

برآورد میزان بادبردگی از پشته‌های سنگ آهن با دو روش دینامک شماره‌های محاسباتی و ون کارمن

خسرو اشرفی^{۱*}، مصطفی کلهر^۱، مجید شفیع‌پور^۱ و ایوب ترکیان^۲

^۱دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران، ایران

^۲انستیتو آب و انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۱۲)

چکیده

بررسی میزان و الگوی پخش ذرات در توپوگرافی‌های گوناگون به منظور تعیین راهبردهای اندازه‌گیری و کنترل آلودگی ناشی از ذرات، دارای اهمیت بسیار زیادی است. در بسیاری از صنایع به واسطه وجود دی‌اکسید گوگرد و سایر آلاینده‌ها، شاهد پدیده بادبردگی هستیم که باعث آلودگی و اتلاف منابع مواد خام می‌شود. در بررسی پدیده بادبردگی، روش‌های اندکی وجود دارد که یکی از بهترین این روش‌ها، روش عرضه شده آژانس حفاظت از محیط زیست امریکا است. در این مرجع فقط به بررسی پتانسیل بادبردگی پشته‌های گوناگون پرداخته شده و در مورد نحوه پخش و توزیع غلظت بحث نشده است. در این مقاله میزان بادبردگی از پشته‌های سنگ آهن صنایع فولادسازی با استفاده از روش‌های عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. از نرم‌افزار فلوئنت و روش تجربی ون کارمن در ترکیب با روش آژانس حفاظت از محیط زیست امریکا برای برآورد میزان بادبردگی در طول دوره یک ماهه از یک پشته هرمی شکل استفاده شده است. نتایج حاصل از هر دو روش با اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در محل در ۱۰ نقطه اطراف پشته مقایسه شده است. به منظور برآورد عددی میزان بادبردگی، هندسه پشته و خصوصیات فیزیکی سنگ آهن موجود در پشته شامل اندازه و توزیع دانه‌بندی ذرات در مدل دینامیکی شبیه‌سازی شده و نیم‌رخ باد در شرایط خنثی لایه مرزی جو بر آن اعمال شده است. در حالت تجربی از روابط آژانس حفاظت از محیط زیست امریکا برای برآورد پتانسیل بادبردگی از پشته استفاده، و سپس نحوه پخش و توزیع آن با روش ون کارمن محاسبه شده است. نتایج هر دو روش در نقاط نمونه‌برداری استخراج و با نتایج اندازه‌گیری مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوی پخش کلی به دست آمده از اندازه‌گیری و روش‌های پیش‌گفته به لحاظ کیفی مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. روش دینامیک شماره‌های محاسباتی از نظر کمی و کیفی تطابق بسیار خوبی با مقادیر اندازه‌گیری، به خصوص در پایین دست جریان داشته است. ضریب تعیین در حالت کلی برابر ۰/۷۱ برای مدل دینامیک شماره‌های محاسباتی و ۰/۳۵ برای روش ون کارمن به دست آمده است. روش ون کارمن در همه نقاط، غلظت آلاینده PM₁₀ را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده به دست می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بادبردگی، پشته، روش‌های عددی، ون کارمن

Estimation of wind erosion emission from iron ore piles using CFD and Von Karman methods

Khosro Ashrafi^{1*}, Mostafa Kalhor¹, Majid Shafiepour¹ and Ayoub Torkian²

¹Faculty of Environment, University of Tehran, Iran

²Institute of Water and Energy, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 11 June 2012, accepted: 3 August 2013)

*Corresponding author:

khashrafi@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

Summary

Open aggregate storage piles are used more and more in industrial sites. In industrial areas, emitted particulate matters from piles of row material can affect the quality of life of workers and employees and also the quality of the environment. Study of dispersion patterns and concentration of particulate matters over a landscape is important for the strategy of monitoring and controlling particulate matter. Within an industrial facility, dust emission may be generated by wind erosion of open aggregate storage piles and therefore, it pollutes the environment and wastes the row materials. Emission of particulate matters from surface of a pile depends on many parameters such as characteristics of wind (e.g. wind speed and wind direction), specifications of particles (e.g. particle diameter, density, shape, etc.) and erosion properties of surface. Therefore, for emission calculation of particulate matters from a pile and also for simulation of dispersion of emitted particles, it is necessary to simplify the physics of this phenomenon. Simplifications have been carried out based on governing equations and also applying the empirical relations obtained by field studies. Based on these theoretical and empirical investigations, a few methodologies are available for atmospheric wind erosion calculations from storage piles of row materials. The U.S. Environmental Protection Agency (EPA) method is one of the most famous approaches to this kind of calculation. It focuses on estimating the wind erosion and it cannot be used for dispersion pattern prediction. On the other hand, some models and methods have been developed to calculate the dispersion of pollutant in near and far distances from sources. One can combine the calculation of particulate matters emission with dispersion models in order to determine the particulate matters concentration at the environment.

In the present work, two methods including the U.S. EPA wind erosion estimating approach combined with Von-Karman's scheme for dust settlement and computational fluid dynamic (CFD) method using Fluent 6.3.2 Software are applied to predict particulate matters dispersion patterns from an iron ore pile. The Von-Karman's method is based on the length and time of the particulate matter settling. In the present work, the concentration of particulate matters in different distances from the source has been calculated using these parameters. In the CFD technique, the geometry of a pile is generated in Gambit Software using a structured mesh tool. The number of the generated mesh on the pile is 104,214. In this study, the flow condition is assumed to be incompressible, turbulent and steady state. Turbulence modeling is carried out based on two types of modeling namely $k-\varepsilon$ and $k-\omega$ theories. Atmospheric wind profile is assumed to be in neutral conditions and defined by a user-defined function (UDF) tool from Fluent Software. The results from the two methods are compared with concentration of particulate matters measured based on 10 points. The maximum concentration position predicted by the CFD approach is more precise than that predicted by Von-Karman's method. Good quantitative and qualitative agreements are observed between the CFD predicted deposition and the measurement results. The determination coefficient for CFD and Von-Karman methods are 0.71 and 0.35, respectively. Also, Von-Karman method underestimates the concentration of particulate matters in all 10 measurement points.

Keywords: Wind erosion, pile, numerical methods, Von Karman

۱ مقدمه

تحت تأثیر قرار می‌دهند که برخی از این عوامل شامل خصوصیات باد (مانند جهت، سرعت، در معرض باد بودن، ارتفاع سطح در معرض باد)، پارامترهای مربوط به ذره (مانند قطر، چگالی، شکل، رطوبت)، وجود مواد

نگهداری مواد در مکان‌های باز روشی متداول برای ذخیره کردن مواد حجیم است. در این شرایط بلند شدن ذرات باید به‌منزله یک مشکل عملیاتی و محیط‌زیستی مدنظر قرار گیرد. عوامل متعددی میزان ذرات تولید شده را

و لئو و لیانگ (۲۰۰۵) به انجام رساندند. این تحقیقات به‌خوبی رابطه بین شکل ذرات و جریان را مشخص و چگونگی ارتباط پدیده انتقال به شدت جریان باد، ساختار ذره، و جریان برگشتی را تعیین می‌کند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که موضوع انتقال ذرات دانه‌ای روی سطوح شیب‌دار یک مسئله کاربردی مهم در موارد متفاوت، از جمله ممانعت از گسترش گردوخاک، فرسایش کشتزارها، و کمی کردن میزان پخش گردوخاک است. تحقیقات دیگری را لئو و لیانگ (۲۰۰۵)، بدر و هاریون (۲۰۰۷) در خصوص تأثیر شکل پشته‌ها بر میزان بادبردگی از آنها به انجام رساندند. تورپین و هاریون (۲۰۰۹) نیز جریان باد روی پشته‌ها را با شبیه‌سازی عددی بررسی کرده‌اند. پارکر و کینزسلی (۲۰۰۴) به بررسی تأثیر توپوگرافی سطح بر میزان و الگوی پخش ذرات با نرم‌افزارهای دینامیک شاره‌های محاسباتی پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که توپوگرافی‌های پیچیده در مقایسه با حالت تخت، دارای الگوی پخش بسیار متفاوتی بوده‌اند و مدل‌های دینامیک شاره‌های محاسباتی به‌خوبی توانسته‌اند نتایج قابل‌قبولی به‌دست دهند. در تحقیقی مشابه، ژانگ و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از کد دینامیک شاره‌های محاسباتی و تغییراتی در الگوریتم‌های محاسباتی آن به بررسی تأثیرات توپوگرافی و پوشش سطحی بر الگوهای جریان باد و پتانسیل میزان بادبردگی پرداخته‌اند. این تحقیقات نشان می‌دهد که علاوه بر مدل‌های تجاری دینامیک شاره‌های محاسباتی استفاده از مدل‌هایی با منابع باز و قابل تغییر نیز می‌تواند کمک شایانی به بررسی عوامل موثر در پدیده بادبردگی کند. علاوه‌براین تحقیقاتی در خصوص توفان‌های شن و بادبردگی در مقیاس منطقه‌ای در چین، استرالیا، روسیه و عراق از سوی دراکسر و همکاران (۲۰۰۱)، لو و شائو (۲۰۰۱)، و هارپر و همکاران (۲۰۱۰) با توجه به روش‌های گوناگون تعیین سرعت اصطکاکی آستانه برحسب

فرسایش‌ناپذیر و پوشش روی پشته، و همچنین میزان دستخوردگی‌ها در سطح پشته در طول سال هستند.

بررسی پدیده بادبردگی بسیار پیچیده است چرا که تعداد متغیرهای بسیار زیادی در آن نقش دارند. بنابراین هر شبیه‌سازی عددی و نظری به‌ناچار دستخوش ساده‌سازی‌های اجباری خواهد شد، اما از طرف دیگر اگر تنها از روش تجربی استفاده شود، فقط شرایط محدودی را می‌توان پوشش داد درحالی‌که برای یک مکان خاص شرایط در عمل در تغییر است.

صنایع فولادسازی از جمله مهم‌ترین و بزرگ‌ترین صنایع کشور محسوب می‌شود. این صنایع به‌علت طیف وسیع آلاینده‌های تولیدی در فرایندهای گوناگون خود، از منابع بالقوه آلودگی هوا در مناطق مجاورند. آلاینده‌های عمده تولیدی در این صنایع شامل PM_{10} ، NO_x ، CO ، CO_2 هستند (آژانس حفاظت محیط زیست امریکا، ۲۰۰۶b). نسبت تولید هر کدام از این آلاینده‌ها در هر مرحله از فرایند تولید فولاد متفاوت است، هرچند در همه مراحل آلاینده PM_{10} ناشی از سنگ آهن بحرانی‌ترین وضعیت را دارد (آژانس حفاظت محیط زیست امریکا، ۲۰۰۶a). سنگ آهن به شکل دانه‌های ریزی به ابعاد تا ۵۰ میکرون است که به‌راحتی در هوا معلق می‌شوند و می‌توانند به مدت زیادی در هوا باقی بمانند. در فرایند فولادسازی سنگ آهن ابتدا در محل‌هایی به شکل پشته ذخیره می‌شود و سپس با نوار نقاله‌ها به قسمت‌های دیگر انتقال می‌یابد.

تحقیقات متعددی در مورد جنبه‌های گوناگون پدیده بادبردگی صورت گرفته‌است. اولین تحقیقات در مورد بادبردگی از پشته‌ها را بگنولد (۱۹۴۱) عملی ساخت. این کار یک بررسی فیزیکی درباره حرکت تکدانه‌ای ذرات ماسه با باد بود. تحقیقات دیگری در زمینه اثرات جریان باد محیطی بر انتقال ذراتی همچون ریگ‌های روان را به ترتیب گرلی (۱۹۷۳)، کاردوس و همکارانش (۲۰۰۵)،

شدید دارد، به طوری که معمولاً دارای نیمه عمری برابر چند دقیقه است (آژانس حفاظت محیط زیست امریکا، ۲۰۰۶b). به عبارت دیگر، سطوح پشته‌ها با مقدار محدودی از ذرات فرسایش پذیر پوشیده شده است. قشر طبیعی موجود روی سطح پشته، ذرات فرسایش پذیر را مهار و باعث کاهش بادبردگی می‌شود (آژانس حفاظت محیط زیست امریکا، ۲۰۰۶b). انتشار ذرات ناشی از بادبردگی به علت دست خوردگی پشته‌ها در یک سال به صورت زیر محاسبه می‌شود (آژانس حفاظت محیط زیست امریکا، ۲۰۰۶b):

$$EF = k \sum_{i=1}^n P_i S_i, \quad (1)$$

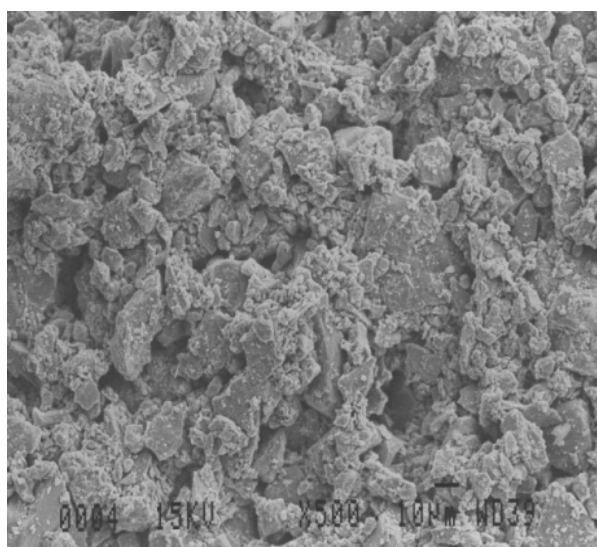
که k ضریب اندازه ذره، n تعداد دست خوردگی‌ها در سال، P_i پتانسیل بادبردگی (g/m^2) برای سریع‌ترین باد بین دست خوردگی i و $i+1$ در سال، S_i مساحت سطح پشته (m^2)، و EF مقدار ضریب انتشار بر حسب گرم بر سال است. تابع پتانسیل بادبردگی برای سطح خشک و در معرض باد به صورت زیر پیشنهاد شده است (آژانس حفاظت محیط زیست امریکا، ۲۰۰۶b):

متغیرهای مکانی و زمانی متفاوت صورت گرفته است که منجر به عرضه مدل‌ها و راهکارهایی برای کاهش میزان بادبردگی شده است.

در این مقاله با استفاده از دو روش نهشت و ن کارمن و مدل دینامیک شاره‌های محاسباتی، پیش‌بینی پخش ذرات از پشته‌های سنگ آهن انجام گرفته است. الگوی پخش و میزان غلظت ذرات در فواصل گوناگون برآورد و با مقادیر اندازه گیری شده میدانی مقایسه شده است.

۲ روش و ن کارمن

بادبردگی‌های ذرات ممکن است از بادبردگی از پشته‌های ذخیره مواد، و سطوح در معرض باد محل‌های ذخیره مواد اولیه در صنایع ایجاد شود. این پشته‌ها و سطوح در معرض باد معمولاً دارای سطوح ناهمگن است و مواد تشکیل دهنده آنها علاوه بر مواد ریزدانه دارای عنصرهای فرسایش ناپذیر (ذرات با قطر بیش از ۱ سانتی متر) نیز هست (آژانس حفاظت محیط زیست امریکا، ۱۹۹۸). نتایج آزمایش‌های میدانی از پشته‌های سنگ آهن و دیگر مواد در معرض باد با استفاده از تونل باد نشان داده است که آهنگ بادبردگی ذرات با گذشت زمان تمایل به کاهش



شکل ۱. نتایج آزمایش SEM بر ذرات سنگ آهن مورد بررسی.

آستانه در بازه‌های متفاوت عدد رینولدز اصطکاکی عرضه شده‌اند:

$$u_t^* = \frac{0.129k}{(1.92B^{0.092} - 1)^{0.5}}, 0.03 < B < 10 \quad (۶-الف)$$

$$u_t^* = 0.12k [1 - 0.085e - 0.061(B - 10)], B > 10 \quad (۶-ب)$$

که k برابر است با:

$$k = \left(\frac{\rho_p g D_p}{\rho_a} \right)^{0.5} \left(1 + \frac{0.006}{\rho_p g D_p^{2.5}} \right)^{0.5} \quad (۷)$$

مارتیکورنا و همکاران (۱۹۹۷) رابطه زیر را برای تعیین سرعت اصطکاکی آستانه برحسب قطر ذرات و طول زبری عرضه کرده‌اند:

$$u_t^* = \frac{u_{ts}^* D_p}{f_{eff}} \quad (۸)$$

که D_p قطر متوسط ذرات، f_{eff} نسبت سرعت اصطکاکی موثر، و u_{ts}^* سرعت اصطکاکی آستانه برای سطحی صاف و بدون زبری است. همچنین تحقیقات مشابه دیگری از سوی گیل و همکاران (۱۹۹۸) برای تعیین سرعت اصطکاکی آستانه با استفاده از تونل باد صورت گرفت که رابطه زیر را نتیجه داد:

$$u_t^* = 0.31e^{7.4Z_0} \quad (۹)$$

که Z طول زبری آیرودینامیکی است.

ون کارمن مدت زمان به زمین رسیدن ذرات جدا شده از سطح بر اثر وزش باد را برآورد کرد. او با استفاده از قانون استوکس توانست روابط زیر را برای زمان حرکت و مسافت جابه‌جا شده عرضه کند (ونونی، ۲۰۰۶):

$$t = \frac{81E\mu^2}{2\rho^2 g^2 d_s^4} \quad (۱۰)$$

$$l = \frac{40E\mu^2 u}{\rho^2 g^2 d_s^4} \quad (۱۱)$$

که u سرعت متوسط باد، d_s قطر ذره موردنظر، μ گرانیوی دینامیکی شاره، g شتاب گرانی، ρ اختلاف چگالی ذره و شاره و E ضریب تبدیل هستند. معمولاً

$$P = 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*) \quad (۲)$$

که u^* سرعت اصطکاکی و u_t^* سرعت اصطکاکی آستانه است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$u_t^* = \left(\frac{u_{10}^+}{10} \right) \times \left(\frac{u_s}{u_r} \right) \quad (۳)$$

و u_{10}^+ بیشترین سرعت به‌دست آمده از راه بادسنجی است که در ارتفاع ۱۰ متری از سطح پشته مستقر شده است و از آمار ایستگاه‌های هواشناسی در سال‌های گذشته به‌دست می‌آید. u_s و u_r به ترتیب سرعت باد در ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر از سطح پشته و سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر از پشته در روز اندازه‌گیری هستند.

روابط دیگری علاوه بر رابطه (۳) از سوی محققان گوناگون برای سرعت اصطکاکی آستانه عرضه شده است. اهمیت سرعت بادبردگی آستانه از آن جهت است که میزان بادبردگی ذرات تابعی از انرژی منتقل شده از باد به ذرات است و این میزان انرژی با توان دوم سرعت اصطکاکی آستانه رابطه مستقیم دارد (مارتیکورنا و برگامتی، ۱۹۹۵). بگنولد (۱۹۴۱) رابطه زیر را برای سرعت اصطکاکی آستانه عرضه کرده است:

$$u_t^* = A \left(\frac{\rho_p g D_p}{\rho_a} \right)^{0.5} \quad (۴)$$

که g شتاب گرانی، ρ_p و ρ_a چگالی ذره و هوا، D_p قطر ذرات، و A پارامتر اصطکاکی بدون بُعد است. ایورسن و همکاران (۱۹۷۶) رابطه بگنولد را اصلاح کردند و نیروی چسبندگی بین ذرات را نیز در نظر گرفتند. برای این منظور در ابتدا عدد رینولدز اصطکاکی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$B = \frac{u_t^* D_p}{\nu} \quad (۵)$$

که ν گرانیوی جنبش شناختی هوا است. با توجه به عدد رینولدز اصطکاکی روابط زیر برای سرعت اصطکاکی

(۱۱) است. مطابق با روش آژانس حفاظت محیط زیست امریکا بادیبردگی مستقیماً از توزیع اندازه ذرات و همچنین از بسامد دستخوردگی‌ها متأثر می‌شود. از آنجاکه فرسایش دارای حالت غیرخطی است، بنابراین هر دستخوردگی باید به صورت جداگانه در نظر گرفته شود. در معادله (۲) فرض شده است که ارتفاع زبری به صورت ثابت برابر ۵ میلی‌متر است و نسبت ارتفاع به قاعده پشته نباید از ۰/۲ تجاوز کند. اگر پشته دارای شرایط پیش گفته نباشد یعنی دارای ارتفاع زیادی باشد یا طول زبری آن برابر ۵ میلی‌متر نباشد، باید به چند پشته مجزا تقسیم شود. در این حالت برای تبدیل سرعت‌ها برای استفاده در رابطه (۲) باید ابتدا آنها را به کمک رابطه زیر اصلاح کرد:

$$u^* = 0.1u_s^+, \quad (12)$$

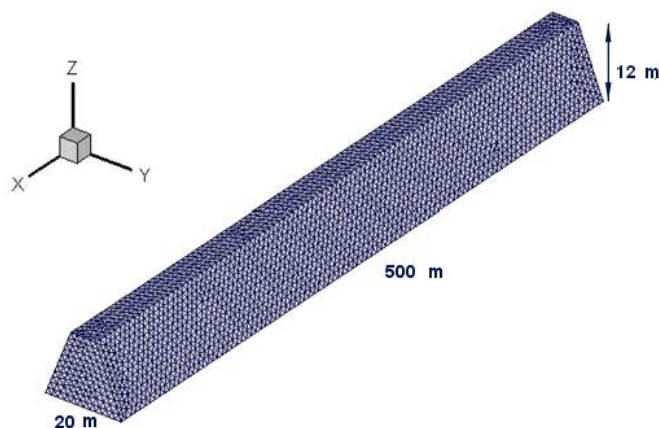
جملات مربوط به روابط بالا قبلاً تعریف شده‌اند. مقادیر u_s به u_r را آژانس حفاظت محیط زیست امریکا با استفاده از تحقیقات تونل باد برای پشته‌های تخم‌مرغی و هرمی تعیین کرده است. از این رو کل سطح پشته به نواحی با u^* ثابت تقسیم شده و در نتیجه می‌توان از معادلات (۱) تا (۹) استفاده کرد. در هر دو روش عددی و تجربی، جهت قرارگیری پشته عمود بر جهت باد فرض شده است.

ضریب E در بازه $10^4 < E < 10^5 \frac{\text{cm}^2}{s}$ قرار دارد. برای استفاده از روابط فوق نیاز به تعیین قطر ذرات و توزیع وزنی آنها است. بدین منظور با استفاده از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی از سنگ آهن موردنظر نمونه‌برداری و تحلیل صورت گرفته است. تصویر میکروسکوپی ذرات سنگ آهن در شکل ۱ و نتایج حاصل از آزمایش میکروسکوپ الکترونی به همراه درصد وزنی ذرات در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. توزیع وزنی اندازه ذرات.

بازه اندازه ذرات برحسب میکرون	درصد وزنی برحسب درصد
۰/۵ تا ۱	۱۲
۱ تا ۲/۵	۱۴
۲/۵ تا ۶	۳۳
۶ تا ۱۰	۲۸
بیشتر از ۱۰	۱۳

نتایج حاکی از اندازه ذرات از زیر یک میکرون تا ۵۰ میکرون است. هرچه میزان ریزدانه‌ها در آلاینده‌ها بیشتر باشد، صدمات ناشی از استنشاق آلودگی بیشتر و ماندگارتر است. روش ون کارمن بر پایه تعیین میزان پراکنش ذرات از پشته‌ها توسط روابط (۱)، (۲)، (۳) و سپس برآورد میزان انتقال و پخش آن با روابط (۱۰) و



شکل ۲. هندسه و ساختار شبکه‌بندی پشته مدل‌سازی شده در روش دینامیک شماره‌های محاسباتی.

۳ روش دینامیک شاره‌های محاسباتی

به منظور شبیه‌سازی پشته‌ها از نرم‌افزار گمبیت برای تولید شبکه‌بندی مدل استفاده شده است. با توجه به اینکه در شبکه ساخت یافته تعداد و نحوه توزیع حجم‌های کنترلی در نقاط گوناگون حوزه محاسباتی قابل کنترل است و همچنین می‌توان شرایط مرزی را نیز به خوبی تعریف کرد؛ لذا از این نوع شبکه‌بندی استفاده شده است (راهنمای نرم‌افزار فلوئنت، ۲۰۰۵). بدین منظور از ۱۰۴۲۱۴ حجم کنترل ساخت یافته استفاده شده است. در شکل ۲ مدل ایجاد شده به همراه شبکه‌بندی صورت گرفته نشان داده شده است. با توجه به قرارگیری پشته در فضای باز جوی، شرایط مرزی برای کاربست نیم‌رخ سرعت در شکل ۳ نشان داده شده است. شرط مرزی روی سطح پشته به صورت دیواره در نظر گرفته شده است؛ چرا که سطح جامد در تماس مستقیم با شاره است (راهنمای نرم‌افزار فلوئنت، ۲۰۰۵). با توجه به اینکه اندازه و نیم‌رخ سرعت بر سطح عمود به پشته معلوم است، شرط مرزی ورودی به صورت سرعت ورودی و شرایط مرزی خروجی به صورت خروجی انتخاب شده است. بعد از شبکه‌بندی پشته، نیم‌رخ متوسط باد برای دوره یک ماهه بر آن اعمال و مدل فلوئنت به صورت دائمی اجرا شده است. با توجه به سرعت جریان هوا و ابعاد پشته، رژیم جریان آشسته است. با توجه به نبود جریان چرخشی محض در مسئله و با توجه به اینکه همه تغییرات در راستای جریان و عمود بر آن اهمیت دارند لذا مدل آشفتگی k-ε مدلی مناسب برای تحلیل این مسئله است (راهنمای نرم‌افزار فلوئنت، ۲۰۰۵). معادلات حاکم بر پخش ذرات در حالت سه‌بعدی شامل معادلات پیوستگی، تکانه و غلظت خواهند بود که در روابط (۱۳) تا (۱۵) نشان داده شده‌اند.

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0, \quad (13)$$

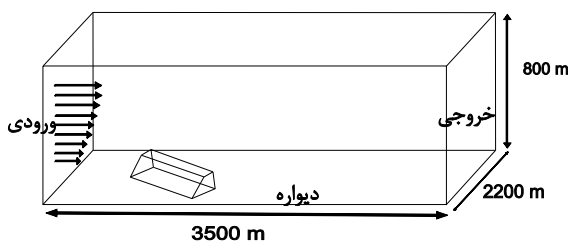
$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial X_j} = -\frac{\partial p}{\partial X_i} + \quad (14)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial X_j} \left[v \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right] - \frac{\partial \overline{u_i u_i}}{\partial X_j} + S_{Mi},$$

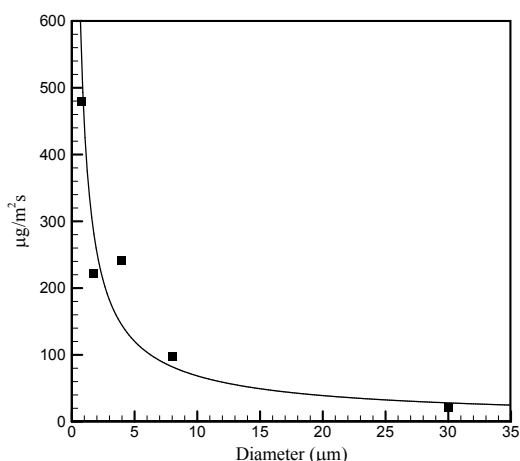
$$\frac{\partial \rho Y}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \nabla Y) = -\nabla \cdot J + R + S, \quad (15)$$

که U_i مولفه سرعت باد در جهت i ام به ازای $i = 1, 2, 3$ ، X_i مختصات x, y, z در جهت i ام، ρ چگالی هوا، v گرانیوی جنبش‌شناختی هوا، $\overline{u_i u_i}$ جملات تلاطمی تکانه، S_{Mi} چشمه تکانه، Y نسبت آمیختگی جرمی PM_{10} بردار سرعت، J بردار شار پخش ذرات PM_{10} $(J_i = K_{Xi} \frac{\partial Y}{\partial X_i})$ که در آن K_{Xi} ضریب پخش در راستای i ام است، R آهنگ واکنش شیمیایی، S آهنگ خالص تولید یا حذف PM_{10} است. در مورد پشته مدل‌سازی شده ساده‌سازی‌هایی قابل اجرا است که بر مبنای آن شرایط مدل‌سازی را براساس جریان نیوتنی تراکم‌ناپذیر با نیم‌رخ دمایی قائم خشی در نظر گرفته‌ایم. اگر چه معادلات ناویر استوکس هر دو نوع جریان آرام و متلاطم را بدون نیاز به اطلاعات اضافی مدل‌سازی می‌کنند اما از آنجا که جریان متلاطم در اعداد رینولدز واقعی دامنه وسیعی از طول‌های تلاطم و مقیاس‌های زمانی را در برمی‌گیرد، به طوری که از کوچک‌ترین سلول تعریف شده نیز کوچک‌تر خواهد شد برای محاسبه این نوع تلاطم نیاز به شبیه‌سازی عددی مستقیم خواهد بود. این امر نیاز به رایانه‌های بسیار قدرتمند دارد، لذا ساده‌سازی‌های پیش‌گفته صورت گرفته است و در عمل تلاطم جریان برحسب کمیت‌های میانگین جریان بیان و محاسبه می‌شوند. برای پیش‌بینی اثرات تلاطم، روش‌های متعددی عرضه شده‌اند که می‌توانند برای مدل‌سازی تلاطم به کار روند. الگوریتم این روش‌ها به نحوی نوشته شده است که نیاز به شبیه‌سازی مستقیم (DNS) و استفاده از مش‌های ریز نباشد. از جمله این روش‌ها می‌توان به

باشند استفاده شده است. این مدل‌ها شامل مدل $\kappa-\epsilon$ با زبری سطح و بدون زبری سطح، و مدل Shear Stress Transport (SST) بر پایه $\kappa-\omega$ بوده است. این مدل‌ها در نرم‌افزار Fluent همراه با نیم‌رخ لگاریتمی باد برای شبیه‌سازی تلاطم به کار رفته‌اند. بهترین نتایج حاصل که دارای بیشترین تعیین با نتایج اندازه‌گیری‌ها بود مدل‌سازی تلاطم با استفاده از مدل $\kappa-\epsilon$ با زبری سطح بوده است.



شکل ۳. نوع شرایط مرزی به کار رفته در اطراف پشته شبیه‌سازی شده به همراه ابعاد مدل.

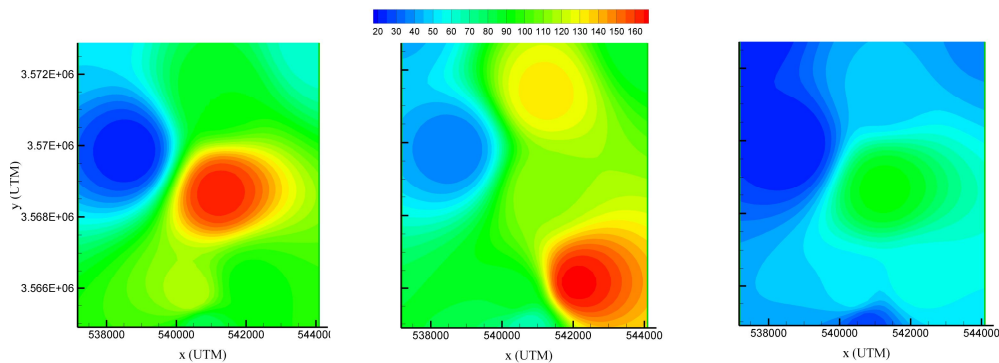


شکل ۴. نمودار تغییرات غلظت ذرات از محور تقارن طولی پشته در روش ون‌کارمن.

جدول ۲. مدت زمان و مسافت متوسط طی شده قبل از نهشت.

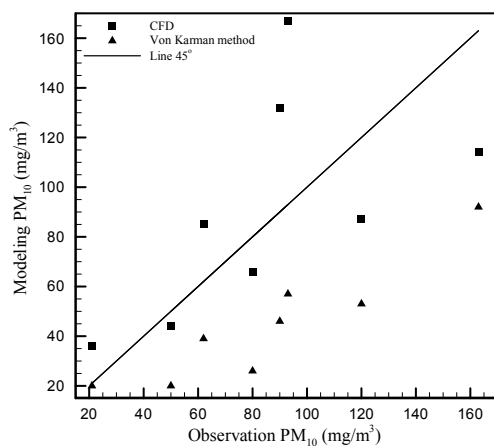
EF (t/y)	T (s)	L (m)	D (micron)
۱۲۶	20000	1000000	479
۵۰	5700	280000	222
۲۳	320	1600	241
۱۱	16	80	98
۵	۰/۵	2	21

روش‌های ZEM، LES، DES و RANS اشاره کرد. روش ZEM در واقع ساده‌ترین مدل برای شبیه‌سازی تلاطم است که حداقل ملزومات موردنظر در مدل‌سازی تلاطم را در نظر می‌گیرد. روش DNS به علت شبیه‌سازی مستقیم کوچک‌ترین تلاطم‌ها و نیاز به اندازه شبکه در مقیاس کولموگروف برای شبیه‌سازی جریانات با عدد رینولدز بزرگ مناسب نیست. در این روش فقط معادلات ناویر استوکس حل می‌شوند. در روش LES تلاطم‌های بزرگ مقیاس مستقیماً شبیه‌سازی شده و تلاطم‌های کوچک مقیاس توسط سایر مدل‌ها (ZEM) حل می‌شوند، بنابراین علاوه بر حل معادلات ناویر استوکس به حل معادلات اضافی برای در نظر گرفتن تلاطم‌های کوچک مقیاس نیاز است. در روش RANS همهٔ تاوه‌ها مدل می‌شوند و هیچ کدام مستقیماً شبیه‌سازی نمی‌شوند، به عبارت دیگر در این روش معادلات ناویر استوکس متوسط‌گیری شده به همراه معادلاتی برای در نظر گرفتن تلاطم در همه مقیاس‌ها باید حل شوند. مورد آخر در کاربردهای مهندسی به نتایج خوبی رسیده است. روش‌های RANS بر پایه محاسبه تاوه‌های ناماناست که تلاطم را به واسطه میانگین اثراتشان با استفاده از تنش‌های رینولدز در نظر می‌گیرند. در این مقاله به منظور استفاده از یک رایانه شخصی و محدودیت‌های آن برای مدل‌سازی تلاطم، از مدل‌هایی که نه بسیار ساده و نه بسیار پیچیده



شکل ۵. هم‌مقدارهای غلظت (میکروگرم بر متر مکعب) ذرات در روش ون کارمن، دینامیک شارهای محاسباتی و اندازه‌گیری‌ها (به ترتیب از راست به چپ).

ذرات بیشتر است اما بیشینه غلظت در محل پشته اتفاق نمی‌افتد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود محل کمینه در روش دینامیک شارهای محاسباتی و اندازه‌گیری‌ها تقریباً بر هم منطبق هستند. برای رسم هم‌مقدارهای غلظت از درون‌یابی به روش کریجینگ استفاده شده است. نمودار تعیین بین نتایج مدل‌سازی و اندازه‌گیری در شکل ۶ نشان داده شده است. ضریب تعیین $R^2=0.71$ برای مدل فلونت و مقدار $R^2=0.35$ برای روش ون کارمن به دست آمده است. مطابق نتایج به دست آمده، روش ون کارمن در همه نقاط مقادیر غلظت PM_{10} را پایین‌تر از میزان اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد. با توجه به رابطه (۱) و (۲) میزان غلظت به دست آمده از روش ون کارمن



شکل ۶. میزان تعیین بین نتایج دو روش مدل‌سازی و اندازه‌گیری‌ها.

۴ نتایج و بحث

در شکل ۴ تغییرات غلظت ذرات نهشت شده برحسب قطر ذرات نشان داده شده است. این توزیع نهشت برحسب درصد وزنی ذرات و همچنین ضرایب انتشار رابطه (۱) محاسبه شده است. با توجه به اینکه هرچه ذرات کوچک‌تر شوند اختلاف بین سرعت اصطکاکی و سرعت اصطکاکی آستانه بیشتر می‌شود لذا بیشترین نهشت را خواهیم داشت. برای تعیین نحوه پخش ذرات با توجه به رابطه‌های (۱۰) و (۱۱) با کاهش قطر مدت زمان نهشت و مسافت طی شده باد تا قبل از نهشت نیز افزایش پیدا می‌کند. در جدول ۲ مدت زمان و مسافت متوسط طی شده قبل از نهشت نشان داده شده است.

در روش ون کارمن برای محاسبه غلظت در هر نقطه با توجه به فاصله نقطه پیش‌گفته تا پشته میزان دامنه قطر ذرات قابل نهشت در آن فاصله محاسبه می‌شود و سپس میزان غلظت با توجه به مدت زمان ته‌نشست (یک ماه) برحسب میکروگرم بر متر مکعب محاسبه شده است. مطابق شکل ۵ مشاهده می‌شود که روش ون کارمن در مقایسه با روش دینامیک شارهای محاسباتی و اندازه‌گیری‌ها در برآورد محل بیشینه دارای تفاوت زیادی است. با توجه به اینکه در این روش ذرات با قطر کمتر در فاصله بیشتری از پشته نهشت می‌شوند و زمان زیادتری نیز برای نهشت نیاز دارند لذا اگرچه ضریب انتشار برای این

کمی برای قطر ذرات میانگین حاصل می‌شود. برای ذرات کمتر از میانگین، بیشینه غلظت در فاصله بیشتری از پشته و بیشینه غلظت ذرات دارای قطر بیشتر از میانگین در فواصل نزدیک پشته اتفاق می‌افتد.

منابع

- Badr, T., Harion, J., 2007, Effect of aggregate storage piles configuration on dust emissions: *Atmos. Environ.*; **41**(2), 360-368.
- Bagnold, R. A., 1941, *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*: Dover Publications., 265 pp.
- Draxler, R. R., Gillette, D. A., Kirkpatrick, J. S., and Heller, J., 2001, Estimating PM₁₀ air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait, and Saudi Arabia: *Atmos. Environ.*, **35**(25), 4315-4330.
- Fluent 6.3.26, 2005, User's Guide.
- Gillette, D. A., Marticorena, B., and Bergametti, G., 1998, Changing the roughness length by saltating grains: experimental assessment, test of theory and operational parameterization: *J. Geophys. Res.*, **103**(D6), 6203-6209.
- Greeley, R., James, D., and Iversen, J. d., 1973, Wind tunnel studies of Martian aeolian processes: NASA Technical Memorandum, NASA TM X-62297, May 1973.
- Harper, R. J., Gilkes, R. J., Hill, M. J., and Arter, D. J., 2010, Wind erosion and soil carbon dynamics in south-western Australia: *Aeolian Research*, **1**(3-4), 129-141.
- Iversen, J. d., White, B. R., 1976, Saltation threshold on Mars: the effect on inter particle force, surface roughness, and low atmospheric density: *Icarus*, **29**(3), 381-393.
- Kardous, M., Bergametti, G., and Marticorena, B., 2005, Aerodynamic roughness length related to tillage ridges: *Annali di Geofisica*, **23**(10), 3187-3193.
- Leow, W., and Liang, L., 2005, Atmospheric boundary layer wind tunnel design: TEC Group in the University of Adelaide, Australia.
- Lu, H., Y., and Shao., Y., 2001, Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modeling system and its applications: *Environ. Modell. Softw.*, **16**(3), 233-249.
- Marticorena, B., and Bergametti, G., 1995, Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme: *J. Geophys. Res.*, **100**(D8), 16415-16430.

رابطه مستقیمی با میزان سرعت باد و ضرایب انتشار دارد. بنابراین علت کوچک بودن برآوردهای روش ون کارمن در همه نقاط را می‌توان به عدم قطعیت روابط تجربی استفاده شده برای برآورد میزان انتشار ذرات از پشته‌ها ارتباط داد.

۵ نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

رابطه نهشت ون کارمن و ضرایب پخش آژانس حفاظت محیط‌زیست امریکا برای بادبردگی از پشته‌ها میزان غلظت ذرات را به صورت تابعی از قطر ذرات برآورد می‌کنند. بنابراین هرچه ذره دارای قطر کوچک‌تری باشد دیرتر ته‌نشین شده و در فواصل دورتری از چشمه انتقال می‌یابد. بنابراین الگوی پخش حاصل از این روش الگویی گسسته و مبتنی بر توزیع دانه‌بندی ذرات خواهد بود، درحالی‌که در عمل به واسطه وجود نیروهایی غیر از نیروی باد، الگوی پخش عملاً پیوسته است و در هر فاصله از چشمه هر قطری از ذرات قابل مشاهده خواهد بود. بنابراین استفاده از روش آژانس حفاظت محیط‌زیست امریکا برای بادبردگی ذرات فقط برای منابعی که دارای توزیع ذرات یکنواخت هستند نتایج قابل‌قبولی به دست خواهد داد. با توجه به مقایسه نتایج هر دو روش با اندازه‌گیری‌های صورت گرفته می‌توان به این نتیجه‌گیری رسید که مدل دینامیک شماره‌های محاسباتی نسبت به مدل تجربی ون کارمن و آژانس حفاظت محیط‌زیست امریکا، قابلیت بهتری برای پیش‌بینی توزیع پخش ذرات در جو دارد. با توجه به تعداد شبکه‌های ایجاد شده در مدل دینامیک شماره‌های محاسباتی و حل تمام‌مقیاس معادلات حاکم بر حرکت شاره، نتایج حاصل از مدل فلونت دقیق‌تر از روش ون کارمن است. با توجه به اینکه روش ون کارمن بر پایه حل معادله اصلاح شده استوکس و همچنین ضرایب انتشار آژانس حفاظت محیط‌زیست امریکا است، لذا همان‌طور که انتظار نیز می‌رود، بیشترین تطابق غلظت از نظر کیفی و

- Stationary Point and Area Sources, Chapter 13, Miscellaneous Sources, Office of Air Quality Planning & Standards.
- U. S. EPA, 2006b, User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model-AERMOD: Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC.
- Vanoni, V. A., 2006, Sedimentation engineering: ASCE Manuals and Reports No. 54, Task Committee for the Preparation of the Manual on Sedimentation, American Society of Civil Engineers. Environmental and Water Resources Institute (U.S.).
- Zhang, Z., Wieland, R., Reiche, M., Funk, R., Hoffmann, C., Li, Y., and Sommer, M., 2011, Wind modelling for wind erosion research by open source computational fluid dynamics: *Ecol. Inform.*, **6**(5), 316–324.
- Marticorena, B., Bergametti, G., Gillette, D., and Belnap, J., 1997, Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and arid areas of the United States: *J. Geophys. Res.*, **102**(D19), 23277-23287.
- Parker, S. T., and Kinnersley, R. P., 2004, A computational and wind tunnel study of particle dry deposition in complex topography: *Atmos. Environ.*, **38**(23), 3867-3878.
- Turpin, C., and Harion, J., 2009, Numerical modeling of flow structures over various flat-topped stockpiles height: Implications on dust emissions: *Atmos. Environ.*, **43**(35), 5579-5587.
- U. S. EPA, 1998, Variable information for estimating air emissions for stone mining and quarrying operations: Technical Assessment Paper.
- U. S. EPA, 2006a, Compilation of air pollutant emission factors: AP-42., Volume I: