

## مطالعه و شبیه‌سازی حرکت و نشست ذرات کوچک‌تر از ۲۰۰ میکرون در سرعت‌های مختلف باد با استفاده از نرم‌افزار فلونت

۱- احمد عباسی، دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی نفت و گاز، دانشگاه شیراز

۲- محمدرضا ملایری، استاد بخش مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی نفت و گاز، دانشگاه شیراز  
malayeri@shirazu.ac.ir

۳- پیام ستوده، استادیار بخش مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۰۶

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۲۷

### چکیده

مقابله با گرد و غبار نیازمند شناخت دقیق‌تر عملکرد ذرات معلق در هوا و عوامل مؤثر بر آن است. به همین دلیل، حرکت ذرات گرد و غبار و نشست آن‌ها، اهمیت ویژه‌ای دارد. از میان روش‌های مطالعه پدیده‌های مربوط به این ذرات، شبیه‌سازی به کمک رایانه به دلیل هزینه کمتر و عدم نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی یا ماهواره‌ای، مورد توجه است. هدف این پژوهش، شبیه‌سازی حرکت و نشست ذرات گرد و غبار با اندازه بین ۰/۰۱ تا ۲۰۰ میکرون از جنس رس، تحت تأثیر سرعت باد ۱، ۳، ۱۰ و ۲۰ متر بر ثانیه بر روی زمین صاف و ساختمان‌های فرضی با ارتفاع ۶ و ۱۲ متر می‌باشد. نرم‌افزار گمبیت برای ایجاد محیط شبیه‌سازی و نرم‌افزار فلونت برای حل معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس به همراه معادلات آشفستگی به کار گرفته شده است. بر اساس نتایج، سرعت باد عاملی منفی در نشست ذرات گرد و غبار بر روی سطح زمین و ساختمان می‌باشد و این موضوع مستقل از ارتفاع ساختمان است. در نتیجه، ذرات زیر میکرون ماندگاری بیشتری در هوا دارند و کمتر از ۱۰ درصد نشست می‌کنند پس می‌توانند به نواحی دورتری انتقال یابند. هر چه ذرات بزرگتر باشند، مکانیزم گراننش در پدیده نشست آن‌ها مؤثرتر است به گونه‌ای که برای ذرات بزرگ‌تر از ۱۰۰ میکرون، میزان نشست بیش از ۳۰ درصد به دست آمده است. در سرعت باد و اندازه ذرات یکسان، مانع سطحی ۱۲ متری به دلیل جدایش جریان از سطح و ایجاد اغتشاش، نشست را به تعویق انداخته و حتی مقدار آن را برای ذرات کوچک‌تر از میکرون به کمتر از ۱ درصد کاهش می‌دهد. نشست این ذرات با سرعت باد تغییر نمی‌کند ولی نشست ذرات بزرگ‌تر از ۱۰ میکرون با سرعت باد رابطه عکس دارد.

**واژگان کلیدی:** نشست گرد و غبار؛ شبیه‌سازی؛ فلونت؛ سرعت باد؛ اندازه ذرات؛ عامل سطحی.

### مقدمه

در سنجش از راه دور، اطلاعات محیطی توسط ماهواره‌های ویژه‌ای ارسال می‌گردد که به کمک آن‌ها می‌توان شدت و غلظت گرد و غبار را در منطقه‌ای خاص تعیین کرد. با استفاده از این اطلاعات و سایر داده‌های هواشناسی، امکان برخی پیش‌بینی‌ها نیز میسر می‌گردد. <sup>۱</sup>MODIS و <sup>۲</sup>AVHRR نمونه‌هایی از این سنجنده‌ها می‌باشند [۱۵]. این روش با مباحث هواشناسی و اطلاعات آماری سر و کار دارد و احتمال وقوع گرد و غبار در یک منطقه را مشخص می‌کند. بدیهی است که این کار ارزش بالایی دارد اما اطلاعات جزئی در مورد مکانیزم‌های حرکت و نشست گرد و غبار در اختیار قرار نمی‌دهد و به مهار گرد

نیاز انسان به شناخت و کنترل محیطی که در آن زندگی می‌کند از یک سو و تلاش در جهت مقابله با حوادث و اثرات زیان‌بار پدیده‌های محیطی از سوی دیگر سبب شده است که روش‌های مختلفی در این زمینه به کار گرفته شود [۳]. گرد و غبار نیز که در قرن حاضر، به یکی از جدی و اساسی‌ترین پدیده‌های نامطلوب تبدیل شده، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران واقع شده است. به‌طور کلی می‌توان روش‌های مطالعه گرد و غبار را به چهار دسته طبقه‌بندی نمود:

۱- سنجش از راه دور

۲- مدل‌های تئوری

۳- شبیه‌سازی رایانه‌ای

۴- شبیه‌سازی آزمایشگاهی

۱- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

۲- Advanced Very High Resolution Radiometer

داشتن دانش لازم دینامیک سیالاتی، مورد مطالعه قرار داد. البته این روش پیچیدگی‌های خاص خود را دارد و نیازمند دانش سطح بالایی در مورد دینامیک حرکت سیالات و جریان‌های دوفازی است.

پیاپیاده‌سازی و شبیه‌سازی عملی گرد و غبار در آزمایشگاه دشوار است چرا که عوامل بسیار زیادی بر این پدیده اثر می‌گذارد. می‌توان اقدامات صورت گرفته در این زمینه را به دو گروه تقسیم بندی کرد: آزمایش‌های صورت گرفته در تونل باد در یک گروه قرار می‌گیرد که در چنین آزمایشگاه‌هایی، معمولاً شرایط شکل‌گیری گرد و غبار هدف پژوهش است. گروه دیگر شامل نمونه‌گیری از گرد و غبار در نواحی مختلف جغرافیایی جهت انجام مطالعه‌های موردی و نیز بررسی میزان اثربخشی روش‌های مقابله با گرد و غبار می‌شود [۱۸].

از آن‌جا که شبیه‌سازی رایانه‌ای فقط به یک سیستم پردازشگر مناسب و نرم‌افزار شبیه‌سازی نیاز دارد؛ همانند روش سنجش از راه دور، نیازمند ماهواره نیست و به فراهم کردن امکانات آزمایشگاهی وابسته نیست، در حال حاضر روشی مناسب برای آغاز یک پژوهش در بین روش‌های فوق در راستای شناسایی عملکرد گرد و غبار و بررسی روش مقابله با شکل‌گیری آن است. مزیت شبیه‌سازی رایانه‌ای در این است که بدون هزینه‌های جانبی و نگرانی‌های ایمنی می‌توان پژوهش مورد نظر را انجام داد و همچنین با استفاده از قابلیت کدنویسی نرم‌افزار مربوطه، داده‌های حاصل از شبیه‌سازی شرایط پیچیده‌تر نیز قابل اعتماد هستند. بر این اساس در پژوهش حاضر، شناسایی اثر سرعت باد و اندازه ذرات بر حرکت و نشست گرد و غبار در نزدیکی سطح زمین مورد توجه است و شبیه‌سازی برای مقادیر مختلف سرعت باد (۱، ۳، ۱۰ و ۲۰ متر بر ثانیه) و اندازه ذرات بین ۰/۰۰۱ تا ۲۰۰ میکرومتر، صورت گرفته است. علاوه بر آن، اثر ارتفاع یک ساختمان (۶ و ۱۲ متر) بر حرکت و نشست گرد و غبار که در مسیر حرکت آن قرار دارد، بررسی شده است.

### مواد و روش‌ها

به‌منظور مطالعه اثر سرعت باد و اندازه ذرات گرد و غبار بر چگونگی حرکت و نشست آن‌ها در مجاورت سطح

و غبار کمکی نمی‌کند بلکه برای مقابله با آن هشدار می‌دهد.

استفاده از روابط ریاضی و معادلات مربوط به جو، منجر به توسعه مدل‌هایی شده است که می‌توان از آن‌ها در پیش‌بینی غلظت آلاینده‌های هوا و تخمینی از انتشارشان بهره برد. برخی از این مدل‌ها در قالب بسته‌های نرم‌افزاری ارائه شده‌اند تا استفاده از آن‌ها آسان‌تر و سرعت محاسبات بیشتر شود. مدل‌هایی نظیر *MAD*<sup>۱</sup> و *SORGAM*<sup>۲</sup> از این دسته‌اند [۲]. استفاده ترکیبی از این مدل‌ها باعث دستیابی به امکانات بیشتر و افزایش دقت نتایج و نیز پوشش دادن برخی از ضعف‌های آن‌ها شده است. پژوهش‌های متعددی در زمینه استفاده از این مدل‌ها برای تخمین غلظت گرد و غبار در شهرهای مختلف نظیر تهران [۱۶]، نواحی شرق ایران [۱۰] و عراق [۱۲] انجام گرفته است. همچنین در برخی دیگر از مطالعات، با هدف یافتن منشأ تشکیل گرد و غبار و نیز درک اثرگذاری باد و جریان‌های جوی و دیگر پارامترهای محیطی بر ساز و کار حرکتی گرد و غبار، داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای همراه با مدل‌های مذکور به‌صورت ترکیبی مورد استفاده واقع شده است [۱۱ و ۱۷].

رویکرد دیگری که براساس توسعه علم رایانه گسترش یافت، شبیه‌سازی است که در این روش، معادلات حاکم بر حرکت گرد و غبار توسط نرم‌افزارهایی مانند فلونت<sup>۳</sup> در یک هندسه شبکه‌بندی شده، به روش عددی حل می‌گردد و نتایج آن به‌صورت اعداد و نیز نمودارهایی قابل تهیه است. نمونه‌هایی از بهره‌گیری از این روش شامل بهینه‌سازی هندسی و معماری ساختمان با توجه ویژه به حرکت ذرات گرد و غبار و میزان به دام افتادن آن‌ها در فضای اطراف ساختمان [۸ و ۱۳]، شناخت اثر سرعت و فشار هوا و معماری ساختمان بر چگونگی توزیع گرد و غبار [۹ و ۱۴] و نیز چگونگی اثرگذاری جهت وزش باد و تغییرات دمایی محیطی بر رفتار گرد و غبار می‌شود [۷]. به کمک این روش می‌توان شرایط محیطی مورد نظر را توسط قابلیت کدنویسی نرم‌افزار به آن معرفی کرد و یا مکانیزم‌ها و عوامل مختلف اثر گذار بر حرکت و نشست گرد و غبار را به شرط

۱- Modal Aerosol Dynamics Model for Europe

۲- Secondary Organic Aerosol Model

۳- Fluent

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y) = 0 \quad (2)$$

در معادلات (۱) و (۲) چگالی هوا،  $t$  زمان،  $v_x$  و  $v_y$  مؤلفه‌های سرعت باد، به ترتیب در راستای  $x$  و  $y$  است. معادله مورد نیاز دیگر، معادله حرکت یا همان معادله ناویر-استوکس می‌باشد که در حالت کلی به صورت معادله (۳) است [۴]:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla P - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad (3)$$

این معادله در یک سیستم دو بعدی که محور  $y$  در راستای اثر شتاب گرانش باشد، در دو جهت  $x$  و  $y$  به ترتیب، به صورت زیر خواهد بود:

$$\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} - \left[ \frac{\partial}{\partial x} \tau_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yx} \right]$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} - \left[ \frac{\partial}{\partial x} \tau_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yy} \right] + \rho g \quad (5)$$

توجه به همگرایی بهتر معادلات  $k-\omega$  از این مدل دو پارامتری استفاده گردید که در حالت دو بعدی به صورت زیر می‌باشد [۲۰]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_y k)}{\partial y} = \rho \tau_{xy} \frac{\partial v_x}{\partial y} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_y \omega)}{\partial y} = \frac{\gamma \omega}{k} \tau_{xy} \frac{\partial v_x}{\partial y} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \sigma_\omega \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial y} \right] + \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \quad (7)$$

و به مطالعه می‌پردازد. دیدگاه لاگرانژی برای مواقعی که مسیر حرکت ذرات اهمیت دارد، به کار می‌رود. مدل  $DPM^2$  در نرم‌افزار فلوئنت، با دنبال کردن هر ذره در مسیر جریان، اصول رویکرد لاگرانژی را پیاده‌سازی می‌نماید. در این مدل، قانون دوم نیوتون برای واحد جرم ذره با در نظر گرفتن نیروهای پسا و شناوری وارد بر ذرات گرد و غبار، مطابق معادله (۸) اعمال می‌شود:

زمین و ساختمان مورد شبیه‌سازی، می‌بایست میدان سرعت باد در محیط شبیه‌سازی تعیین شود زیرا حرکت ذرات در محیط، به مقدار و جهت سرعت در هر نقطه از هندسه شبیه‌سازی وابسته است. با توجه به این‌که گرد و غبار شامل جریان هوا همراه با ذرات جامد تشکیل دهنده غبار سطح زمین است، معادلات حاکم بر حرکت آن شامل معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس می‌باشد. معادله پیوستگی همان قانون بقای جرم است که در حالت کلی به صورت معادله (۱) ارائه می‌گردد [۴]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

این رابطه در حالت دو بعدی به شکل زیر در می‌آید:

$$(4)$$

در معادلات (۳) تا (۵)،  $\tau$  تنش برشی،  $P$  فشار و  $g$  شتاب گرانشی زمین است. در صورت وجود اغتشاشات، معادلاتی نیز در کنار آن‌ها مورد نیاز است تا پارامترهای آشفستگی نظیر  $k$ ،  $\varepsilon$  یا  $\omega$  را تعیین نماید. در این مقاله با

در معادلات (۶) و (۷)،  $k$  و  $\omega$  پارامترهای آشفستگی،  $\beta$ ،  $\beta^*$  و  $\sigma$  ضرایب مورد استفاده<sup>۱</sup> در مدل آشفستگی می‌باشند (پارامترهایی که برای کاهش خطاهای مربوط به حرکات گردانه‌ها استفاده می‌شوند تا حرکت گردانه‌های جریان متلاطم یا آشفته را بهتر و دقیق‌تر مدل کنند). این معادلات برای فاز پیوسته (هوا) به کار می‌روند درحالی‌که محاسبات مربوط به فاز گسسته (ذرات) به کمک دیدگاه لاگرانژی صورت می‌گیرد. در این دیدگاه، ناظر همراه با هر کدام از اجزای جریان در راستای مسیر آن، حرکت می‌کند

شبیه‌سازی جریان گرد و غبار استفاده و هندسه موردنظر توسط نرم‌افزار گمبیت<sup>۲</sup> نسخه ۲/۴/۶ ایجاد شده است. با این‌که در واقع، جریان باد ماهیتی سه بعدی دارد اما به دلیل وضعیت متقارن و شرایط اختلاط در بعد عمود بر صفحه، می‌توان از تغییرات در این راستا صرف‌نظر کرد. در نتیجه، به جای شبیه‌سازی یک هندسه مکعبی سه بعدی با تعداد سلول‌های بسیار زیاد که نیازمند پردازشگر بسیار قدرتمندی است، می‌توان یک محیط دو بعدی مستطیلی با تعداد سلول‌های خیلی کمتر، مطابق شکل (۱)، تعریف کرد که ارتفاع آن نمایانگر ارتفاع از سطح زمین و طول آن، ضلع موازی با سطح زمین فرض شده است. نیمرخ باد نیز تابعیت ارتفاع دارد که به نوعی نشان‌دهنده بی‌اهمیت بودن بعد عمود بر صفحه (محور Z) در مقدار سرعت باد است یعنی در عمق کاغذ به دلیل اختلاط شدید نیمرخ باد، تغییری وجود ندارد و همه لایه‌ها مشابه هم هستند.

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (8)$$

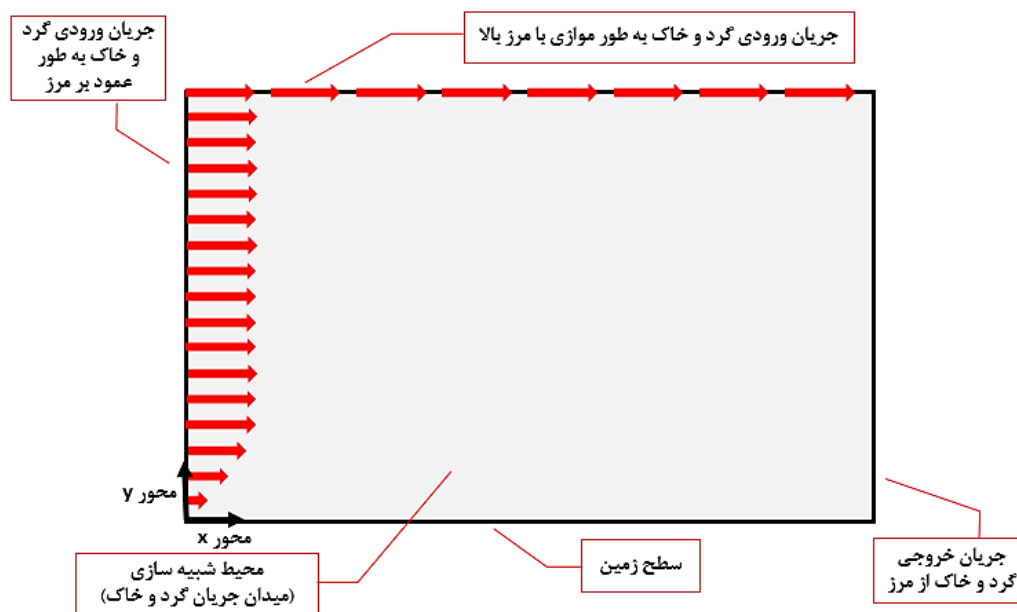
در این معادله،  $\rho_p$  چگالی ذرات،  $u_p$  سرعت ذرات و  $F_D$ ، نیروی پسای وارد بر ذرات می‌باشد که از معادله (۹) محاسبه می‌گردد:

$$F_D = \frac{18 C_D Re}{24} \frac{u}{\rho_p d_p^2} \quad (9)$$

در این معادله،  $d_p$  و  $C_D$  به ترتیب، قطر ذرات و ضریب پسای آن‌ها می‌باشد. برای تعیین رژیم جریان و نیز محاسبه نیروی پسا، تعیین عدد رینولدز،  $Re$ ، مورد نیاز است که به کمک معادله (۱۰) معین می‌شود:

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (10)$$

که در این رابطه  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی هوا است. در این پژوهش، از نرم‌افزار فلوئنت نسخه ۶/۳/۲۶ به دلیل توانایی بالا در حل معادلات مربوط به جریان آیروسول (جامد در گاز) برای انجام محاسبات و



شکل ۱- شمای ساده‌ای از محیط شبیه‌سازی [۱]

که اجسام و ذرات متحرک وارد می‌شود) صرف‌نظر نمود ولی فراتر از آن می‌بایست این عوامل را نیز به برنامه وارد کرد که کدنویسی و حل معادلات را دشوارتر می‌کند. برای بررسی زمین صاف و نیز اثر یک ساختمان فرضی با

ارتفاع این مستطیل معادل ۱۰۰ متر قرار داده شد زیرا در این فاصله از سطح زمین، می‌توان از اثرات چرخش زمین و نیروی کوریولیس<sup>۱</sup> (نیروی ناشی از چرخش زمین

مرز بالا نیز فقط جریان گرد و غبار مشاهده می‌شود که چون از سطح زمین فاصله‌ی زیادی دارد، می‌توان سرعت جریان را ثابت در نظر گرفت و مقدار آن با قرار دادن ارتفاع در نیمرخ سرعت قانون یک-هفتم به‌دست می‌آید. در مرز پایین به‌دلیل حضور زمین (مرز جامد)، شرایط عدم لغزش یا دیواره برقرار است. در مرز خروجی جریان (سمت راست) نیز شرط فشار ثابت اتمسفری اعمال می‌شود. در مورد فاز گسسته، ذرات با همان نیمرخ سرعت باد در مرزهای چپ و بالا وارد می‌شوند که به‌دلیل استفاده از کدنویسی، از حالت تعریف شده توسط کاربر بهره‌برده شده است. در مرز پایین فرض بر این است که ذرات پس از تماس با سطح به‌دلیل اثرگذاری نیروهای بین سطحی و چسبندگی، روی سطح قرار می‌گیرند و نشست می‌کنند پس، از شرط "به دام افتادگی" استفاده می‌شود. در شرایطی ممکن است این فرض درست نباشد اما در این شبیه‌سازی، به دلیل این که فقط مکانیزم نشست ذرات مهم بوده است و چسبندگی ذرات به سطوح، هدف بررسی نیست، می‌توان از معلق شدن مجدد ذرات صرف‌نظر کرد. در مرز سمت راست نیز ذراتی که به هر دلیل نشست نکرده‌اند، همراه جریان هوا از محیط خارج می‌شوند و شرط "فرار کردن" به کار برده می‌شود. در جدول (۲)، خلاصه این شرایط مرزی گزارش شده است.

در فلوئنت، ابتدا جریان تک‌فاز هوا حل می‌گردد تا میدان سرعت جریان در هندسه مسئله مشخص شود. پس از تعیین میدان سرعت سیال، با به‌کارگیری مدل *DPM* برای ذرات جامد، حرکت آن‌ها در میدان سرعت به‌دست آمده، مشخص می‌گردد. در این مدل برای مطالعه ذرات معلق، آن‌ها را به‌صورت یک فاز گسسته یا ذرات جدا از هم در نظر می‌گیرند. ورودی‌های مدل *DPM* شامل قطر ذرات، چگالی، واکنش‌پذیری و ضریب پسای آن‌ها می‌باشد. در این پژوهش، قطر ذرات در بازه ۰/۰۰۱ تا ۲۰۰ میکرومتر با چگالی ۱۶۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب شد [۶]. با توجه به جنس ذرات که عمدتاً  $SiO_2$  (ماده غالب تشکیل‌دهنده پوسته زمین) می‌باشد، عدم واکنش‌پذیری با سایر اجزا و مواد موجود در هوا برای ذرات گرد و غبار در نظر گرفته شد [۶].

ارتفاع‌های ۶ و ۱۲ متر (در ارتفاع ۱۰ متر از سطح زمین، الگوی سرعت باد تغییر می‌کند و این اعداد بدین دلیل انتخاب شده است که در ارتفاع کمتر و بیشتر از ۱۰ متر، مطالعه صورت بگیرد)، سه حالت جداگانه ایجاد شده و طول هر یک از آن‌ها تا فاصله‌ای حدود ۲۰ برابر ارتفاع مانع سطحی مورد نظر (برای بررسی اثر سرعت باد و جریان‌های برگشتی)، یعنی برابر ۲۰۰ متر انتخاب گردید. شبکه‌بندی از نوع سازمان‌یافته<sup>۱</sup> و چهارضلعی<sup>۲</sup> با نرخ رشد<sup>۳</sup> ۱/۰۵ برای کوچک‌تر کردن اندازه سلول‌ها نزدیک سطوح جامد جهت حل دقیق‌تر، قرار داده شد. در مواقعی که لازم است در بخشی از فضای شبیه‌سازی، با کاهش اندازه سلول‌ها به دقت بیشتری در محاسبات دست یابیم، از این نسبت استفاده می‌شود و نشان می‌دهد که هر سلول در محیط شبیه‌سازی نسبت به سلول پیش از خود، چقدر بزرگ‌تر شده است. اطلاعات مربوط به این سه هندسه در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات وضعیت‌های به‌کار رفته در شبیه‌سازی [۱]

| هندسه           | تعداد گره | تعداد صفحه | تعداد سلول |
|-----------------|-----------|------------|------------|
| زمین صاف        | ۱۶۶۰۸۳    | ۳۳۰۰۸۲     | ۱۶۴۰۰۰     |
| ساختمان ۶ متری  | ۲۷۹۲۰۱    | ۵۵۶۲۰۰     | ۲۷۷۰۰۰     |
| ساختمان ۱۲ متری | ۳۹۴۳۲۰    | ۷۸۶۳۱۹     | ۳۹۲۰۰۰     |

شرایط مرزی اعمال‌شده بر شبیه‌سازی براساس محیط واقعی انتخاب شده است. برای فاز پیوسته که جریان هوا است، همان‌طور که در شکل (۱) نیز مشاهده شد، گرد و غبار از یک طرف به محیط وارد می‌شود (سمت چپ) که سرعت آن به‌دلیل اثر اصطکاک با زمین، تا ارتفاع ۱۰ متر (که به‌عنوان ارتفاع مبنا<sup>۴</sup> در نظر گرفته می‌شود)، از یک نیمرخ لگاریتمی و پس از آن تا ارتفاعات بالاتر، از نیمرخ قانون توانی یک-هفتم پیروی می‌کند. دلیل استفاده از هر دو نیمرخ این است که ارتفاع شبیه‌سازی برابر با ۱۰۰ متر است و نیمرخ لگاریتمی فقط تا ارتفاع حدود ۱۰ متر از سطح زمین دارای اعتبار است. پیکان‌های موجود در شکل (۱)، شمای ساده‌ای از نیمرخ سرعت را نشان می‌دهد. در

۱- Structured

۲- Quadrilateral

۳- Mesh Edge Ratio

۴- Reference height

جدول ۲- شرایط مرزی تعریف شده برای فازهای پیوسته (هوا) و گسسته (ذرات) [۱]

| شرایط فاز پیوسته            | شرایط فاز گسسته      | مرز   |
|-----------------------------|----------------------|-------|
| تعریف شده توسط کاربر        | تعریف شده توسط کاربر | چپ    |
| تعریف شده توسط کاربر        | تعریف شده توسط کاربر | بالا  |
| به دام افتادن               |                      | پایین |
| فرار کردن (خارج شدن از مرز) |                      | راست  |

اثر اصطکاک و وجود لایه مرزی در نواحی نزدیک به سطح زمین، سرعت باد مقدار کمتری دارد، فاصله اعداد انتخاب شده برای سرعت باد در بازه ابتدایی کمتر است.

با اجرای شبیه‌سازی (شکل ۲) و تحقق شرط همگرایی، علاوه بر مشخص شدن مسیر جریان گرد و غبار در هندسه‌های مورد نظر، مقدار نشست هر گروه از ذرات با اندازه‌های مختلف نیز در شرایط متعدد اعمال شده، مشخص گردید که در بخش بعد در قالب شکل‌هایی گزارش شده و پیرامون آن‌ها به بحث و نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

جدول (۳) به‌طور خلاصه، ورودی‌ها و خروجی‌های شبیه‌سازی را معرفی می‌کند.

### نتایج

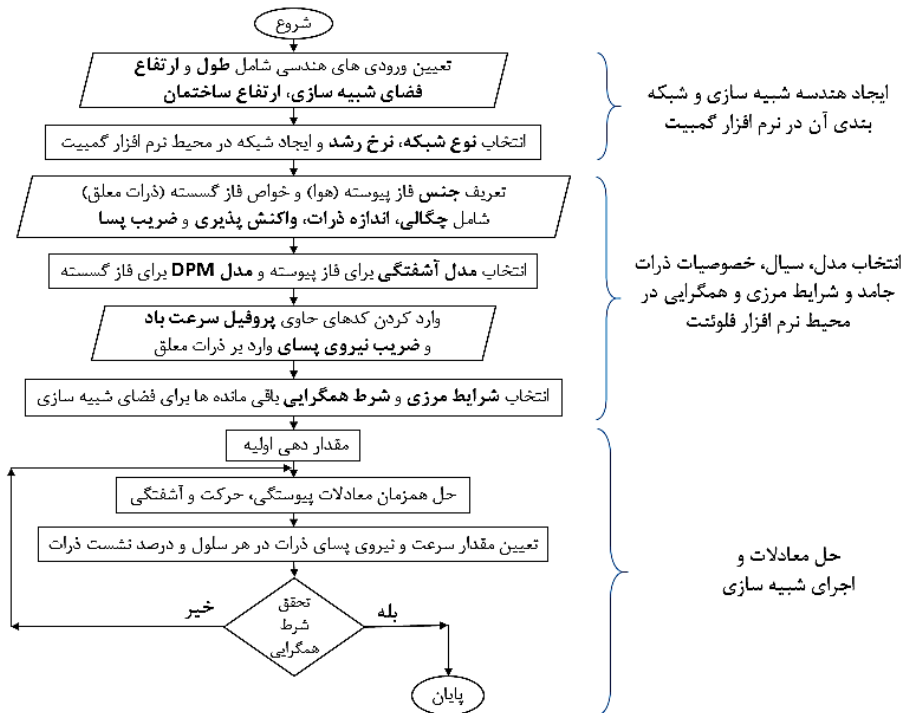
شکل‌های (۳) تا (۵) داده‌های حاصل از شبیه‌سازی را برای ذرات با اندازه‌های ۰/۰۰۱ تا ۲۰۰ میکرومتر تحت تأثیر سرعت‌های متفاوت باد شامل ۱، ۳، ۱۰ و ۲۰ متر بر ثانیه (بر اساس سرعت‌های باد گزارش شده در وبگاه‌های هواشناسی) در هندسه‌های زمین صاف، زمین با یک ساختمان به ارتفاع ۶ متر و زمین با یک ساختمان با ارتفاع ۱۲ متر، به‌ترتیب نشان داده است. برای بررسی بهتر اثر عوامل ذکر شده، شبیه‌سازی مربوطه در اندازه یکنواخت ذرات صورت گرفته است زیرا توزیع اندازه ذرات گرد و غبار دارای یک قطر متوسط است که می‌توان رفتار بخش عمده گرد و غبار را مطابق ذراتی با این قطر تخمین زد.

همچنین ضریب پسا با استفاده از یک مدل تجربی مناسب [۵] به‌صورت کد  $UDF$ <sup>۱</sup> به فلوننت وارد گردید [۱]. این کدها در برنامه وجود نداشته و توسط نویسندگان تعریف می‌شوند تا مواردی که در برنامه به‌صورت پیش‌فرض وجود ندارد، به شبیه‌سازی وارد کنند. به‌علاوه، سرعت باد ورودی نیز توسط کد دیگری به نرم‌افزار معرفی گردید که طبق آن، سرعت باد در زیر ارتفاع مبنا از نیم‌رخ لگاریتمی و برای ارتفاعات بیشتر، از نیم‌رخ قانون توانی یک-هفتم<sup>۲</sup> تعیین می‌شود [۱]. توجه به این نکته ضروری است که کد سرعت ورودی به‌گونه‌ای می‌باشد که در مرز بالا (اتمفر)، جریان موازی با مرز و در مرز سمت چپ (ورود جریان گرد و غبار به محیط شبیه‌سازی)، جریان عمود بر مرز برقرار است. شرط همگرایی حل معادلات پیوستگی، حرکت و آشفتگی به‌گونه‌ای انتخاب شده است که وقتی مقادیر باقی‌مانده‌ها به کمتر از  $10^{-6}$  برسد (که در بسیاری از شبیه‌سازی‌ها برای مطالعات اولیه، مقدار خطای مطلوبی است)، حل متوقف شود. منظور از باقی‌مانده‌ها این است که مقدار متغیرهای به‌دست آمده برای هر سلول پس از حل معادلات معرفی شده، دوباره در همان معادلات قرار داده می‌شوند تا برقراری معادلات به ازای آن‌ها بررسی شود و خطای موجود محاسبه گردد. این خطا در نرم افزارهای شبیه‌سازی دینامیک سیالات به باقی‌مانده معروف است.

بررسی داده‌های مربوط به هواشناسی نشان می‌دهد که سرعت باد در نزدیکی سطح زمین، غالباً کمتر از ۲۰ متر بر ثانیه می‌باشد. برای اینکه در انواع سرعت وزش باد، داده شبیه‌سازی فراهم گردد و عمومیت نتیجه‌گیری افزایش یابد، از کل این بازه، مقادیری به عنوان نمونه انتخاب شده است (۱، ۳، ۱۰ و ۲۰ متر بر ثانیه). ضمن این‌که به‌دلیل

۱- User Defined Function

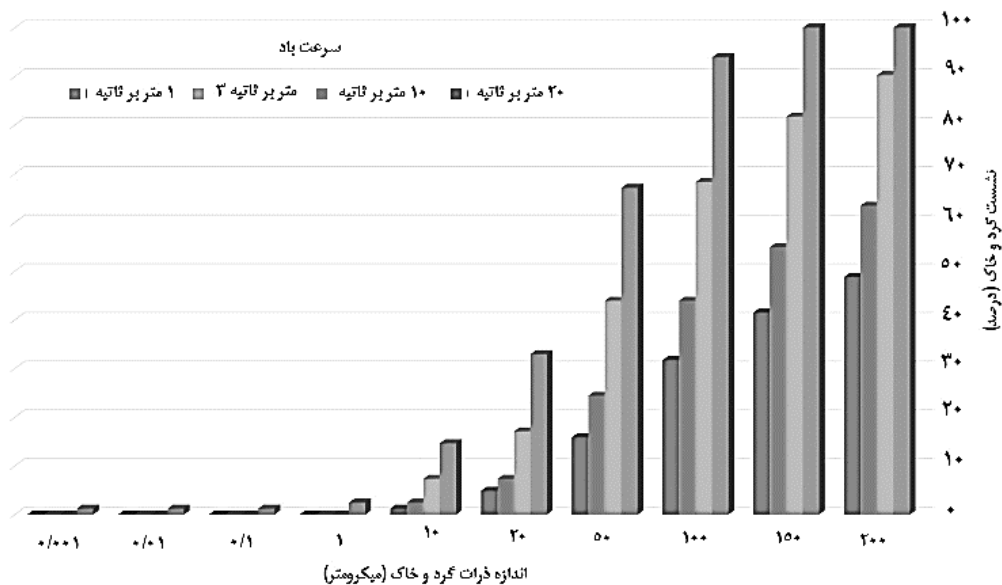
۲- One-seventh-power law



شکل ۲- نمودار جریان روند اجرای شبیه‌سازی (ورودی‌ها به صورت پر رنگ مشخص شده‌اند)

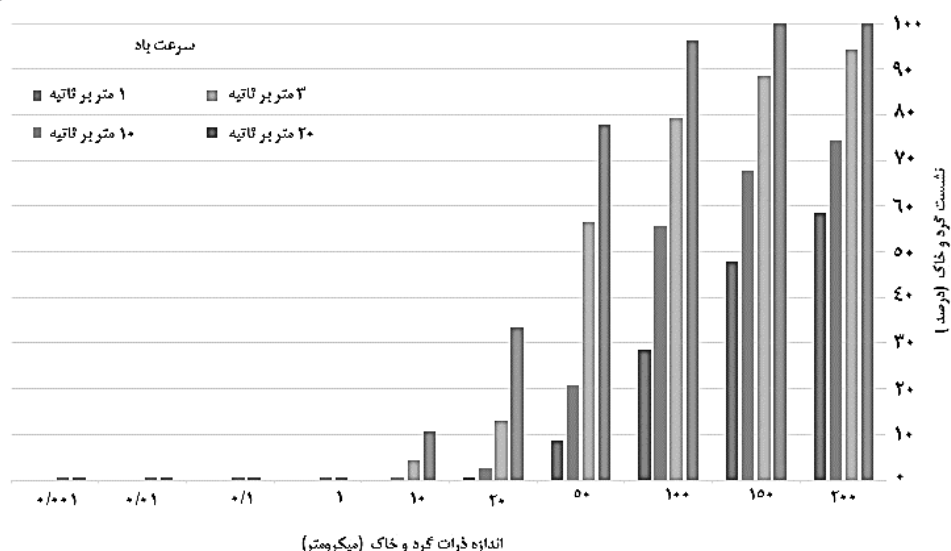
جدول ۳- ورودی‌ها و خروجی‌های شبیه‌سازی گرد و غبار

| خروجی‌ها              | ورودی‌ها                                    |
|-----------------------|---|
| میدان سرعت گرد و غبار | هندسه (محیط) شبیه‌سازی                      |
| میدان فشار گرد و غبار | اندازه شبکه ایجاد شده روی هندسه             |
| نمودار باقی مانده‌ها  | جنس سیال                                    |
| درصد ذرات نشست کرده   | چگالی ذرات                                  |
|                       | توزیع اندازه ذرات                           |
|                       | میزان واکنش‌پذیری ذرات با مواد شیمیایی محیط |
|                       | کدهای مربوط به نیمرخ سرعت باد و ضریب پسا    |
|                       | معیار همگرایی                               |

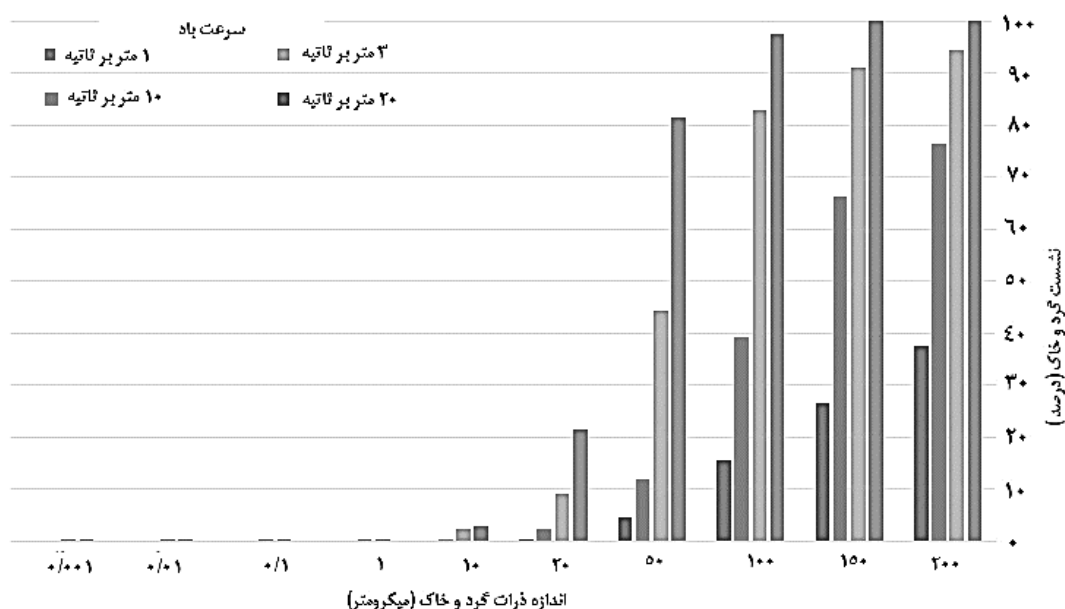


شکل ۳- درصد نشست گرد و غبار روی زمین صاف در شرایط مختلف سرعت باد و اندازه ذرات [۱]





شکل ۴- درصد نشست گرد و غبار روی زمین با یک ساختمان به ارتفاع ۶ متر در شرایط مختلف سرعت باد و اندازه ذرات [۱]



شکل ۵- درصد نشست گرد و غبار روی زمین با یک ساختمان به ارتفاع ۱۲ متر در شرایط مختلف سرعت باد و اندازه ذرات [۱]

### اثر سرعت باد

بیشتر تحت تأثیر اینرسی خود خواهند بود. البته در سه شکل پیش مشاهده می‌شود که ذرات کوچکتر از یک میکرومتر، در همه سرعت‌های باد، خواه کم یا زیاد، و نیز در هر سه هندسه درصد نشست ناچیزی دارند. این مشاهده، ماندگاری بالای چنین ذراتی را در یک گرد و غبار به وقوع پیوسته، می‌تواند توجیه کند زیرا معمولاً در شرایط جوی آرام پس از یک طوفان گرد و غبار، دیده می‌شود که تا مدتی، ذرات حتی بدون حرکت قابل توجه باد، در هوا باقی می‌مانند.

بر اساس شکل (۲) می‌توان دریافت که برای ذرات گرد و غبار با اندازه یکسان، هرچه سرعت باد کمتر باشد، درصد نشست ذرات معلق در هوا بیشتر است. این موضوع در شکل‌های (۴) و (۵) نیز مشاهده می‌شود که می‌توان نتیجه گرفت این حالت مستقل از هندسه شبیه‌سازی می‌باشد. این موضوع ناشی از آن است که سرعت باد کمتر، از یک سو زمان بیشتری به ذرات می‌دهد تا درون هندسه شبیه‌سازی باقی بمانند (زمان ماند بیشتر) و به عبارت دیگر، فرصت نشست بیشتری داشته باشند و از سوی دیگر، عدد استوکس ذرات کاهش می‌یابد و حرکت آن‌ها،

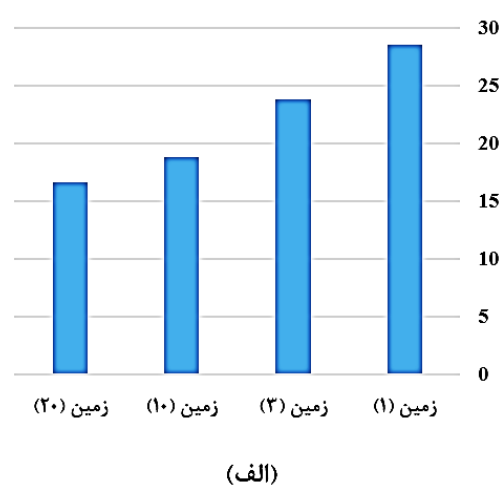
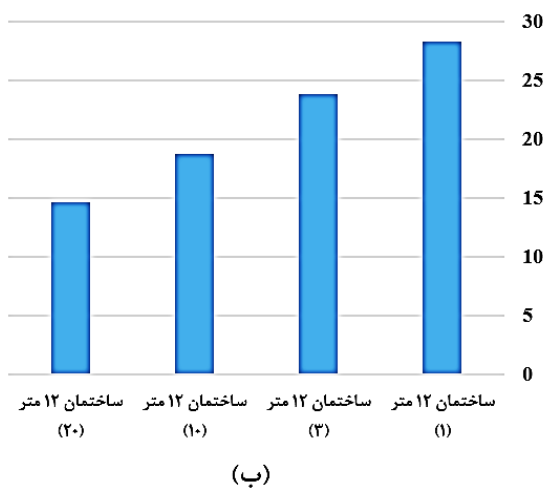


## اثر اندازه ذرات

بررسی کلی شکل‌های (۳) تا (۵) به این نتیجه منجر می‌شود که هر چه ذرات بزرگتر باشند، در همه هندسه‌ها، درصد نشست بیشتری دارند و این موضوع وابسته به سرعت باد و هندسه خاصی نیست. دلیل این حالت، اثر نیروی وزن است که برای ذرات بزرگتر، با افزایش عدد استوکس، باعث تأثیرپذیری کمتر حرکت ذرات از جریان هوا می‌شود. برای چنین ذراتی، مکانیزم غالب نشست، ته‌نشینی گرانشی می‌باشد.

شبیه‌سازی‌های پیشین که نتایج آن‌ها در شکل‌های (۳) تا (۵) نمایش داده شده است، برای ذرات با اندازه‌های یکسان است تا با صرف‌نظر از اثر حضور ذرات با اندازه‌های

مختلف بتوان تأثیر سرعت باد برای هر اندازه از ذرات را به طور جداگانه مشاهده نمود. پس از به‌دست آمدن روند شکل‌های (۳) تا (۵)، شبیه‌سازی‌های دیگری با توزیع اندازه ذرات طبق رابطه توزیع رزین-راملر موجود در نرم‌افزار فلوئنت، صورت گرفت. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل (۶) ارائه شده است. در این شکل، سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه درون پرانتز در محور افقی مشخص شده است. این توزیع اندازه مربوط به یکی از طوفان‌های گزارش شده در استان سیستان و بلوچستان می‌باشد که قطر متوسط ذرات آن، حدود ۱۳ میکرومتر تعیین شده است [۱۹].



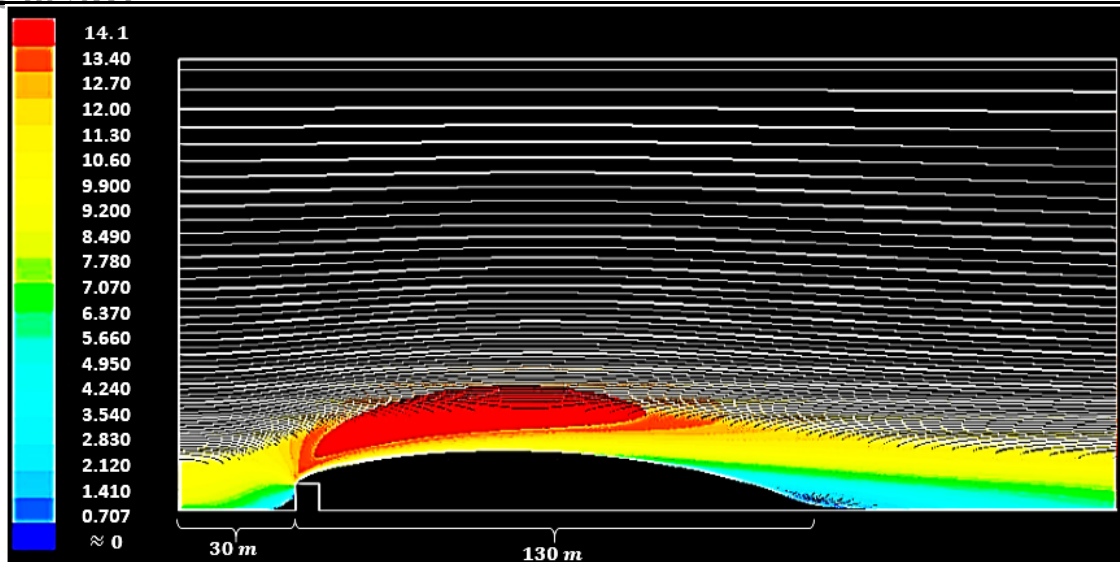
شکل ۶- درصد نشست ذرات برای توزیع اندازه یک گرد و غبار واقعی (الف- زمین صاف، ب- یک ساختمان به ارتفاع ۱۲ متر) [۱]

می‌کند) باعث جدا شدن جریان از سطح زمین شده است. در نتیجه، ناحیه‌ای در پشت ساختمان شکل می‌گیرد که به دلیل افزایش سرعت جریان جدا شده از سطح جامد (ناحیه قرمز رنگ در شکل ۷)، سرعت حرکت ذرات افزایش می‌یابد و نشست آن‌ها تا فاصله‌ای در پشت ساختمان انجام نمی‌گیرد. این نتیجه، با پژوهش [۹] همخوانی دارد. این موضوع در شکل‌های (۷) و (۸) که نمونه‌هایی از مسیر حرکت ذرات برای هندسه زمین با یک ساختمان فرضی هستند، به خوبی نشان داده شده است. برای سایر سرعت‌های باد و اندازه‌های متخلف ذرات نیز شکل‌های مشابهی به دست می‌آید.

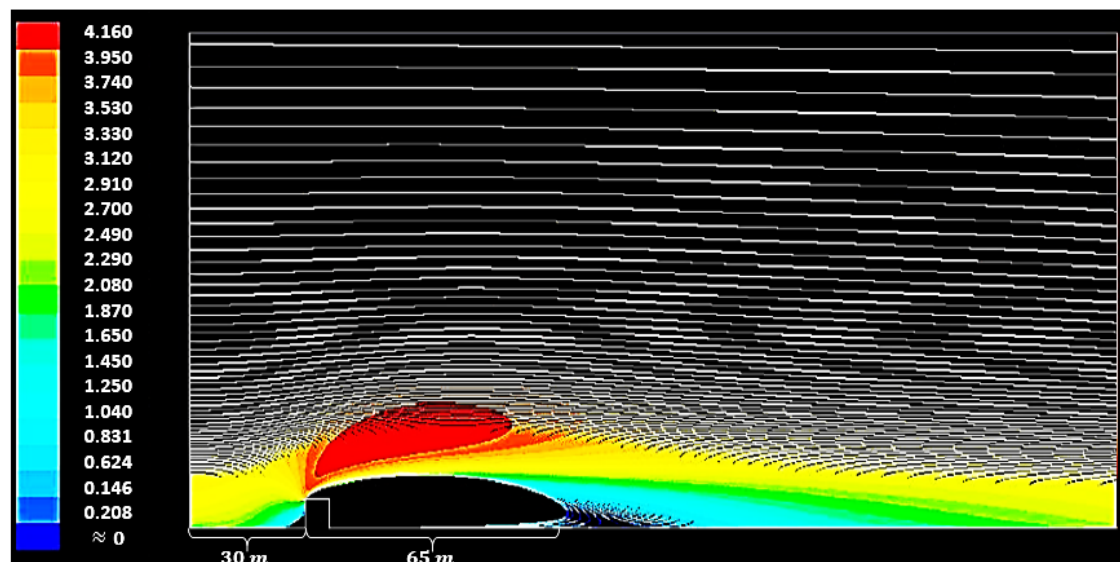
روند تغییرات درصد نشست ذرات برای هندسه‌های مختلف و در سرعت‌های متفاوت باد، مشابه شکل‌های (۳) تا (۵) است ولی درصدهای نشست کمتری که به دست آمده (کمتر از ۳۰٪ در همه موارد)، ناشی از اندازه بسیار کوچک ذرات و به دنبال آن، وزن ناچیز آن‌ها در این نمونه گرد و غبار می‌باشد. این موضوع باعث کوچک شدن عدد استوکس ذرات و ماندگاری بالای آن‌ها در هوا می‌گردد.

## اثر وجود مانع‌های سطحی

به‌طور کلی، وجود عامل سطحی در مسیر حرکت گرد و غبار (در این پژوهش، یک ساختمان نقش آن را ایفا



شکل ۷- شبیه‌سازی مسیر حرکت ذرات یک میکرومتری همراه باد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه در حضور یک ساختمان منفرد [۱]



شکل ۸- شبیه‌سازی مسیر حرکت ذرات ۲۰ میکرومتری همراه باد با سرعت ۳ متر بر ثانیه در حضور یک ساختمان منفرد [۱]

ساختمان که هیچ خط و رنگی دیده نمی‌شود، به این دلیل است که در اثر جدایش جریان از سطح، ذرات همراه باد تا فاصله‌ای در پشت ساختمان حمل می‌شوند و نمی‌توانند وارد این فضا شوند پس نه مسیر، نه سرعت و نه رنگی دیده می‌شود.

با بررسی دقیق‌تر نتایج می‌توان دریافت که اثر وجود مانع وابسته به اندازه ذرات و سرعت باد است به این صورت که در سرعت‌های کم، برای نشست ذرات با قطر بیش از حدود ۲۰ میکرومتر، یک عامل مثبت و برای سایر ذرات، عاملی منفی است. دلیل این امر آن است که ذرات بزرگتر عدد استوکس بزرگتری دارند، پس با تغییر جهت جریان ناشی از حضور ساختمان در مسیر باد، تمایل

طیف رنگی در شکل‌های (۷) و (۸) نشان دهنده سرعت حرکت ذرات روی مسیرهایی است که همراه جریان باد، طی می‌کنند. رنگ‌های آبی و قرمز، به ترتیب نشان‌دهنده حداقل و حداکثر سرعت می‌باشد. این رنگ‌ها دقیقاً روی خطوط مسیر حرکت ذرات قرار دارند و خطوط مسیر هم مربوط به سلول‌های شبیه‌سازی است. از آنجایی که در نزدیکی سطوح جامد (زمین و ساختمان) از تعداد سلول‌های بیشتری استفاده شده است، خطوط خیلی به هم نزدیک هستند و مثل یک ناحیه رنگی به چشم می‌آیند و در نواحی دور از سطوح جامد (بخش بالا و سمت راست)، سلول‌ها بزرگ‌ترند و فاصله آن‌ها از هم بیشتر است پس با تفکیک دیده می‌شوند. در نواحی پشت

حالت‌های دیگر می‌توان به شناخت جامع‌تری در این زمینه دست یافت.

### بحث و نتیجه‌گیری

گرد و غبار که امروزه به لحاظ اهمیت محیط‌زیستی توجه بسیاری را به خود جلب کرده، از زوایای مختلف و با شیوه‌های گوناگونی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله، یک دسته‌بندی کلی برای روش‌های بررسی گرد و غبار شامل سنجش از راه دور، مدل‌های تئوری، شبیه‌سازی رایانه‌ای و شبیه‌سازی آزمایشگاهی معرفی و سپس از ابزار رایانه و شبیه‌سازی توسط فلونت استفاده شد تا اثر سرعت باد، اندازه ذرات گرد و غبار و ارتفاع مانع سطحی (ساختمان) بر حرکت و نشست گرد و غبار روی سطوح جامد مورد مطالعه قرار بگیرد. در ابتدا، ایجاد هندسه‌های زمین صاف و یک ساختمان منفرد در نرم افزار گمبیت صورت گرفت و سپس با به‌کارگیری مدل *DPM* و حل معادلات پیوستگی، ناویر-استوکس و آشفتگی به کمک نرم‌افزار فلونت، مسیر حرکت گرد و غبار در نزدیکی سطح زمین شبیه‌سازی شد و درصد نشست ذرات با اندازه  $0.1/0$  تا  $200$  میکرون تحت تأثیر سرعت‌های باد  $1$ ،  $3$ ،  $10$  و  $20$  متر بر ثانیه تعیین شد. طبق این نتایج، سرعت بالای باد مانع نشست ذرات بزرگ‌تر می‌شود ولی اثر قابل‌توجهی بر نشست ذرات کوچکتر از حدود  $1$  میکرون ندارد. وزن یا گرانش نیز برای ذرات بزرگتر از  $100$  میکرون، یک عامل مثبت در نشست می‌باشد ولی چون ذرات گرد و غبار عموماً قطر متوسط کمتر از  $100$  میکرومتر دارند، ماندگاری بالایی در هوا دارند و در این موارد، نشست کمتر از  $30$  درصد مشاهده می‌شود. قرارگیری یک مانع نظیر ساختمان در مسیر حرکت گرد و غبار، منجر به تغییر مسیر افقی جریان و رخ دادن جدایش جریان از لبه جلویی سطح می‌شود. این پدیده، جریان گرد و غبار را به بالا سوق می‌دهد و به‌هم فشردگی خطوط جریان در ناحیه جدایش ناشی از حضور ساختمان (لبه سمت چپ ساختمان در شکل‌های  $7$  و  $8$ )، باعث یک فضای با سرعت بیشینه می‌گردد. همین امر، نشست ذرات را تا فاصله‌ای دورتر از جسم به تأخیر می‌اندازد و میزان نشست ذرات در نواحی نزدیک به پشت ساختمان کاهش می‌یابد.

کمتری به پیروی از تغییر مسیر جریان دارند؛ در نتیجه تحت تأثیر اینرسی خود هستند. در مقابل، ذرات کوچکتر مسیر جریان جدید را کاملاً دنبال می‌کنند و از سطح دور می‌شوند. هنگامی که سرعت باد بالا باشد، بیشترین درصد نشست در شرایط یکسان مربوط به ساختمان با ارتفاع کمتر ( $6$  متر) است. به نظر می‌رسد که در این حالت، یک ارتفاع بهینه برای دستیابی به بیشترین درصد نشست وجود دارد. وضعیت پیش‌آمده می‌تواند ناشی از این باشد که وقتی سرعت باد زیاد است، آشفتگی‌های شدیدتری در پشت ساختمان بلندتر ایجاد می‌شود و همین موضوع، مانعی برای نشست ذرات نسبت به ارتفاع کمتر ساختمان، ایجاد می‌کند زیرا این حالت برای همه اندازه‌های ذرات مشاهده می‌شود. حتی در سرعت بالای باد، درصد نشست برای ساختمان با ارتفاع بالاتر، کمتر از زمین صاف است که می‌تواند تأیید کننده همین مطلب باشد ولی توصیه می‌شود که برای دستیابی به قطعیت در این مورد خاص، ساختمان‌های بیشتری با ارتفاع‌های متفاوت مورد بررسی قرار گیرند.

بیان این نکته ضرورت دارد که ممکن است شرایط پیش‌آمده فقط برای یک ساختمان منفرد صادق باشد؛ یعنی اگر اثر مجموعه‌ای از ساختمان‌ها و مانع‌های دیگر همانند درخت، پل و غیره در شبیه‌سازی بررسی شوند، احتمالاً نتیجه دیگری به دست می‌آید زیرا بخشی از جریان در فضای بسته بین این مانع‌ها به دام می‌افتد. همین موضوع بیانگر لزوم شبیه‌سازی در حالت‌های دیگر می‌باشد.

باتوجه به اهمیت داده‌ها و تفسیر نتایجی که می‌توان از شبیه‌سازی رایانه‌ای به‌دست آورد، پیشنهاد می‌شود شبیه‌سازی‌هایی (مشابه آنچه در این پژوهش ارائه شد) برای هندسه‌های مختلف نظیر پل‌ها و ساختمان‌هایی با شکل‌های ابتکاری صورت پذیرد. می‌توان با بررسی میزان نشست گرد و غبار در شرایط مذکور برای مناطق مستعد تشکیل و وقوع گرد و غبار، در مورد طرز ساخت ساختمان‌ها و سازه‌ها پیش از هرگونه اقدام عملی، ارزیابی‌های لازم را انجام داد. چنین پژوهش‌هایی می‌تواند به یکی از مراحل اصلی اجرای طرح‌های عمرانی در سازمان‌ها و شهرداری‌ها تبدیل شود. با شبیه‌سازی

| ویسکوزیته دینامیکی هوا (Pa.s)  | $\mu$                                     | فهرست نمادها  |
|--------------------------------|---|---|
| ضرایب Closure در مدل آشفستگی   | $\beta$ و $\beta^*$ و $\sigma$ و $\gamma$ | $d_p$ قطر ذرات (m)  |
| چگالی هوا ( $\text{kg/m}^3$ )  | $\rho$                                    | $F_D$ نیروی پسای وارد بر ذره (N)                            |
| چگالی ذرات ( $\text{kg/m}^3$ ) | $\rho_p$                                  | $F_x$ سایر نیروهای حجمی وارد بر ذره به غیر از نیروی وزن (N) |
| تنش برشی (Pa.s)                | $\tau$                                    | $g$ شتاب گرانشی زمین ( $\text{m/s}^2$ )                     |
| پارامترهای آشفستگی             | $\omega$ و $k$                            | $P$ فشار هوا (Pa)   |
| عدد رینولدز                    | $Re$                                      | $u_p$ سرعت ذره (m/s)  |
|                                |   | $u$ سرعت باد (m/s)  |

## References

- [1]. Abbasi, A. (2017). Modeling of dust storm motion and deposition. (M.Sc. thesis, Shiraz University), Shiraz (in Farsi).
- [2]. Ackermann, I. J., Hass, H., Memmesheimer, M., Ebel, A., Binkowski, F. S. & Shankar, U. (1998). Modal aerosol dynamics model for Europe: Development and first applications. *Journal of Atmospheric environment*, 32(17), 2981-2999.
- [3]. Asadi Lotfi, R., Alesheikh, A. A. & Behzadi, S. (2018). A review of the prediction models of dust and collecting techniques data. *Journal of Geospatial Engineering*, 9(4), 51-66 (in Farsi).
- [4]. Bird, R. B., Stewart, W. E. & Lightfoot, E. N. (2002). *Transport Phenomena*. (2nd ed.).
- [5]. Clift, R., Grace, J. R. & Weber, M. E. (2005). Bubbles, drops, and particles. Courier Corporation.
- [6]. Goudie, A. S. & Middleton. N. (2006). *Desert dust in the global system*, (1st Ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [7]. Hashemi, M. M. (2015). Numerical simulation of flow field and air pollutants (dust) with the aim of geometric and architectural optimization. (M.Sc. Thesis, Qom University), Qom (in Farsi).
- [8]. Hashemi M. M., Moayyedi, M. K. & Jabbari, E. (2018). Numerical Simulation of Two-Phase Flow and Study Behavior of Aerosols and Dust Particles under Different Weather Conditions and Sedimentation Process of Dusts. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 8(2), 251-264 (in Farsi).
- [9]. Jabbari, E., Moayyedi, M. K. & Hashemi, M. M. (2016). Three-dimensional modeling of the flow of dust storm and the effect of building architecture on their distribution. 9th National Congress on Civil Engineering, Ferdowsi University (in Farsi).
- [10]. Karegar, M. E., Bodagh Jamali, J., Ranjbar, A., Moeinoddini, M. & Goshtasb H. (2017). Simulation and Numerical Analysis of severe dust storms Iran East. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 3(4), 101-119 (in Farsi).
- [11]. Karegar, M. E., Bodagh Jamali, J., Ranjbar, A., Moeinoddini, M. & Goshtasb, H. (2016). Numerical Simulation of Extreme Sand and Dust Storm in East of Iran, by the WRF-Chem Model Case study; 31 May & 1 June 2011. *Journal of Natural Environment*, 69(4), 1077-1089 (in Farsi).
- [12]. Malakooti, H. & Babahoseini, S. (2015). Formation and Evolution of a heavy dust storm over Middle East: A Numerical Case Study. *journal of Geography and Environmental Hazards*, 12, 53-65 (in Farsi).
- [13]. Moayyedi, M. K., Jabbari, E. & Hashemi, M. M. (2015). Eulerian-Lagrangian model for numerical simulation of flow field and air pollutant particles (dust) Case study: Central library building of Qom University. First National Conference on Sustainable Development in Energy, Water and Environment Engineering Systems. Iran University of Science and Technology. Tehran (in Farsi).

- [14]. Moayyedi, M. K., Jabbari, E. & Hashemi, M. M. (2015). Numerical simulation of the field of flow and pollutants and the effect of building architecture changes on the distribution of dust. 16th Fluid Dynamics Conference, Razi University, Kermanshah (in Farsi).
- [15]. Mohammadi Nejad, S. (2012). Evaluation of remote sensing methods in spatial-temporal analysis of the phenomenon of a recursion and its risk. (M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University), Tehran. (in Farsi).
- [16]. Nikfal, A. H., Karami, S., Ranjbar Saadatabadi, A. & Sehatkashani, S. (2016). Capabilities of the WRF-Chem model in estimating the concentration of dust – A case study of a dust storm in Tehran. *Journal of Environmental Sciences*, 15(1), 115-126 (in Farsi).
- [17]. Nikfal, A. H., Sehat Kashani, S., Karami, S. & Hossein Hamzeh, N. (2017). Evaluation of numerical models of EURAD and WRF-Chem in dust forecast (case study February 2015). 5th conference on air and noise pollution management, Razi Conference Center, Tehran (in Farsi).
- [18]. Pourdeihimi S. & Bina M. A. (2015). Study of the Effect of Building Orientations on Reducing Dust in Building Groups, Case Study among Buildings in Dezful Urban Areas. *Journal of Iranian Architecture Studies*, 1(6), 41-63 (in Farsi).
- [19]. Rashki, A. (2012). Seasonality and mineral, chemical and optical properties of dust storms in the Sistan region of Iran, and their influence on human health (Doctoral dissertation).
- [20]. Wilcox, D. C. (2008). Formulation of the k-w turbulence model revisited. *Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 46(11), 2823-2838.

## Study and simulation of the movement and settlement of particles smaller than 200 microns under various wind velocities using Fluent software

1- A. Abbasi, Ph.D. Student of Chemical Engineering, School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Shiraz University

2- M. R. Malayeri, Professor of Chemical Engineering, School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Shiraz University

malayeri@shirazu.ac.ir

3- P. Setoodeh, Assistant Professor of Chemical Engineering, School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Shiraz University

Received: 28 July 2018

Accepted: 17 June 2019

### Abstract

Dust storm and its mitigation require in-depth knowledge of prevailing parameters and their interaction. Accordingly, study of dust storm motion and its deposition have special significance. Among the dust storm studying methods, simulation is important because of its lower cost and independency on experiment or satellite. The goal of this study was to simulate the motion and deposition of clay dust storm particles with size of 0.001 to 200 micron affected by wind speed of 1, 3, 10 and 20 m.s<sup>-1</sup> on a smooth land and hypothetical obstacles with a height of 6 and 12 m. Gambit and Fluent are used for creating the simulation environment and solving the continuity and Navier-Stokes equations coupled with turbulence intensities equations. According to the results, wind speed is a negative factor for dust storm particle deposition on earth and obstacle surfaces and it is independent of the obstacle height. Therefore, particles under one micron remain primarily in the air and they deposit lower than 10 percent, so they can transfer to farther distances. The larger the particles, the more efficient the gravitational mechanism in their deposition phenomena; such a way that the deposition calculated more than 30 percent for particles larger than 100 microns. At the same wind speed and particle size, the 12m obstacle postpones the deposition because of the separation of the flow from the surface and turbulence and it also decreases the deposition of particles under micron to lower than 1 percent. The deposition of these particles doesn't vary with wind speed but the one for particles larger than 10 micron is inversely proportional with wind speed.

**Keywords:** Dust storm deposition, Simulation, Fluent, Wind speed, Particle size, Surface element.