان مانده و رسوب نموده‌اند. نتایج نشان می‌دهند بیشتر تجمع و رسوب ذرات آهکی در گوشه های محوطه مرکزی ساختمان کتابخانه و نیز متاثر از جهت وزش باد است.



شکل ۱۶- مکان تجمع ذرات در سطح زمین

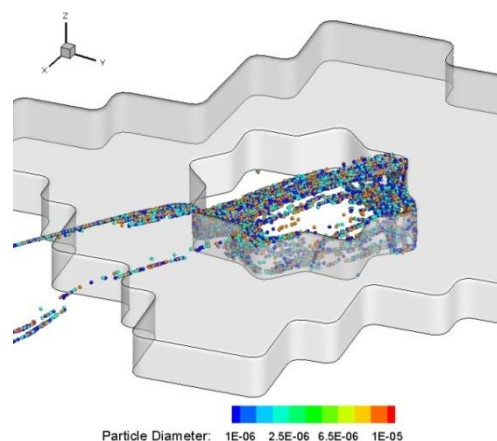
#### ۱۰- بحث و نتیجه گیری

پژوهش حاضر شامل مروری از وضعیت ریزگردها در کشور بوده و معضلات زیست محیطی آنها را اجمالا بیان نموده‌است. همانطور که پیش‌تر اشاره شد توزیع غلظت ریزگردها با توجه به شکل هندسی ساختمان و محل قرار گیری ورودی متفاوت است. با نزدیک شدن هرچه بیشتر به سطح زمین تغییر هندسه اثر بیشتری بر سرعت جریان در ناحیه لایه مرزی داشته بنابراین تغییرات غلظت ریزگردها نوسان‌هایی با دامنه‌ی بزرگتر در ارتفاع‌های پایین‌تر خواهد داشت. نتایج نشان دادند با وزش باد در جهتی که نیروی وارد بر ساختمان در آن جهت کمینه است، حبس ذره‌های گردوغبار بیشتر کاهش یافته است. نتایج بیان می‌کنند که در گرایان دمایی

همانطور که مقادیر نشان می‌دهند میزان خروج ذرات از محوطه مرکزی در فصل زمستان ۳۷ درصد بیش از فصل تابستان است. لازم به ذکر است در بررسی اخیر اثر پارامتر رطوبت که در دو فصل گرم و سرد متفاوت می‌باشد، در نظر گرفته نشده و تنها تغییرات دمایی بررسی شده‌است.

#### ۹-۵- مکان تجمع ذرات در سطح زمین

در مدل‌سازی انجام‌شده، میزان تجمع ذرات در محوطه مرکزی ساختمان مورد بررسی قرار گرفته‌است. هندسه محوطه مرکزی در این حالت بسیار شبیه به مسئله معروف حفرة دارای مرز متحرک<sup>۱</sup> است [۲۴ و ۲۵]. در شکل ۱۵ محوطه مرکزی ساختمان به همراه ریزگردها با سه قطر مختلف در آن نشان داده شده است.



شکل ۱۵- نمایش ریزگردها بر اساس قطر در محوطه مرکزی ساختمان

در شکل ۱۶ نمای سه‌بعدی و دوبعدی از حرکت (برخاست) ریزگردها از محوطه مرکزی ساختمان ملاحظه می‌شود. در این شکل جهت وزش باد از سمت راست به چپ بوده و همانطور که مشاهده می‌شود ریزگردها مسیر بسته‌ای ایجاد نموده که بردار نرمال آن تقریباً عمود بر جهت وزش باد است. در این شکل، کف محوطه مرکزی و مکان‌هایی که ریزگردها در آن تجمع نموده‌اند، مشاهده می‌شود. در واقع پس از گذشت مدت زمان شش دقیقه، بخشی از ذرات

<sup>۱</sup> Lid-Driven Cavity Problem

$\nabla$	عملگر مشتق
$(kg/m^3) C$	غلظت آلاینده
$(J) q$	گرما
$(kg/m^3) \rho$	چگالی (جرم مخصوص)
$(kg/m.s) \mu$	لزجت
$(1/s) \omega$	فرکانس استهلاك انرژی آشفته‌گی
$th$	زیرنویس نیروی ترموفرتیک
$Re$	عدد رینولدز

## ۱۲- مراجع

- [۱] متین اح، بیاتیان م (۱۳۸۹) جمع آوری و پالایش آلاینده‌های هوا (ذره‌ها). چاپ اول، تهران: انتشارات فن‌آوران.
- [۲] قاسمی ف، تقوی ل (۱۳۹۲) بررسی ترکیب و منشأ ریزگردها و تاثیرات آن بر سلامتی انسان و محیط‌زیست. سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین ۲۷-۳۰.
- [۳] اسکندری ص (۱۳۹۰) آلودگی هوا. گزارش اداره پایش هوای سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران.
- [۴] مرادی ا (۱۳۹۴) ارزیابی اثرات زیست محیطی پدیده خشکسالی بر وقوع ریزگردها. اولین همایش ملی تخصصی علوم کشاورزی و محیط زیست ایران.
- [۵] احدی س، نجفی مع، روشنی م (۱۳۹۱) گزارش سالانه کیفیت هوای تهران در سال ۱۳۹۰. گزارش فنی شرکت کنترل کیفیت هوا، شماره QM91/02/06(U)/01، یکم مهرماه.
- [6] NARSTO EPA\_SS\_HOUSTON TEXAQS2000 PM<sub>2.5</sub> Organic Speciation Data (2005) Retrieved from <http://www.calipso.larc.nasa.gov>.
- [7] Characterization of transport and transformation of air pollutants, (n.d). Retrieved from <https://www.mtu.edu>.
- [۸] بُرُبر م (۱۳۹۳) خاستگاه و خسارت ریزگردها. دسترسی از <http://reezgard.blogfa.com> تاریخ ۱۳۹۴/۵/۸.
- [۹] گرد و غبار سونامی مرگباری برای بخش کشاورزی (۱۳۹۲) دسترسی از <http://reezgard.blogfa.com> تاریخ ۱۳۹۴/۵/۱۹.

معکوس در محوطه‌ی بسته، میزان ورود ذرات گرد و غبار افزایش داشته و می‌توان انتظار داشت میزان به دام افتادن ذرات در این محوطه نیز بیشتر باشد. تغییرات دما نیز به عنوان یک عامل مهم در تغییرات غلظت ریزگردها بررسی شده و نتایج نشان دادند میزان خارج شدن ذرات از محوطه مرکزی در فصل زمستان به میزان قابل توجهی بیش از فصل تابستان است. همچنین می‌توان گفت بیشتر تجمع و رسوب ذرات آهکی در گوشه‌های محوطه مرکزی ساختمان کتابخانه و نیز متاثر از جهت وزش باد است.

از طرفی می‌توان گفت یکی از مهمترین مسائل در جلوگیری از وقوع این پدیده، نگاه‌داشتن رطوبت خاک یا هوا در هر منطقه می‌باشد. در این راستا شناخت ریزگردها از طریق شبیه‌سازی حرکت آنها در اندازه یک شهر یا استان می‌تواند در اتخاذ تصمیمات مناسب بسیار موثر باشد. به باور کارشناسان برای کنترل و کاهش ریزگردها در محدوده ایران باید از این کشور آغاز نمود و سپس از سایر کشورها درخواست کرد که برای کنترل و مهار ریزگردها حساسیت نشان دهند.

## ۱۱- فهرست علائم

$(m^3) V$	المان حجم
$(J) E$	انرژی
$(J) K$	انرژی جنبشی
$(m^2/s^2) k$	انرژی جنبشی آشفته‌گی
$(J) Q$	انرژی گرمایی
$(kg) m, M$	جرم
$(^{\circ}C) T$	دما
$(s) t$	زمان
$(m/s) v, V$	سرعت (ذره و سیال)
$C_s, C_t, C_m, K, K_n$	ضرایب انتقال حرارت
$(N/m^2) E$	ضریب برگشت پذیری (مدول یانگ)
$(m^2/s^2 \cdot ^{\circ}C) C_p$	گرمای ویژه

- [۱۰] گزارش اداره کل حفاظت محیط زیست استان قم (بی تا). سازمان حفاظت محیط زیست، شاخص کیفیت هوا، دسترسی در تاریخ ۱۳۹۳/۱۱/۳۰.
- [۱۱] احمدی‌زاده ا (۱۳۹۳) گزارش وضعیت آلودگی های زیست محیطی استان قم، سازمان حفاظت محیط زیست، اداره کل حفاظت محیط زیست قم، مرکز تحقیقات زیست محیطی، شهریور.
- [۱۲] سلیمانی آ، عسگری حم، دادالهی س، علمی‌زاده ه خزاعی سح (بی تا) ارزیابی عمق اپتیکی حاصل از تصاویر ماهواره MODIS در خلیج فارس، پذیرفته شده در مجله علوم و فنون دریایی.
- [۱۳] میر عبد الله لواسانی آ، مهدی پور ر، رضی پ (۱۳۹۲) بررسی عددی پروسیتی و ضخامت فیلتر در حرکت ریز گردها. همایش ملی پژوهش‌های محیط‌زیست ایران، همدان، دانشکده شهید مفتح.
- [۱۴] مؤیدی م ک، بشردوست ع (۱۳۹۴) شبیه‌سازی عددی میدان جریان و انتقال ذره های آلاینده حول پشته‌های انباشت مواد اولیه. بیست و سومین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [۱۵] حسونوند م ص، ترکیان ا، صاحب نسق مر، ندافی ک، مویدی م ک (۱۳۹۱) بررسی اثر مواد افزودنی بر کاهش بادبردگی از پشته‌های سنگ آهن با استفاده از تونل باد. مجله سلامت و محیط، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران ۵۱۹-۵۳۰.
- [۱۶] قمی م، قدیمی ف (۱۳۹۳) بررسی آلاینده‌های عناصر سنگین موجود در ریزگردهای شهر اراک. همایش ملی زیست بوم پایدار و توسعه، اراک.
- [۱۷] همتی م، رحیمی ق (۱۳۹۳) بررسی توزیع مکانی برخی فلزات سنگین حاصل از ریز ذره‌های گردوغبار در همدان. اولین همایش ملی مدیریت پایدار منابع خاک و محیط‌زیست، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- [۱۸] رفیعی م، بنی نعیمه س، راسخ ع (۱۳۹۳) بررسی میزان تاثیر سرعت باد در تشدید غلظت PM10 در هوای شهر اهواز. اولین همایش ملی محیط‌زیست دانشگاه پیام نور، اصفهان.
- [19] Zhang Z, Wieland R, Reiche M, Funk R, Hoffmann C, Li Y, Sommer M (2011) Wind modelling for wind erosion research by open source computational fluid dynamics. *Ecological Inform* 6(5): 316-324.
- [20] Hong SW, Lee IB, Seo IH, Kwon KS, Kim TW, Son YH, Kim M (2014) Measurement and prediction of soil erosion in dry field using portable wind erosion tunnel. *Biosyst Eng* 68-82.
- [21] Liu D, Bu C, Chen X (2013) Development and test of CFD-DEM model for complex geometry: A coupling algorithm for Fluent and DEM. *Comput Chem Eng* 260-268.
- [۲۲] ورستیگ م (۱۳۷۹). مقدمه‌ای بر دینامیک سیالات محاسباتی CFD. چاپ اول، انتشارات دانشگاه علم و صنعت.
- [۲۳] فرزیگر جی اچ (۱۳۸۸) روش‌های محاسباتی در دینامیک شاره‌ها. چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.
- [24] McDonough JM (2007) Lectures in computational fluid dynamics of incompressible flow. 3rd edn. pp 60-61.
- [25] Marchi CH, Suero R, Araki LK (2009) The lid-driven square cavity flow: Numerical solution with a 1024 x 1024 grid. *ABCM XXXI*(3).