

**M.K. Moayyedi\***

Department of Mechanical  
Engineering, University of  
Qom

**e-mail:** moayyedi@qom.ac.ir

**A. Bashardust**

Graduated B.Sc. in Mechanical  
Engineering, Department of  
Mechanical Engineering,  
University of Qom

**e-mail:** bashardoust69cr7@gmail.com

## **Numerical Simulation of Airflow and Particle Deposition from the Surface of Raw Materials Piles and Studying the Effects of Shape Variations and Free-Stream Velocity in Wind Erosion Reduction**

*Accumulation of consumable or produced materials in outdoor areas and exposed to the air flow is an important issue of environmental concern. Also, wind erosion of raw materials from the storage piles in some industries causes environmental problems and economic consequences. The materials are accumulated in various volumetric shapes in an outdoor environment, which is usually pyramidal and conical. The subject of this study is about the percentage of wind erosion from the surface of the pile and the intensity of the particles deposition due to the free-stream flow passing through the various points of the pile's surface. In this research, the wind erosion or in other words, the movement and deposition of particles from the surface of the pile have been discussed. So, a comparison between the piles with different shapes has been performed according to the reduction of wind erosion. So, a comparison between the piles with different shapes has been performed according to the reduction of wind erosion.*

**Keywords:** Wind erosion rate, cone pile, pyramid pile, Eulerian-Lagrangian Approach, Environmental fluid dynamics.

---

\* Corresponding author

Received 02 April 2019, Revised 30 July 2019, Accepted 18 August 2019.

DOI: 10.22091/ce.2019.4211.1143

## شبیه‌سازی عددی جریان هوا و انتقال ذرات از سطح پشته‌های انباشت مواد اولیه و مقایسه اثرات تغییر شکل و سرعت بر میزان بادبردگی

ذخیره‌سازی مواد مصرفی یا تولیدی در فضای آزاد و در معرض جریان هوا موضوع مهم و قابل بررسی از نظر مسائل زیست‌محیطی است. همچنین بادبردگی مواد از پشته‌های ذخیره مواد اولیه در صنایع، سبب مشکلات زیست‌محیطی و تبعات اقتصادی می‌شود. مواد مورد نظر به شکل‌های حجمی مختلف که معمولاً هرمی و مخروطی می‌باشند، در محیط اتمسفر انباشته می‌شوند. موضوع مورد بررسی، میزان بادبردگی از سطح پشته و شدت بادبردگی ذرات موجود در سطح آن در اثر جریان هوای آزاد عبوری از روی پشته و نقاط مختلف سطح آن می‌باشد. در این پژوهش، موضوع بادبردگی یا به عبارت دیگر، جابه‌جایی و پخش ذرات موجود از سطح مواد انباشته شده و مقایسه اثرات تغییر شکل پشته در کاهش بادبردگی مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل این مسأله از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی به کمک روش حجم محدود استفاده شده است. نتایج حاصل از این پژوهش، مقایسه میزان بادبردگی در قسمت‌های مختلف پشته را به تفکیک در هر حالت مشخص می‌کند. بر مبنای نتایج حاصل، نقاط بحرانی از نظر بادبردگی بر روی پشته در حالت‌های مختلف شناسایی شده است.

**واژگان کلیدی:** نرخ بادبردگی، پشته مخروطی، پشته هرمی، الگوی اویلری-لاگرانژی، دینامیک سیالات محیط‌زیستی.

محمد کاظم مؤیدی\*

استادیار، آزمایشگاه پژوهشی  
توربولانس دینامیک سیالات  
محاسباتی و احتراق، بخش  
مهندسی مکانیک، دانشگاه قم  
پست الکترونیک:

moayyedi@qom.ac.ir

علی بشردوست

دانش‌آموخته کارشناسی  
مهندسی مکانیک، گروه مهندسی  
مکانیک، دانشگاه قم  
پست الکترونیک:

bashardoust69cr7@gmail.com

### ۱- مقدمه

پشته‌های<sup>۱</sup> ذخیره مواد اولیه که به‌عنوان مواد خام فرآورده‌های پایین‌دستی تلقی می‌شوند، اشاره کرد. اهم مطالعات انجام گرفته در زمینه انتقال مواد سطحی از سطوح شیبدار، عمدتاً مربوط به تپه‌های شن و ماسه<sup>۲</sup> می‌باشد. انتقال ذرات شامل سه مکانیزم متداول می‌باشد: برخاستن<sup>۳</sup> از سطح زمین، پراکندگی اتمسفری<sup>۴</sup> و رسوب مجدد بر روی سطح<sup>۵</sup>. علت اصلی نگرانی، اثرات زیست‌محیطی انتشار گردوغبار که شامل هدررفتن مواد اولیه و انرژی، تنزل کیفیت هوا و آسیب به سلامتی انسان

منابع آلاینده در صنعت را می‌توان در قالب دو گروه کانونی و غیرکانونی طبقه‌بندی نمود. منابع کانونی به‌صورت نقطه‌ای (دودکش) یا خطی (بزرگراه) می‌باشند و منابع غیرکانونی به‌صورت سطحی بررسی شده و به همین دلیل روش‌های برآورد، مدل انتشار، و کنترل آلودگی آنها پیچیده‌تر می‌باشد. از جمله منابع غیرکانونی می‌توان به

<sup>1</sup>- Piles

<sup>2</sup>- Sand dunes

<sup>3</sup>- Uplift

<sup>4</sup>- Atmospheric dispersion

<sup>5</sup>- Deposition

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۳، بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۰۸، پذیرش: ۱۳۹۸/۰۵/۲۷.

(DOI): 10.22091/cer.2019.4211.1143 شناسه دیجیتال

جهت وزش باد روی آنها پرداخته و در نهایت نتایج به‌دست آمده از نرم‌افزار انسیس CFX را با نتایج آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA<sup>۹</sup>) مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که بسته به جهت وزش باد، مقادیر بالاتر اصطکاک در هر واحد سطح، یافت شده اما با توجه به حجم بالای ذخیره‌سازی در هر مترمربع، تعادل مثبت به پشته نیمه چرخشی است [۹].

از آنجایی که انتشار گازهای گلخانه‌ای از محوطه‌های ذخیره‌سازی، یک مشکل چند متغیره است که باید حل شود؛ در سال ۲۰۰۹، دیگو<sup>۱۰</sup> و همکاران با استفاده از نرم‌افزار انسیس CFX10 به بررسی همزمان دینامیک سیالات محاسباتی جریان باد و انتشار گردوغبار در پشته‌های ذخیره‌سازی روباز پرداختند. آنها شکل پشته را نیمه چرخشی در نظر گرفته و سرعت باد در ارتفاع‌های مختلف برای پشته ذخیره شده روباز ذغال سنگ را مورد مطالعه قرار دادند. در نهایت، رفتار میدان واقعی بررسی شد. نتایج نشان داد ترتیب دو پشته موازی ثابت می‌کند که چگونه هر پشته می‌تواند تأخیر ایجاد کند. بنابراین اگر پشته‌ها عمود بر جهت باد قرار گیرند، انتشار کل کمتر خواهد بود [۱۰]. حصارهای متخلخل می‌تواند باعث کاهش میزان گردوغبار از پشته‌های ذخیره‌سازی در محوطه‌های روباز شود، اما تأثیر حفاظت آنها بستگی به ساختار جریان هوا در اطراف پشته و توزیع تنش برشی در هر سطح دارد. در سال ۲۰۱۴، سونگ<sup>۱۱</sup> و همکاران، به شبیه‌سازی عددی ساختار جریان هوا و انتشار ذرات آلاینده در پشت توری (حصار) متخلخل مورد استفاده برای پناهگاه پشته‌های ذخیره‌سازی روباز پرداختند. آنها شکل پشته را مخروط با سطح صاف در نظر گرفتند. در این مطالعه، میدان جریان با استفاده از مدل آشفتگی k-ε شبیه‌سازی شد. نتایج آنها نشان داد که در تخلخل‌های پایین، جریان تجدیدپذیر بوده که در ناحیه بین حصار و

می‌باشد. عوامل متعددی بر فرآیند بادبردگی از پشته‌ها نظیر چگالی توده مواد ذخیره شده، مساحت در معرض باد، محتوای رطوبت، توزیع اندازه ذرات، شکل پشته و سایر موارد تأثیرگذار است؛ اما مهمترین عوامل انرژی باد و ذرات قابل سایش می‌باشند. اولین مطالعات در مورد بادبردگی در سال ۱۹۴۱، درباره حرکت ذرات ماسه توسط باد انجام شد. این کار یک مطالعه فیزیکی درباره حرکت تکدانه‌ای ذرات ماسه توسط باد بود [۱]. مطالعات دیگری در زمینه اثرات جریان باد محیطی روی انتقال ذراتی همچون ریگ‌های روان توسط لانکاستر<sup>۶</sup>، نیومن<sup>۷</sup> و همکاران و پارسن<sup>۸</sup> و همکاران انجام شده است. این تحقیقات، به خوبی رابطه بین شکل ذرات و برهم‌کنش‌های جریان را مشخص کرده و نشان می‌دهند که پدیده انتقال به‌شدت به ساختار ذره و جریان برگشتی بستگی دارد [۲، ۳ و ۴]. مطالعات دیگری در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ در خصوص تأثیر شکل پشته‌ها در میزان بادبردگی از آنها انجام شده است [۵]. حسونود و همکارانش در پژوهشی در سال ۲۰۰۲، به بررسی اثر مواد افزودنی بر کاهش بادبردگی از پشته‌های سنگ آهن با استفاده از تونل باد پرداختند [۶]. در سال ۲۰۱۵ مؤیدی و بشردوست، با استفاده از ترکیب مدل جریان سیال (هوا) و مدل فاز گسسته به شبیه‌سازی عددی میدان جریان و انتقال ذرات آلاینده حول پشته‌های انباشت مواد اولیه پرداختند [۷]. اشرفی و همکارانش، به برآورد میزان بادبردگی از پشته‌های سنگ آهن با دو روش دینامیک سیالات محاسباتی و ون‌کارمن پرداختند [۸]. در سال ۲۰۰۷، پژوهشی درخصوص اثر شکل پشته بر روی فرسایش باد با استفاده از الگوی دینامیک سیالات محاسباتی به شبیه‌سازی ذرات آلاینده و انتشار آنها انجام شد. همچنین محققان، به مقایسه پشته مخروطی و مخروط مسطح (ناقص) و پشته نیمه چرخشی و اثرات

<sup>۹</sup> - Environmental Protection Agency

<sup>۱۰</sup> - Diego

<sup>۱۱</sup> - Song

<sup>۶</sup> - Lancaster

<sup>۷</sup> - Neuman

<sup>۸</sup> - Parson

پشته را به صورت مخروطی در نظر گرفته و به دلیل آنکه ضربه‌های باد، موجب تخریب سطح پشته، پخش ذرات و آلودگی آب دریا می‌شد، در جلوی پشته، یک حصار (توری) قرار دادند. در این پژوهش، تأثیر انواع مختلف حصارها، مانند صاف، منحنی و با شکاف پایین، برای انتشار ذرات به محیط، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. پژوهش آنها نشان داد که بهترین نتایج مربوط به حصار صاف با شکاف پایین بوده و می‌توان با استفاده از این حصار انتشار گردو غبار را به میزان ۶۰ درصد کاهش داد [۱۳]. در یکی از جدیدترین پژوهش‌های انجام شده درباره انتشار ذرات آلاینده روی پشته‌ها، ناگل<sup>۱۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶، به شبیه‌سازی جریان دوفازی اطراف یک پشته استوانه‌ای پرداختند. آنها پشته را به صورت استوانه‌ای در داخل یک حجم کنترل در نظر گرفته و نتایج دو مدل Open Foam و ROULUND را با استفاده از مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$ -SST با یکدیگر مقایسه کردند [۱۴]. در پژوهشی در سال ۲۰۱۵، مدل‌سازی عددی فرآیند برخاستن ذرات گردو غبار از یک پشته صنعتی با هندسه پیچیده انجام شد. در این مقاله، پدیده انتشار ذرات گردو غبار در معادن ذغال‌سنگ و سنگ آهن در بندر کوپر کشور اسلوانی مورد بررسی قرار گرفت. برای انجام این پژوهش، به کمک شبیه‌سازی عددی از روش RANS<sup>۱۴</sup> و مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  استفاده شد. نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی در مدل USEPA برای تعیین عوامل انتشار گردو غبار استفاده گردید. همچنین نتایج نشان داد که قرار دادن موانع متخلخل (حصار) در بین پشته‌ها، در کاهش اثرات باد و انتشار گردو غبار موثر است [۱۵].

در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی عددی به بررسی ساختار جریان هوا در اطراف پشته‌های انباشت مواد اولیه با دو شکل هرمی و مخروطی به همراه

پشته ظاهر شد. همچنین تنش برشی در سمت رو به باد سطح تخت ابتدا کاهش یافته و سپس با افزایش متخلخل افزایش می‌یابد. پیش‌بینی‌های عددی آنها نشان داد که حصار با متخلخل بین ۰/۲ و ۰/۳ مطلوب است. آنها از الگوی دینامیک سیالات محاسباتی برای به دست آوردن میدان سرعت بهره برده و مقادیر بهینه برای کاهش انتشار گردو غبار، ۰/۲ و ۰/۳ بود [۱۱].

از آنجاکه کارخانه‌های فولادی یکپارچه یکی از مهمترین اهداف اروپا برای انتشار گردو غبار است، در طول سال‌ها، بسیاری از سرمایه‌گذاری‌ها و تحقیقات بر روی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای متمرکز شده است. در پژوهشی در سال ۲۰۱۲، محققان به تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای از میزان انتشار گردو غبار پشته ایزوله شده در برابر دو پشته نزدیک به هم پرداختند. آنها شکل پشته را به صورت هرم با مقطع مثلثی با دو نیم‌مخروط در دو طرف آن در داخل یک حجم کنترل در نظر گرفتند. پژوهشگران برای انتشار گردو غبار از مدل USEPA استفاده کردند. سپس الگوریتم حل آن را برنامه‌نویسی و داده‌های جریان را توسط این مدل، پیش‌بینی نمودند. همچنین آنها دو پشته را به صورت موازی و با زاویه ۶۰ درجه نسبت به هم قرار داده و با دو فاصله مختلف از یکدیگر، اثر وزش باد را روی پشته‌ها بررسی کردند. نتایج نشان داد زمانی که پشته‌ها از هم دورتر هستند، انتشار گردو غبار از ذخایر بالادست کمی افزایش می‌یابد. برعکس، تحلیل پایین دست ذخایر نشان داد که با افزایش فاصله، انتشار گردو غبار کاهش می‌یابد [۱۲]. به دلیل اهمیت بالای مطالعات انتشار گردو غبار روی پشته‌های ذخیره معدنی روباز، تورنو<sup>۱۲</sup> و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۱۰، به کمک الگوی دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی کاهش انتشار ذرات برای ذخیره‌سازی روباز پشته‌های معدنی توسط حصارها (توری‌ها) پرداختند. آنها شکل

<sup>13</sup>- Nagel

<sup>14</sup>- Reynolds Average Navier-Stokes

<sup>12</sup>- Torno

داشته ولی مشکلات این روش را به خواص آشفتگی جریان آزاد ورودی ندارد. این مدل رفتار بسیار مناسبی در جدایش جریان و گرادیان فشار معکوس از خود بروز می‌دهد. معادلات مدل  $k-\omega$ -SST در حالت دوبعدی تراکم‌ناپذیر به صورت زیر می‌باشد [۱۶]:

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

معادله‌های بالا در مقایسه با مدل  $k-\omega$  تفاوتی با اهمیت را نشان می‌دهند. در این مدل برای محاسبه  $\varepsilon$  تغییر متغیری به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\varepsilon = C_\mu k \omega = \beta^* \omega k \quad (3)$$

### ۳- مدل انتشار آلاینده‌ها

همانطور که روشن است مسئله مورد بحث در این پژوهش شامل اثرات جریان سیال بر حرکت و در نتیجه غلظت ذرات آلاینده، که به صورت ذرات معلق تحت تأثیر تغییرات سرعت و فشار سیال حرکت می‌کنند، می‌باشد. الگوی مورد نظر مبتنی بر یک رویکرد اوپلری- لاگرانژی می‌باشد. لازم به ذکر است فاز گسسته (ذرات معلق) در دستگاه مختصات لاگرانژی و در بستری از فاز پیوسته (با دستگاه مختصات اوپلری) مدل می‌شود. حرکت ذرات به کمک حل معادله 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 می‌تواند به صورت رابطه (۴) نوشته شود [۱۷]:

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{a} \quad (4)$$

مدل‌سازی انتشار ذرات آلاینده (گردوغبار) با بهره‌گیری از الگوی دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شده است. همچنین به دلیل عدم تقارن هندسی شکل هرمی، میزان اثرگذاری بخش‌های مختلف سطح پشته بر میزان انتشار ذرات آلاینده و پدیده بادبردگی از سطح آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی، به بررسی جریان و انتشار ذرات جامد ریز مقیاس حاصل از پشته‌های انباشت سنگ آهن پرداخته شده است. بدین منظور، از روش شبیه‌سازی عددی مبتنی بر ترکیب الگوی اوپلری- لاگرانژی برای مطالعه رفتار جریان هوا و انتشار ذرات آلاینده بهره برده شده است. برای مطالعه میدان جریان از دو شکل هندسی متداول برای انباشت سنگ آهن استفاده شده و پیرامون اثرات تغییرات سرعت جریان هوا بر ساختار جریان اطراف پشته‌ها و انتشار ذرات آلاینده در اطراف و پایین پشته بحث شده است.

### ۲- معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات حاکم بر جریان تراکم‌ناپذیر شامل معادلات پیوستگی و اندازه حرکت خطی بوده که در فرم بی‌بعد به صورت زیر می‌باشد:

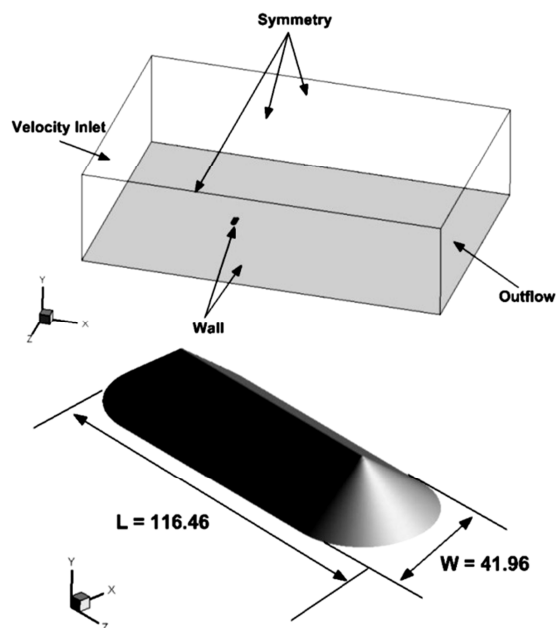
$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0, \\ \frac{D\mathbf{u}}{Dt} &= -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{u} \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $\mathbf{u}$  بردار سرعت،  $p$  فشار و  $\text{Re}$  عدد رینولدز می‌باشد.

### ۲-۱- مدل‌سازی آشفتگی

مدل آشفتگی  $k-\omega$ -SST یک مدل دو معادله‌ای لزجت گردابه‌ای بوده که بسیار متداول است. ویژگی‌های مدل  $k-\omega$  در بخش درونی لایه مرزی باعث می‌شود که این مدل در تمام ناحیه زیر لایه لزج نزدیک دیواره عملکرد بسیار مناسبی داشته باشد. همچنین مدل  $k-\omega$ -SST می‌تواند به عنوان یک مدل آشفتگی رینولدز پایین بدون هیچگونه تابع میرایی اضافی مورد استفاده قرار گیرد. این مدل در جریان آزاد، رفتاری شبیه به مدل  $k-\varepsilon$

مرزی منطبق بر فیزیک مسئله و تا حد امکان دقیق خواهد بود. بدین منظور، می‌بایست شرایط مرزی مناسبی برای هندسه در فواصل مناسب علاوه بر خود پشته انتخاب شود. برای حجم کنترل مورد استفاده به منظور شبیه‌سازی عدی جریان اطراف پشته، از چهار نوع شرط مرزی شامل سرعت ورودی، جریان خروجی، شرط مرزی تقارن و دیواره لزوج، به صورت مشخص شده در شکل ۱، استفاده شده است. برای ورودی (مرز سمت چپ) با در نظر گرفتن فاصله مناسب از جسم از شرط مرزی سرعت ورودی استفاده شده و برای خروجی (مرز سمت راست) شرط جریان خروجی در نظر گرفته شده است. برای پشته و صفحه‌ای که روی آن قرار گرفته از شرط مرزی عدم لغزش با در نظر گرفتن اثرات زبری متناسب با شرایط واقعی استفاده شده است. برای مرزهای اطراف نیز از شرط مرزی تقارن بهره گرفته شده است.



شکل ۱- شرایط مرزی برای جریان اطراف پشته هرمی و مخروطی و مشخصات هندسی پشته هرمی

## ۵- نتایج

در این بخش، نتایج حاصل از این پژوهش ارائه شده است. بدین منظور از شبیه‌سازی عددی جهت بررسی ویژگی‌های میدان جریان و انتقال ذرات آلاینده استفاده

شده است. شتاب ناشی از هر نیروی اضافی بوده و  $F_D$  نیروی پسا بر واحد جرم ذره است که در آن:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \quad (5)$$

عدد رینولدز رابطه (۵) به صورت زیر تعریف می‌شود:

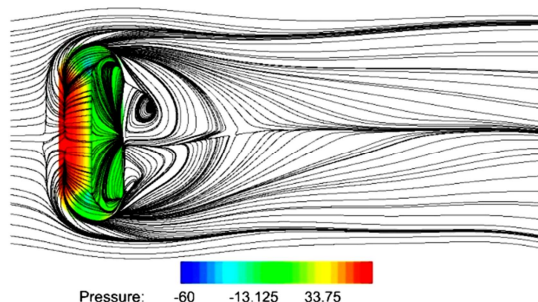
$$Re = \frac{\rho d_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}|}{\mu} \quad (6)$$

نیروهای اضافی شامل نیروهایی مانند نیروی ناشی از جرم مجازی ذره، نیروی ناشی از حرکت در دستگاه دوار، نیروهای حرارتی، نیروی ناشی از گرادیان فشار، نیروی برونین و نیروی سافمن می‌باشد که هر یک تحت شرایط خاصی اهمیت پیدا می‌کنند. در این پژوهش، صرفاً نیروهای ناشی از گرادیان فشار و متأثر از ادی‌های آشفتگی در نظر گرفته شده است [۱۸].

## ۴- روش حل عددی و شرایط مرزی

برای شبیه‌سازی عددی جریان اطراف پشته از روش حجم محدود با تکیه بر حل معادلات ناویراستوکس متوسط‌گیری شده رینولدز استفاده شده است. با توجه به اینکه ماهیت مسئله انتقال ذرات و آلاینده‌ها رفتاری وابسته به زمان دارد؛ بنابراین مدل شبیه‌ساز در حالت ناپایا و برای جریان تراکم‌ناپذیر توسعه یافته است. همانطور که اشاره شده بود به منظور مدل‌سازی اثرات آشفتگی میدان جریان از مدل  $k-\omega$ -SST استفاده شده است. معادلات میدان جریان، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اضمحلال آشفتگی با روش حجم محدود مرتبه دوم بالادست جداسازی شده‌اند. برای شبیه‌سازی حرکت ذرات آلاینده از روش فاز گسسته با در نظر گرفتن حرکت ذرات جامد متأثر از تغییرات میدان سرعت و با لحاظ کردن اثر نیروی برآ ناشی از تغییر فشار اطراف ذره و اثرات نیروهای مربوط به تغییرات دما استفاده شده است. روشن است به منظور شبیه‌سازی عددی میدان جریان و حرکت ذرات آلاینده، نیاز به حل معادلات حاکم بر دینامیک میدان بوده و حل این معادلات مستلزم بهره‌گیری از شرایط

در پایین‌دست پشته مشخص بوده که همراه با کاهش فشار می‌باشد. برگشت جریان باد از کناره‌های پشته به سمت وسط در پشت، نشان‌دهنده جریان‌های ثانویه‌ای است که با توجه به شکل هندسی و آشفتگی جریان هوا در این قسمت به‌وجود می‌آید. این جریان‌های ثانویه با توجه به ابعاد پشته ممکن است بیش از یکبار رخ دهد.



شکل ۲- خطوط جریان همراه با توزیع فشار نسبی روی سطح پشته هرمی

شکل ۳ (الف)، تغییرات زمانی انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده برحسب زمان را در بازه ۳۵ تا ۵۰ ثانیه روی صفحه‌ای در پایین‌دست پشته و در فاصله ۵۰۰ متری از پشته نمایش می‌دهد. چون قطر ذرات ۱۰ میکرون بوده و این ذرات سبک هستند، در ابتدا حجم زیادی از آنها با وزش باد از روی پشته بلند شده و غلظت آنها افزایش می‌یابد. ولی همانطور که انتظار می‌رود با گذر زمان، نرخ غلظت کاهش یافته ولی مجدداً کمی افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از عبور ذراتی است که از سرعت کمتری برخوردار بوده و در نتیجه دارای زمان ماند بیشتری می‌باشند. در شکل ۳ (ب)، تغییرات غلظت ذرات آلاینده برحسب زمان روی سطح زمین و در ناحیه اطراف و پایین‌دست پشته آورده شده است. در این نمودار نیز با گذر زمان، نرخ غلظت کاهش یافته تا به یک مقدار ثابت همگرا می‌شود. مقدار غلظت ثابت شده، نشان‌دهنده میزان ذراتی است که روی سطح زمین انباشته و دچار حالت ایستایی شده‌اند. این مقدار جهت مطالعه پیرامون اثرات زیست‌محیطی ناشی از بادبردگی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

می‌شود. نتایج برای دو الگوی متفاوت و متداول انباشت مواد اولیه ارائه می‌شوند. در مسئله اول، پشته به‌صورت هرمی فرض شده و مدل دیگر، پشته‌ای به شکل مخروط با قاعده دایروی می‌باشد. نتایج حاصل از دو مدل به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های هرکدام با هم مقایسه شده‌اند.

#### ۵-۱- شبیه‌سازی عددی جریان هوا روی پشته هرمی در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

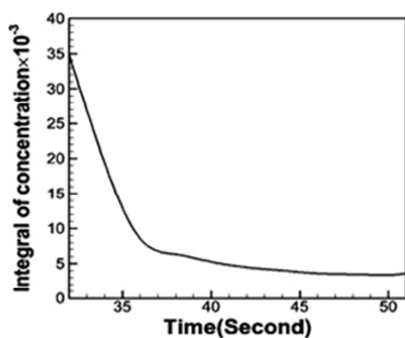
در این بخش به تحلیل جریان اطراف پشته هرمی و انتقال ذرات آلاینده از روی سطح آن پرداخته شده است. در مسائل شبیه‌سازی فاز گسسته، انتخاب شرایط اولیه سهم بسزایی در مسیر حرکت ذرات دارد. با محاسبه دقیق دامنه تغییرات سرعت در نقاط مختلف میدان می‌توان براساس نتایج به‌دست آمده، مسیر موقعیت ذرات و غلظت آلاینده‌ها را در بخش‌های مختلف ناحیه مورد بررسی به‌دست آورد. به‌منظور مدل‌سازی میدان جریان سیال از یک الگوی پایا جهت محاسبه تغییرات سرعت، فشار و غیره در حجم کنترل موردنظر استفاده شده است. پس از همگرایی حل، داده‌های محاسبه شده به‌عنوان مقادیر اولیه جهت شبیه‌سازی مسیر حرکت ذرات و غلظت آلاینده‌ها به‌کار می‌رود. مسئله مورد بحث در این بخش، جریان اطراف یک پشته هرمی شکل می‌باشد.

یکی از شکل‌های متداول در انباشت مواد اولیه در صناعی چون فولادسازی و سیمان، هندسه هرمی می‌باشد. در شکل ۱، مشخصات هندسی پشته هرمی نشان داده شده است. پشته موردنظر شامل ذرات سنگ آهن بوده که مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ آورده شده است.

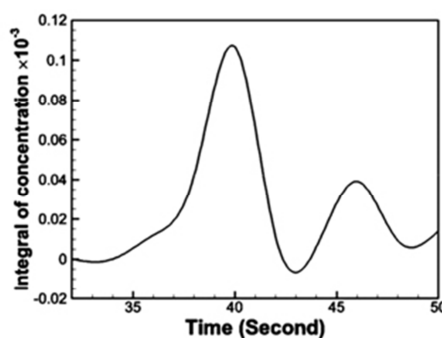
جدول ۱- مشخصات ذرات جامد

جنس ذرات	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	قطر (بر حسب میکرون)
سنگ آهن	۸۰۰۰	۱۰

شکل ۲، خطوط همتراز فشار نسبی روی سطح پشته همراه با خطوط جریان در اطراف پشته را نشان می‌دهد. ناحیه جریان برگشتی در این شکل نیز به وضوح



(ب)



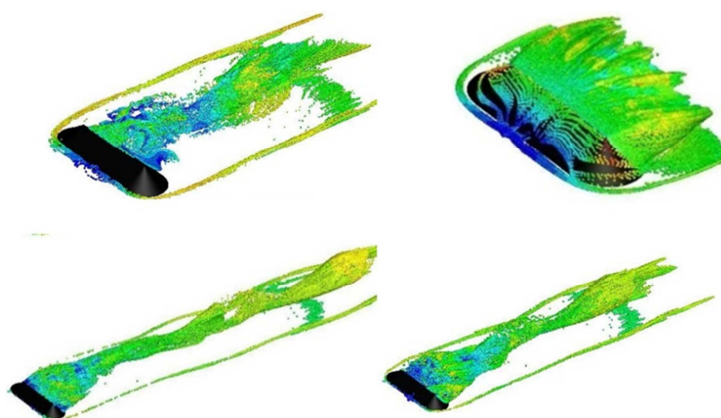
(الف)

شکل ۳- تغییرات انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده عبوری (الف) از صفحه  $x=50.0\text{ m}$ ، (ب) روی سطح زمین برحسب زمان (ثانیه) در

ناحیه پایین دست پشته هرمی

میدان جریان در پایین دست پشته منتشر می شود. دلیل انتخاب این بازه زمانی برای انتشار منبع ذرات آلاینده می تواند به حالتی تشبیه شود که وزش باد در مدت زمان محدود و سپس جابه جایی ذرات ناشی از آن صورت می گیرد. در ادامه، تنها حرکت ذرات جدا شده از سطح پشته حائز اهمیت بوده و مدت زمانی باقیمانده صرفاً برای دنبال کردن ذرات آلاینده از سطح پشته می باشد.

در شکل ۴، مسیر انتقال ذرات آلاینده در گام های زمانی مختلف نمایش داده شده است. به منظور مدل سازی انتقال آلاینده ها، منبع انتشار گردوغبار روی سطح پشته برای یک بازه زمانی ۳ ثانیه ای در نظر گرفته شده و سپس به مدت ۴۷ ثانیه حرکت ذرات دنبال و شبیه سازی شده اند. همانطور که روشن است با گذر زمان، ذرات بیشتری از سطح پشته جدا شده و با توجه به ساختار



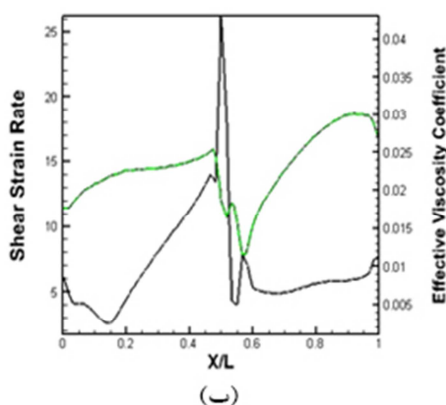
شکل ۴- مسیر انتقال ذرات گردوغبار از روی پشته هرمی در گام های زمانی مختلف، (رنگی شده برحسب مقدار سرعت)

افزایش می یابد. در ناحیه پایین دست پشته به دلیل افزایش سرعت، در اثر جدایش ایجاد شده روی سطح پشته، مقدار ضریب اصطکاک سطحی به واسطه کاهش تنش برشی کاسته می شود. در بخش انتهایی سطح پشته در ناحیه پشت به باد، ضریب اصطکاک دوباره افزوده شده که ناشی از افزایش ضریب لزجت مؤثر متأثر از اثرات آشفتگی جریان می باشد. در این موقعیت، با توجه به نمودار توزیع نرخ کرنش برشی، شکل ۵ (ب)، مقدار آن تقریباً ثابت

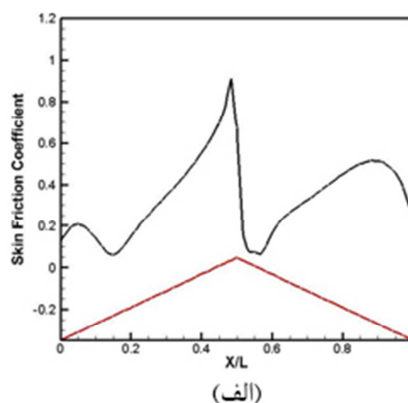
در شکل ۵ (الف)، تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برحسب مکان در صفحه  $z=0$  روی پشته هرمی نشان داده شده است. در سطح جلویی پشته به دلیل وجود ناحیه پرفشار ناشی از برخورد جریان هوا بر سطح آن، سرعت در طول پشته به سمت قله آن از یک مقدار کم شروع شده و به یک مقدار افزوده شده خواهد رسید. واضح است که در اثر کاهش سرعت، اثرات ناشی از نیروهای لزج افزوده شده در نتیجه مقدار ضریب اصطکاک سطحی روی سطح پشته



ضریب لزجت موثر جریان می‌باشد.



بوده و در نتیجه تنش برشی بیشتر متأثر از تغییرات



شکل ۵- تغییرات ضریب اصطکاک سطحی برحسب مکان (الف) مقایسه نرخ کرنش برشی و ضریب لزجت موثر جریان (ب) در صفحه  $z=0$  روی پشته هرمی

## ۲-۵- شبیه‌سازی عددی جریان هوا روی پشته هرمی در سرعت ۷ متر بر ثانیه

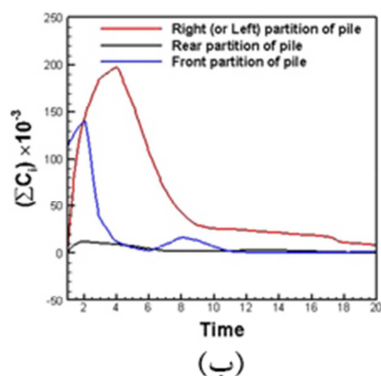
همان‌طور که در این نمودار مشخص است، مجموع غلظت ذرات آلاینده روی این صفحه از دو گوشه راست و چپ پشته در مقایسه با سطوح پشتی و جلویی پشته، مقدار خیلی بیشتری دارد. همچنین از مقایسه این نمودارها با یکدیگر نتیجه می‌شود که میزان بادبردگی، ایجاد نواحی گردبهای و ناحیه و یک به ترتیب از دو گوشه راست و چپ پشته و بعد سطح جلویی و در نهایت سطح پشتی پشته، شکل می‌گیرد. نکته قابل ذکر این است که محور عمودی سمت راست مربوط به تغییرات مقدار غلظت حاصل از دو گوشه سمت راست و چپ پشته می‌باشد. همچنین از مقایسه این نمودارها با یکدیگر دریافت می‌شود که میزان بادبردگی بیشتر، شروع آشفته‌گی‌ها و تشکیل جریان‌های برگشتی به ترتیب از دو گوشه راست و چپ پشته و سپس سطح جلویی و در نهایت سطح پشتی پشته، شکل می‌گیرد.

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان هوا اطراف پشته هرمی در سرعت ۷ متر بر ثانیه و انتقال ذرات آلاینده از روی سطح آن ارائه خواهد شد. یکی از اهداف مهم این پژوهش، بررسی چگونگی تأثیر مشخصات هندسی پشته در بخش‌های مختلف آن بر میزان انتشار ذرات آلاینده و اصطلاحاً پدیده بادبردگی می‌باشد. بنابراین، در این بخش یک مدل محاسباتی شامل چهار بخش گوشه‌های سمت راست و چپ پشته هرمی و دو سطح جلویی و پشتی، به‌عنوان منابع مجزای انتشار ذرات آلاینده در نظر گرفته شده است. به‌دلیل ساختار هندسی نامتقارن یک‌پشته هرمی، بررسی اثر تغییرات شکل هندسی هر بخش از آن بر میزان انتشار ذرات آلاینده قابل تأمل می‌باشد. نکته‌ای که در خصوص پشته مخروطی و به واسطه شکل متقارن هندسی آن، چندان اهمیتی ندارد. این موضوع به‌ویژه اگر جریان هوا با زاویه به سطح پشته برخورد کند، برای شکل هرمی بسیار مهم‌تر و دارای تأثیر بیشتری بر پدیده بادبردگی خواهد بود.

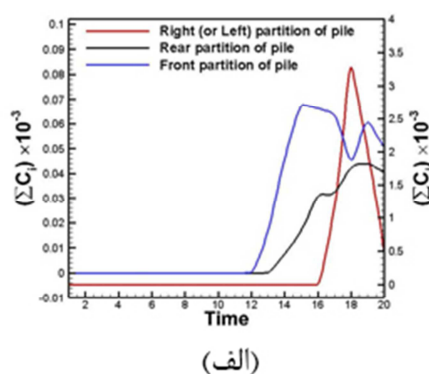
همچنین با دقت در این شکل نتیجه می‌شود که در ابتدای گام زمانی و تا ۱۲ ثانیه پس از آن، مجموع غلظت ذرات آلاینده ثابت و برابر صفر بوده ولی با گذشت زمان تا ۲۰ ثانیه، با افزایش سرعت، افزایش انرژی جنبشی آشفته‌گی و نیز افزایش بادبردگی در ناحیه پایین‌دست جریان، مقدار انتگرال سطحی و مجموع غلظت ذرات آلاینده روند افزایشی دارد.

در شکل ۶ (الف)، مقایسه مجموع غلظت ذرات آلاینده روی صفحه  $x=150\text{m}$  در سطح جلویی، پشتی و دو گوشه راست و چپ پشته نشان داده شده است.

با وزش باد به صورت عمود بر سطح جلویی پشته، حجم زیادی از آنها از روی سطح پشته برخاسته و مجموع غلظت ذرات آلاینده روی سطح زمین، افزایش می‌یابد. لیکن با گذشت زمان، همانطور که انتظار می‌رود این مقادیر کاهش یافته تا به یک مقدار ثابت همگرا شده یا به عبارت دیگر این ذرات آلاینده دچار حالت ایستایی شده‌اند. این مقادیر ثابت شده برای مطالعه حول مسائل زیست محیطی و اقتصادی بسیار حائز اهمیت است.

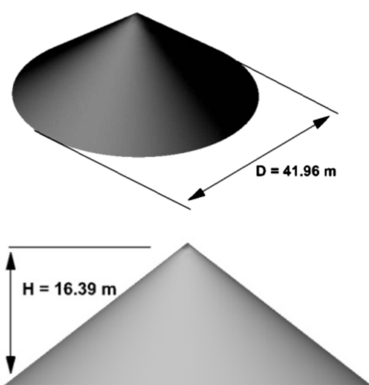


در شکل ۶ (ب)، مقایسه مجموع غلظت ذرات آلاینده روی سطح زمین در سطح جلویی، پشتی و دو گوشه راست و چپ پشته نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها مشخص است، مقدار غلظت ذرات آلاینده روی سطح زمین از دو گوشه راست و چپ پشته در مقایسه با سطوح پشتی و جلویی پشته، مقدار خیلی بیشتری دارد. همچنین می‌توان گفت که در گام‌های زمانی ابتدایی، به دلیل سبک بودن ذرات آلاینده،



شکل ۶- مقایسه مجموع غلظت ذرات آلاینده روی صفحه  $X=150$  (الف) و مجموع غلظت ذرات آلاینده روی سطح زمین (ب) بر حسب زمان در سطح جلویی، پشتی و دو گوشه راست و چپ پشته

در ناحیه پایین دست پشته (پایین دست جریان)، فشار کاهش یافته و طبق رابطه برنولی، سرعت افزایش یافته و نواحی گردابه‌ای و جریان برگشتی تشکیل شده است.



شکل ۷- مشخصات هندسی پشته مخروطی

از آنجایی که انرژی جنبشی آشفتگی در پشت پشته افزایش یافته و با نرخ اضمحلال آشفتگی نسبت عکس دارد، بنابراین نرخ اضمحلال آشفتگی در پایین دست پشته، کاهش می‌یابد. در شکل ۸ و ۹ توزیع شدت

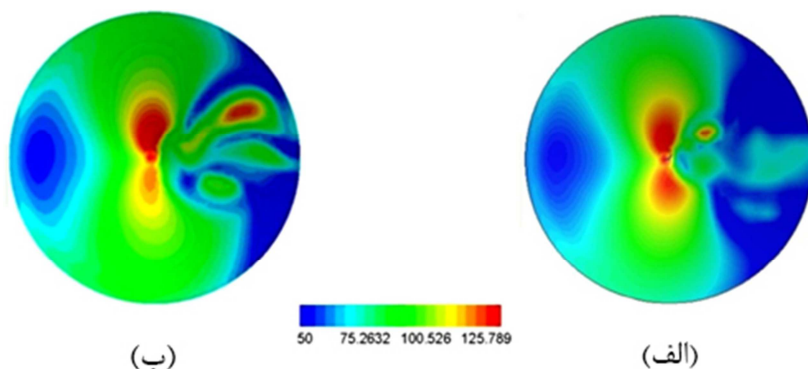
### ۳-۵- شبیه‌سازی عددی جریان روی پشته مخروطی در سرعت‌های ۷ و ۱۰ متر بر ثانیه

قلمرو محاسباتی موردنظر، یک توده انباشته از سنگ آهن به شکل مخروط بوده که در محیط جابه‌جایی با سرعت متوسط جریان هوا به اندازه ۷ و ۱۰ متر بر ثانیه قرار دارد. در شکل ۷، مشخصات هندسی پشته مخروطی نشان داده شده است. به منظور مدل‌سازی انتقال آلاینده‌ها، مشابه با پشته هرمی، منبع تولید ذرات آلاینده روی سطح پشته، برای یک بازه زمانی ۳ ثانیه‌ای در نظر گرفته شده و سپس به مدت ۹۵ ثانیه حرکت ذرات محاسبه می‌شود.

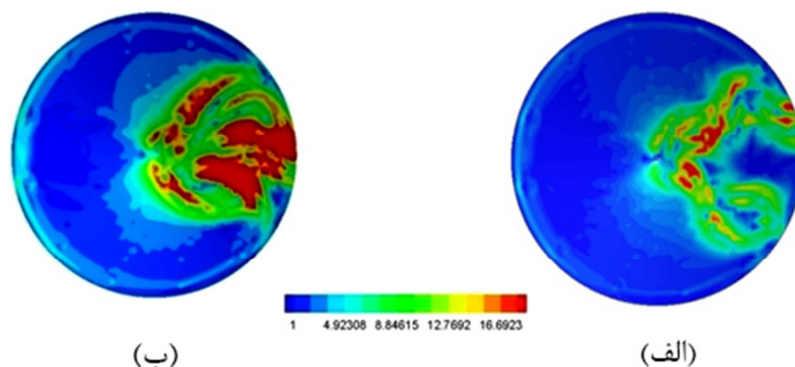
شکل ۸، خطوط هم‌تراز نرخ اضمحلال آشفتگی روی سطح پشته مخروطی را برای دو مقدار سرعت موردنظر نشان می‌دهد. در جلوی پشته، ناحیه سکون ایجاد شده و در نقطه سکون سرعت به صفر رسیده است.

خود اختصاص می‌دهد. افزایش شدت ورتیسیتی محلی معیار مناسبی جهت پیش‌بینی ایجاد لکه‌های آشفته‌گی محلی بوده و در نتیجه احتمال برخاستن و حبس ذرات در این نواحی و تولید توده‌های بزرگ گردوغبار را بیشتر می‌کند.

ورتیسیتی روی سطح پشته‌ی مخروطی به ازای سرعت‌های ورودی جریان به ترتیب ۷ متر بر ثانیه و ۱۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. با افزایش سرعت در پشت پشته، شدت ورتیسیتی نیز افزایش می‌یابد. این افزایش محلی به‌ازای سرعت بالاتر جریان ورودی محدوده‌ی بیشتری را به

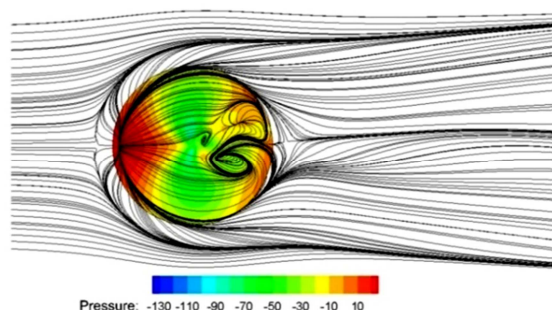


شکل ۸- خطوط همتراز نرخ اضمحلال آشفته‌گی روی سطح پشته‌ی مخروطی برای (الف) سرعت ۷ متر بر ثانیه و (ب) ۱۰ متر بر ثانیه



شکل ۹- خطوط همتراز توزیع شدت ورتیسیتی روی سطح پشته‌ی مخروطی (الف) سرعت ۷ متر بر ثانیه و (ب) سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

در پایین‌دست پشته و در فاصله‌ی ۵۰۰ متری از پشته و روی سطح زمین نمایش می‌دهد.

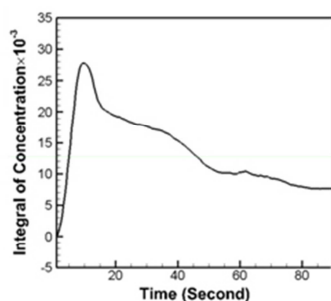


شکل ۱۰- خطوط جریان همراه با توزیع فشار نسبی روی سطح پشته‌ی مخروطی در سرعت ورودی ۱۰ متر بر ثانیه

در شکل ۱۰، خطوط جریان و توزیع فشار نسبی روی سطح پشته برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. در جلوی پشته، فشار افزایش یافته و ناحیه‌ی سکون ایجاد شده است. در ناحیه‌ی پایین‌دست پشته (پایین دست جریان)، فشار کاهش یافته و براساس قواعد جریان سیال (مانند رابطه‌ی برنولی)، سرعت افزایش یافته و نواحی گردابه‌ای و جریان برگشتی تشکیل خواهد شد.

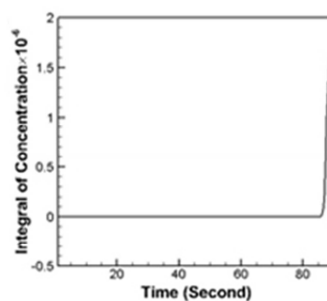
شکل ۱۱ (الف)، تغییرات زمانی انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده برحسب زمان را در بازه صفر تا ۹۸ ثانیه به‌ازای سرعت ورودی ۷ متر بر ثانیه و روی صفحه‌ای

همانطور که انتظار می‌رود با عبور حجم بیشینه اولیه، نرخ غلظت کاهش می‌یابد.



(ب)

به دلیل کمتر بودن مقدار سرعت، مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا ذرات از این صفحه عبور نمایند. لذا در گام‌های زمانی انتهایی، غلظت افزایش می‌یابد؛ ولی



(الف)

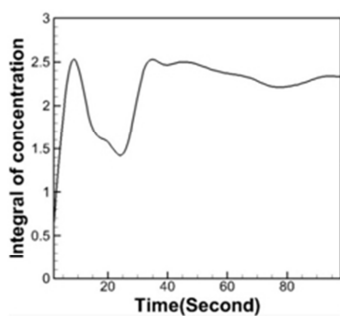
شکل ۱۱- تغییرات انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده عبوری برحسب زمان (ثانیه) روی صفحه  $x=500$  m (الف) روی سطح زمین (ب) در ناحیه پایین دست پشته مخروطی برای سرعت ۷ متر بر ثانیه

از سرعت کمتری برخوردار بوده و در نتیجه دارای زمان ماند بیشتری می‌باشند. در شکل ۱۲ (ب)، تغییرات زمانی انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده برحسب زمان در بازه صفر تا ۹۸ ثانیه روی سطح زمین نمایش داده شده است. در این حالت نیز به دلیل قطر بسیار کوچک ذرات، حجم زیادی از آنها با جریان هوا از روی پشته برخاسته‌اند. به واسطه جریان برگشتی در ناحیه پایین دست پشته بخش عمده‌ای از ذرات روی سطح زمین متوقف شده و با گذر زمان به واسطه شدت یافت نواحی جریان با گرادیان‌های شدیدتر سرعت، غلظت آنها روی سطح زمین کاسته شده و به مقدار ثابتی می‌رسد.

در شکل ۱۱ (ب)، تغییرات زمانی انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده برحسب زمان در همان بازه مشابه به حالت (الف) و روی سطح زمین نمایش داده شده است. در این حالت نیز به دلیل قطر بسیار کوچک ذرات، حجم زیادی از آنها با جریان هوا از روی پشته برخاسته‌اند. به واسطه سرعت کمتر جریان آزاد و جریان برگشتی در ناحیه پایین دست پشته، بخش عمده‌ای از ذرات روی سطح زمین متوقف شده و با گذر زمان به واسطه شدت یافت نواحی جریان با گرادیان‌های شدیدتر سرعت، غلظت آنها روی سطح زمین کاسته شده و به مقدار ثابتی می‌رسد.

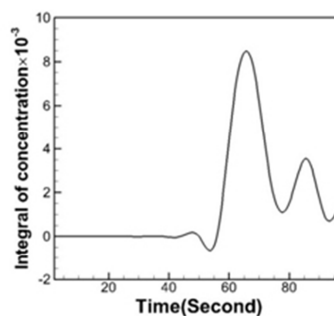
شکل ۱۲ (الف)، تغییرات زمانی انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده برحسب زمان را در بازه صفر تا ۹۸ ثانیه روی صفحه‌ای در پایین دست پشته و در فاصله ۵۰۰ متری از پشته و روی سطح زمین نمایش می‌دهد. برای این صفحه این نکته قابل بیان است که چون قطر ذرات کم بوده (۱۰ میکرون) و در نتیجه سبک هستند، در ابتدا حجم زیادی از آنها با وزش باد از روی پشته برخاسته و غلظت آنها افزایش می‌یابد. ولی همانطور که انتظار می‌رود با گذر در زمان نرخ غلظت کاهش یافته ولی مجدداً کمی افزوده می‌شود. این افزایش ناشی از عبور ذراتی است که

متری از پشته نشان می‌دهد. در گام‌های زمانی آغازین، مجموع غلظت ذرات آلاینده، مقدار ثابتی داشته ولی با گذشت زمان و از ثانیه ۷۵ تا ۹۸، مجموع غلظت ذرات آلاینده روند افزایشی داشته و این ذرات در ناحیه موردنظر تجمع کرده‌اند.



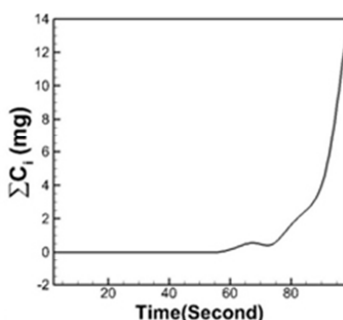
(ب)

بازه ۱۰ تا ۹۸ ثانیه غلظت ذرات آلاینده روی سطح زمین روند کاهشی داشته و به مقدار صفر همگرا شده است. شکل ۱۳ (ب)، تغییرات زمانی مجموع غلظت ذرات آلاینده انباشته شده برحسب زمان را در همین بازه زمانی روی صفحه‌ای در پایین دست میدان جریان و در فاصله ۵۰۰

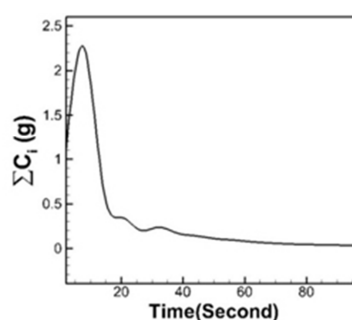


(الف)

شکل ۱۲- تغییرات انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده عبوری برحسب زمان (ثانیه) روی صفحه  $x=50m$  (الف) و روی سطح زمین (ب) در ناحیه پایین دست پشته مخروطی برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه



(ب)



(الف)

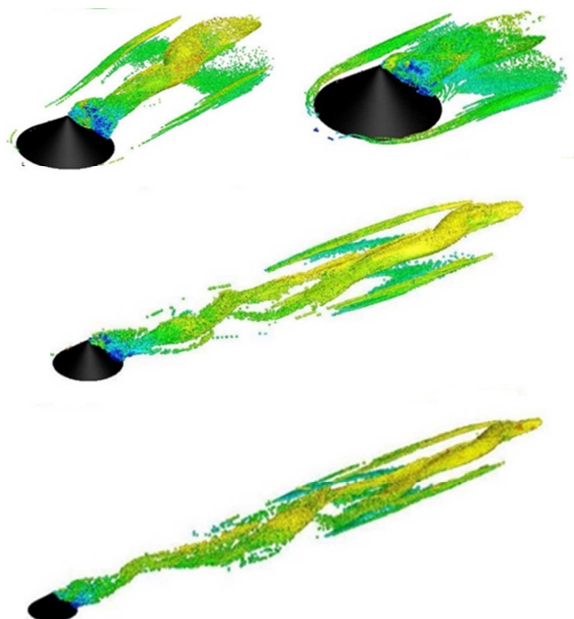
شکل ۱۳- تغییرات مجموع غلظت ذرات آلاینده عبوری برحسب زمان (ثانیه) روی صفحه  $x=50m$  (الف) و روی سطح زمین (ب) در ناحیه پایین دست پشته مخروطی برای سرعت ۱۰ متر بر ثانیه

در شکل ۱۵، مقایسه انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده انباشته شده برحسب زمان (ثانیه) روی سطح زمین در ناحیه پایین دست برای پشته هرمی و مخروطی در بازه ۳۲ تا ۵۱ ثانیه نشان داده شده است. همانطور که مشخص است برای پشته هرمی، مقدار غلظت ذرات آلاینده انباشته شده در سطح زمین در مقایسه با پشته مخروطی بسیار کاهش یافته است. با دقت در این نمودار، واضح است که پشته هرمی از آنجاکه مقدار غلظت ذرات آلاینده انباشته شده حاصل از آن روی سطح زمین کمتر است؛ مدل مناسب‌تری نسبت به پشته مخروطی جهت

با مقایسه مقدار انتگرال سطحی غلظت روی سطح زمین برای پشته هرمی و مخروطی این نتیجه دریافت می‌شود که مقدار بادبردگی از سطح پشته مخروطی بسیار بیشتر از شکل هرمی بوده و لذا شکل هرمی از لحاظ تأثیرات مخرب زیست‌محیطی، طرح مناسب‌تری برای انباشت مواد اولیه می‌باشد. شکل ۱۴، مسیر انتقال ذرات گردوغبار از روی پشته مخروطی در گام‌های زمانی مختلف را نشان می‌دهد. در ابتدای گام زمانی به دلیل سرعت کم، ذرات آلاینده بیشتری در پایین دست پشته وجود دارد. با گذشت زمان و با افزایش سرعت در این ناحیه مقدار غلظت ذرات آلاینده کاهش می‌یابد.

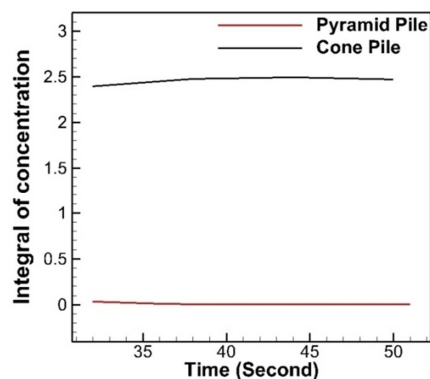
اقتصادی می‌باشد.

انباشت مواد، هم از دیدگاه محیط‌زیستی و هم از دیدگاه



شکل ۱۴- مسیر انتقال ذرات گردوغبار از روی پشته مخروطی درگام‌های زمانی مختلف به ازای سرعت ورودی ۱۰ متر بر ثانیه، (رنگی شده بر حسب مقدار سرعت محلی ذرات)

در این پژوهش یک پشته هرمی و مخروطی از جنس سنگ آهن با ابعاد واقعی می‌باشد. میدان جریان اطراف پشته با به‌کارگیری معادلات دقیق حرکت سیال از روی پشته و حرکت ذرات آلاینده با بهره‌گیری از معادلات حرکت (قانون دوم نیوتن) شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج پژوهش نشان‌دهنده این است که سرعت در سطح پشته هرمی و به سمت نواحی جانبی روند افزایشی داشته و بنابراین میزان بادبردگی در این نواحی به مراتب بیشتر از بقیه قسمت‌های پشته خواهد بود. در خصوص پشته مخروطی به دلیل تقارن شکل هندسی میزان بادبردگی در بخش‌های مختلف به میزان شکل هرمی تفاوت ندارد. نتایج و تحلیل‌های به‌دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که چرخش باد، کاهش فشار، افزایش سرعت و افزایش انرژی جنبشی آشفتگی در ناحیه پایین‌دست پشته رخ داده و افزایش فشار و کاهش سرعت در جلوی پشته اتفاق می‌افتد. این موضوع سبب افزایش سهم بادبردگی در نواحی رو به باد و در قسمت‌های جانبی آن شده ولی میزان حبس ذرات در ناحیه پایین‌دست پشته بسیار



شکل ۱۵- مقایسه انتگرال سطحی غلظت ذرات آلاینده انباشته شده برحسب زمان (ثانیه) روی سطح زمین در ناحیه پایین‌دست برای پشته هرمی و مخروطی

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به مطالعه و شبیه‌سازی میدان جریان و بادبردگی ذرات آلاینده از روی پشته‌های انباشت مواد اولیه و مقایسه اثرات تغییرشکل در کاهش بادبردگی پرداخته شده است. تعیین میزان بادبردگی، پخش ذرات و پیشنهاد استفاده از ساختارهای جدید برای پشته‌ها و بهترین و اقتصادی‌ترین روش تثبیت آنها به کمک شبیه‌سازی عددی قابل پیش‌بینی است. مسئله مورد بحث

بیشتر می‌باشد. همچنین شروع چرخش و بیشترین سرعت در گوشه‌های پشته اتفاق افتاده و در ناحیه کاهش می‌یابد. پایین دست پشته با گذشت زمان نرخ غلظت ذرات آلاینده کاهش می‌یابد.

## مراجع

- [1] Bagnold, R.A. (1941). *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen and Co., London.
- [2] Lancaster, N., Nickling, W. G., Neuman, C. M., & Wyatt, V. E. (1996), "Sediment flux and airflow on the stoss slope of a barchan dune", *Geomorphology*, 17(1-3), 55-62.
- [3] Neuman, C. M., Lancaster, N., & Nickling, W. G. (1997), "Relations between dune morphology, air flow, and sediment flux on reversing dunes, Silver Peak, Nevada", *Sedimentology*, 44(6), 1103-1111.
- [4] Parsons, D. R., Wiggs, G. F., Walker, I. J., Ferguson, R. I., & Garvey, B. G. (2004), "Numerical modelling of airflow over an idealised transverse dune", *Environmental Modelling & Software*, 19(2), 153-162.
- [5] Badr, T., & Harion, J. L. (2005), "Numerical modelling of flow over stockpiles: Implications on dust emissions", *Atmospheric Environment*, 39(30), 5576-5584.
- [6] Torkian, A., Hassanvand, M. S., Sahebnasagh, M. R., Naddaf, K., & Moayyedi, M. K. (2012), "Experimental investigation of the effectiveness of various additives in reducing wind erosion from iron ore piles", *Iranian Journal of Health and Environment*, 5(3), 387-398.
- [7] Moayyedi, M. K., & Bashardoust, A. (2015), "Numerical Simulation of the Flow Field and Motion of Pollutant Particles Around the Raw Materials Piles", 23<sup>th</sup> *International ISME Conference, Amirkabir University of Technology*.
- [8] Ashrafi, Kh., Kalhor, M., Shafie pour, M., & Torkian, A. (2013), "Estimation of Winding rate from Iron Ore Stones Using Computational Fluid Dynamics and Von Karmen Methods", *Iranian Journal of Geophysics*, 7(4), 170-180.
- [9] Torano, J. A., Rodriguez, R., Diego, I., Rivas, J. M., & Pelegry, A. (2007), "Influence of the pile shape on wind erosion CFD emission simulation", *Applied mathematical modelling*, 31(11), 2487-2502.
- [10] Diego, I., Pelegry, A., Torno, S., Toraño, J., & Menendez, M. (2009), "Simultaneous CFD evaluation of wind flow and dust emission in open storage piles", *Applied Mathematical Modelling*, 33(7), 3197-3207.
- [11] Song, C. F., Peng, L., Cao, J. J., Mu, L., Bai, H. L., & Liu, X. F. (2014), "Numerical simulation of airflow structure and dust emissions behind porous fences used to shelter open storage piles", *Aerosol and Air Quality Research*, 14(6), 1584-1592.
- [12] Furieri, B., Russeil, S., Harion, J. L., Santos, J., & Milliez, M. (2012), "Comparative analysis of dust emissions: isolated stockpile vs two nearby stockpiles", *Air Pollution*, 285-294.
- [13] Torno, S., Rodriguez, R., Allende, C., & Toraño, J. (2010), "Dust emission reduction for open storage mineral piles by fences: CFD modeling", *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 136, 121-128.
- [14] Nagel, T., Chauchat, J., Cheng, Z., Liu, X., Hsu, T. J., Bonamy, C., & Bertrand, O. (2017, December), "Two-phase flow simulation of scour around a cylindrical pile", In *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- [15] Novak, L., Bizjan, B., Pražnikar, J., Horvat, B., Orbančić, A., & Širok, B. (2015), "Numerical Modeling of Dust Lifting from a Complex-Geometry Industrial Stockpile", *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 61(11), 621-631.
- [16] Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence modeling for CFD* (Vol. 2, pp. 172-180). La Canada, CA: DCW industries.
- [17] Mihailovic, D. T. (2010). *Advances in environmental fluid mechanics*. World Scientific.
- [18] Sportisse, B. (2009). *Fundamentals in air pollution: from processes to modelling*. Springer Science & Business Media.