

برآورد میزان انتشار آلاینده‌های ذره‌ی در اثر بادبردگی از پشته‌های سنگ آهن صنایع فولاد

نیما افشار مهاجر (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی هندی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

ایوب تorkian (دانشیار)
انستیتو آب و انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی آزمایشگاهی میزان انتشار و شعاع تأثیر ذرات و نیز اثر مرطوب‌سازی بر کاهش بادبردگی پشته‌های سنگ آهن مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از تونل باد، میزان انتشار ذرات پشته از نوع سنگ آهن گل‌گهر - شامل ۶۵٪ هماتیت و به‌صورت منشوری به‌طول ۳۰، عرض ۱۱٫۵ و ارتفاع ۵ سانتی‌متر - در چهار سرعت مختلف باد (۳، ۵، ۷ و ۱۱ متر بر ثانیه) اندازه‌گیری شد. با استفاده از مشاهدات میکروسکوپ نوری و الکترونی، قطر و جرم ذرات منتشره در فاصله‌های مختلف از پشته بررسی شد. همچنین با تغییر درصد رطوبت سطح پشته در محدوده‌ی ۲ تا ۱۰ درصد، میزان کاهش بادبردگی ذرات برآورد شد. در پایان نتایج تجربی به دست آمده با برخی روابط کلاسیک موجود مقایسه و مقادیر معادل برخی تعاریف، نظیر سرعت اصطکاکی، تعیین شد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که ذرات با قطر بزرگ‌تر از $75\mu m$ تطابق بهتری را بین دو حالت نظری و تجربی از خود نشان می‌دهند. همچنین مسافت طی شده و میزان بادبردگی ذرات ارتباط خطی با سرعت وزش باد دارد. ضریب انتشار برای سرعت‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۱ متر بر ثانیه به ترتیب معادل ۴۷۸، ۱۵۲۷، ۲۳۱۵ و ۴۴۱۰ گرم بر مترمربع به دست آمد. «مرطوب‌سازی سطح پشته» روش مناسبی برای کاهش میزان بادبردگی در این تحقیق ارزیابی شد، به طوری که جرم ذرات بادبرده در رطوبت سطح ۱۰٪ و ۲۰٪ به ترتیب ۷۸٪ و ۴۵٪ کاهش نشان داد.

واژگان کلیدی: آلودگی هوا، انتشار ذرات، پشته‌ی سنگ آهن، بادبردگی ذرات، مرطوب‌سازی پشته.

۱. مقدمه

انجام شده‌ی قبلی در ارتباط با پتانسیل آلودگی‌زایی این صنایع، بر آلاینده‌های منتشره از منابع کانونی مانند دودکش‌ها تأکید شده و منابع غیرکانونی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

مواردی چون سرعت و جهت باد، دانه‌بندی ذرات، ارتفاع و مساحت پشته، درصد رطوبت هوا و رطوبت سطح پشته از جمله عوامل مؤثر بر «بادبردگی ذرات» هستند. بادبردگی ذرات را می‌توان در سه حالت حرکتی تبیین کرد. با توجه به سرعت باد اعمال شده به ذرات دارای توزیع اندازه و چگالی مختلف، حرکت ذرات ابتدا با غلتیدن^۱ آغاز می‌شود و سپس با افزایش تنش وارده از طرف جریان با جهشی ناگهانی^۲ از سطح بلند شده در فاصله‌ی دورتر می‌نشینند.^[۱] جهش ناگهانی ذرات با وقوع بادبردگی عادی و برای ذرات ریز تا متوسط صورت می‌گیرد. حرکت ذرات ریزتر در مود سوم به صورت تعلیق^۳ در هوا بروز می‌کند و تا فواصل دورتری منتشر شده و محاسبه‌ی مسافت و زمان به سطح نشستن آنها بسیار پیچیده است.^[۲] از آنجا که انتقال ذرات در حالت‌های دوم و سوم حرکتی باعث آلودگی

به طور کلی می‌توان منابع آلاینده‌ی صنعتی را در قالب دو گروه کانونی و غیرکانونی دسته‌بندی کرد. منابع کانونی به صورت نقطه‌یی (دودکش) یا خطی (بزرگراه)، و منابع غیرکانونی (نشست از اتصالات) به صورت سطحی بررسی می‌شوند. به همین دلیل روش‌های برآورد، مدل انتشار و کنترل آلودگی منابع غیرکانونی پیچیده‌تر است.^[۱]

پشته‌های انباشت سنگ آهن، که به عنوان مواد خام فرایندهای پایین دستی تلقی می‌شوند، از جمله منابع غیرکانونی مجتمع‌های فولاد می‌باشند. انتشار ذرات از این پشته‌ها بر اثر وزش باد، در مدت ذخیره و انباشت آنها و نیز به هنگام تخلیه و برداشت‌شان و انتقال به واحدهای فرایندی از طریق نوارهای نقاله، نه تنها به آلودگی هوا و آسیب‌های زیست‌محیطی به مناطق مجاور می‌انجامد بلکه سبب هدررفتن بخشی از مواد اولیه شده و ضررهای اقتصادی به دنبال دارد. در اغلب ارزیابی‌های

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۱۷/۲۴، اصلاحیه ۱۳۸۸/۸/۴، پذیرش ۱۳۸۸/۸/۱۷.

هوا می‌شود، در این تحقیق سعی بر آن است تا جدایش یک‌بارگی ذرات از سطح پشته بررسی، و صرفاً درستی نتایج دربارگی ذرات معلق در هوا صحت‌سنجی شود.

در سال ۱۹۴۱، ون‌کارمن بر مبنای تحقیقات کلاسیک پیشین، مدت زمان به زمین رسیدن ذرات خاک جدا شده از سطح بر اثر وزش باد را تخمین زد. او با استفاده از قانون استوکس و با در نظر گرفتن تأثیر آشفته‌گی جریان با ضریب تبدیل E ، رابطه‌ی را برای مسافت جابه‌جاشده‌ی آن ارائه داد: [۴]

$$l = \frac{40 E \mu^2 u}{\rho^2 g^2 d_s^3}$$

در این رابطه، u سرعت متوسط باد، d_s قطر ذره‌ی مورد نظر، μ گرانروی (ویسکوزیته) جریان، g شتاب ثقل، ρ اختلاف چگالی ذره و سیال، و E ضریب تبدیل است که معمولاً در بازه $10^4 < E < 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ قرار می‌گیرد.

در سال ۱۹۷۳، در تحقیقی که به سفارش سازمان هوا و فضای آمریکا (ناسا) و با همکاری گروه تحقیقاتی دانشگاه ایالتی آیوا در مورد شبیه‌سازی فرایندهای بادی در سیاره‌ی مریخ صورت گرفت، با کمک تونل باد ذرات با چگالی مخصوص بین ۱/۳ تا ۱۱/۳ و اندازه‌ی ۱۰ تا ۱۳۰ میکرون مورد مطالعه قرار گرفت [۵] و رابطه‌ی کلاسیک بگنالد برای محاسبه‌ی سرعت اصطکاکی آستانه‌ی آنها بررسی شد.

$$u_*^* = A \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_a} g d}$$

نتیجه‌ی این تحقیق دست‌یابی به رابطه‌ی برای محاسبه‌ی A در رابطه‌ی سرعت اصطکاکی بود: [۵]

$$A = \frac{0.373}{\sqrt{\frac{\rho_p \cdot g \cdot d_p}{\rho_a} \times \left(1 + \frac{C_1}{4.6} \left(\frac{u}{u_*^*}\right)^2\right)^{-1}}$$

در سال ۲۰۰۶، محققین دو نمونه پشته با شکل‌های مخروطی^۴ و تخم‌مرغی^۵ را به روش CFD مدل‌سازی کرده و اثر بادبردگی را بر آنها مورد بررسی قرار دادند. [۶] پشته‌ها با ارتفاع ۱۱ m و با شیب کناره‌ی ۳۷ درجه بوده و بادسنج برای اندازه‌گیری سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح پشته و فرض ارتفاع زبری آئرو دینامیکی ۰/۵ cm در نظر گرفته شدند. محققین در این مطالعه دریافته‌اند که سرعت اصطکاکی در نواحی مختلف پشته یکسان نیست و پتانسیل بادبردگی در این نواحی متفاوت است. بدین ترتیب در صورت آگاهی از طول زبری آئرو دینامیکی، توزیع سرعت اصطکاکی در نقاط مختلف این پشته‌ها به دست خواهد آمد. [۷]

در تحقیقی در سال ۲۰۰۵، که با شبیه‌سازی تونل باد انجام گرفت، طول زبری آئرو دینامیکی برای بررسی اثرات بادبردگی بر زمین‌های زراعی محاسبه شد. [۸] در این تحقیق که دنباله‌ی مطالعات هاگن و آرمبراست (۱۹۹۲) بود، نشان داده شد که زبری آئرو دینامیکی پشته‌های مدل‌شده در تونل باد تابعی از ارتفاع پشته و فاصله‌ی پشته‌ها از یکدیگر است. این بررسی‌ها نشان داد که ارتفاع زبری آئرو دینامیکی در پشته‌های با ارتفاع ۵/۷ cm که در فاصله‌ی ۱۶ سانتی‌متری از یکدیگر قرار دارند، برابر با ۱/۵۸ cm است. [۸]

در تحقیق حاضر سعی بر آن است تا میزان و فاصله‌ی انتشار ذرات در شرایط مختلف محیطی (از جمله سرعت باد و رطوبت هوا) و ویژگی‌های موجود یا حاصل از پشته‌ها (مانند رطوبت، چگالی، ترکیب شیمیایی، توزیع اندازه، و پارامترهایی نظیر سرعت اصطکاکی و سرعت اصطکاکی آستانه) محاسبه و تحلیل شوند.

۲. مواد و روش‌ها

در این تحقیق با استفاده از سیستمی برای تولید باد بر پشته‌ی سنگ‌آهن با ابعاد هندسی مشخص، وزن و قطر معادل ذرات بادبرده در سرعت‌های مختلف باد، و نیز تأثیر افزایش رطوبت سطحی بر بادبردگی پشته مورد بررسی قرار گرفت.

۲.۱. سیستم تولید باد

برای وزش باد بر پشته‌ها، از سیستم تونل باد استفاده شد (شکل ۱). بیشینه دبی خروجی از فن $150 \text{ m}^3/\text{hr}$ بود که با اضافه‌شدن کانالی با مقطع دایره‌ی به طول ۱ m و قطر ۴۰ cm، در نهایت جریان آشفته‌ی ایجاد شده توسط فن به جریان باد یکنواختی در پایان این مسیر ۲ متری تبدیل می‌شد. همچنین در جلوی کانال خروجی، میزی به عرض ۱ m و به طول متغیر حدود ۳/۵ m قرار گرفت و پشته‌ی سنگ آهن و ظروف جمع‌آوری ذرات در جلوی آن قرار داده شدند.

۲.۲. پشته و محدوده‌ی انتشار

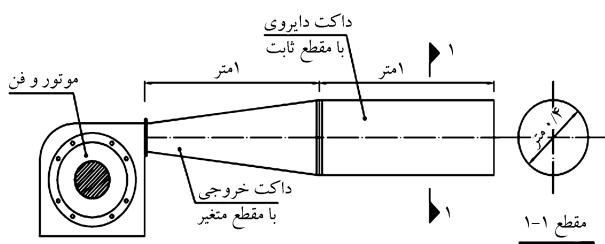
پشته‌ی سنگ آهن در کلیه‌ی آزمایش‌های انجام‌گرفته به صورت منشوری افقی به طول ۳۰، ارتفاع ۵ و قاعده‌ی به عرض ۱۱/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد که با توجه به ارتفاع حدوداً ۵ متری پشته در واحد انباشت و برداشت مجتمع فولاد، مقیاس سینماتیک مدل را می‌توان به طور تقریبی ۱ به ۱۰۰ در نظر گرفت.

در فاصله‌ی حدوداً ۲۰ سانتی‌متری، ظروف سبک و پلاستیکی لیه‌دار برای جمع‌آوری ذرات بادبرده در نظر گرفته شد. برای کلیه‌ی آزمایش‌ها تعداد ۶۰ ظرف در نظر گرفته شد که در ۱۵ ردیف ۴ تایی قرار گرفتند. برای جلوگیری از مشکل بلند شدن این ظروف سبک در حین انجام آزمایش، ظروف با استفاده از چسب نواری به میز متصل شدند.

۳.۲. سنگ آهن

در این تحقیق سنگ آهن معدن گل‌گهر مورد استفاده قرار گرفت. درصد ترکیبات مختلف موجود در نمونه‌ی سنگ آهن که با انجام آزمایش (XRF) تعیین شده، در جدول ۱ آورده شده است.

چگالی ذرات سنگ آهن، با روش افزودن نمونه‌ی ذرات با وزن معلوم به استوانه‌ی مدرج پر از آب و مشاهده‌ی تغییر حجم سطح آب در دو حالت قبل و بعد از اضافه‌شدن نمونه، معادل $4515/4 \text{ kg/m}^3$ به دست آمد. از دو نمونه‌ی سنگ آهن با میکروسکوپ نوری عکس‌برداری شد. با توجه به ضرایب بزرگ‌نمایی عدسی میکروسکوپ (۱۰۰ برابر) و بزرگ‌نمایی هنگام ظهور عکس‌ها (۱/۳ برابر)، تصاویر با خانه‌های مربعی با فاصله‌های ۰/۵ cm شبکه‌بندی شد، و با در نظر گرفتن تعداد خانه‌های اشغال شده توسط هر ذره، قطر معادل آن ذره محاسبه و متوسط قطر ذرات



شکل ۱. نمای سیستم تولیدکننده‌ی باد و خروجی آن.

جدول ۱. نتایج تحلیل شیمیایی سنگ آهن گل‌گهر.

ترکیب	درصد (%)	ترکیب	درصد (%)
Fe_2O_3	۶۱٫۰۸	Na_2O	۰٫۲
FeO	۲۵٫۴۷	P_2O_5	۰٫۱۴
MgO	۴٫۹۸	V_2O_5	۰٫۰۸
SiO_2	۴٫۸۷	TiO_2	۰٫۰۷
Al_2O_3	۰٫۸۹	MnO	۰٫۰۳
CaO	۰٫۸۱	K_2O	۰٫۰۳
S	۰٫۶۱	سایر ترکیبات	۰٫۶۵

انجام گرفت. از آنجا که آب‌پاش مورد استفاده قادر به ایجاد دایره‌ی به قطر مساوی با فاصله‌ی خروجی آب‌پاش تا سطح مقابل خود را داشت، با تغییر فاصله‌ی آن تا سطح پشته سعی شد در حد امکان رطوبت نقاط مختلف سطح پشته یکسان شود. پس از ساخت پشته در این آزمایش، برای تأمین سرعت باد ۱۱ متربرثانیه (بیشینه سرعت باد)، پشته در فاصله‌ی ۹۰ سانتی‌متری از لبه‌ی کانال قرار گرفت و فن برای مدت زمان ۳۰ دقیقه روشن شد. در پایان وزن لایه‌ی بالایی پشته (قسمت بالایی ناپلون و پارچه) اندازه‌گیری، و با مقادیر قبل از آزمایش مقایسه شد. این مرحله از آزمایش‌های بادبردگی در مدت زمان ۳۰ دقیقه و با درصد رطوبت‌های ۲، ۴ و ۱۰٪ صورت گرفت.

۷.۲. سرعت اصطکاکی

سرعت اصطکاکی آستانه‌ی بادبردگی با استفاده از رابطه‌ی بگنالد به دست آمد: [۱۰]

$$u_t^* = A \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_a}{\rho_a} g d}$$

با در نظر گرفتن قطر متوسط ذرات معادل ($33 \mu m$) و ارتفاع زبری آئروپینامیکی معادل $5 mm$ ، مقدار A برابر با 0.36 و در نتیجه سرعت اصطکاکی آستانه $0.39 m/s$ حاصل می‌شود.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. ذرات منتشره

با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام‌گرفته، (جدول ۲) نمودار جرم کل ذرات بادبرده در برابر سرعت باد به صورت شکل ۲ به دست می‌آید. این نمودار نشان می‌دهد که با ضریب همبستگی بالا، این ارتباط خطی است. همچنین نمودار جرم ذرات بادبرده در سرعت‌های مختلف باد و قطر ذرات در فواصل مختلف از مرکز پشته به ترتیب در قالب شکل ۳ و ۴ آورده شده‌اند.

همان‌طور که در ۴ نمودار رسم شده در شکل ۴ دیده می‌شود، جرم کل ذرات بادبرده که سطح زیر نمودار می‌تواند معیاری برای آن باشد، با افزایش سرعت افزایش می‌یابد. همچنین در فاصله‌ی نسبی دور از پشته، با افزایش سرعت باد جرم ذرات بادبرده زیاده‌تر شده است. در آزمایش دوم برای ذرات با فاصله‌ی کم نسبت به پشته مقادیر جرم بادبرده زیاد (حدوداً چهار برابر حالت متناظر آزمایش اول) است که منطقی به نظر نمی‌رسد.

مطابق انتظار، جرم ذرات بادبرده بر اثر افزایش فاصله از مرکز پشته کاهش می‌یابد. ذرات در فاصله‌های بیشتر قطر کم‌تری دارند؛ حجم کره (یا کره‌ی معادل) ذرات با توان ۳ قطر متناسب است. با فرض یکساختی ترکیب و چگالی، جرم ذرات سقوط‌کرده

جدول ۲. مقدار کل ذرات بادبرده در آزمایش‌های انجام‌گرفته.

سرعت (متر بر ثانیه)	مقدار کل ذرات بادبرده (گرم)
۴٫۳	۲۱٫۸۳۶
۵	۶۹٫۸۲۵
۷	۱۰۵٫۸۶۰
۱۱	۲۰۱٫۶۱۸

$33 \mu m$ به دست آمد. همچنین با تهیه و آماده‌سازی دو نمونه‌ی تصادفی از سنگ آهن، با استفاده از میکروسکوپ‌های الکترونی (SEM) و (TEM) اندازه و شکل ذرات بررسی شد.

۴.۲. سرعت جریان

بیشینه سرعت باد واحد انباشت و برداشت با بررسی دامنه‌ی باد غالب در عمده‌ی مناطق استقرار صنایع فولاد و با کمک اطلاعات هواشناسی ایستگاه هواشناسی حدود $11 m/s$ به دست آمد. برای اندازه‌گیری سرعت جریان خروجی (در نزدیکی سطح پشته) از دستگاه سرعت‌سنج جریان عبوری از دودکش‌ها استفاده شد. این دستگاه (KIMO VT100) پس از کالیبره‌شدن، امکان اندازه‌گیری سرعت با دقت دهم متر بر ثانیه را فراهم کرد.

۵.۲. بادبردگی

آزمایش‌های بادبردگی در سرعت‌های مختلف باد و به مدت زمان 30 دقیقه صورت گرفت. آزمایش‌های اول و دوم با سرعت باد در مقطع خروجی به ترتیب $4/3$ و 5 متربرثانیه انجام گرفتند. در این دو آزمایش که سرعت‌های باد در آنها کم‌تر بود، چیدمان ظروف به‌گونه‌ی بود که تا فاصله‌ی حدود 3 متری از مرکز پشته ذرات پراکنده‌شده جمع‌آوری شدند.

در سرعت‌های 7 و 11 متربرثانیه از سیستم فن و کانال با توان مشابه ولی با نوع پره‌های متفاوت استفاده شد. همچنین پشته در فاصله‌ی کم‌تری نسبت به خروجی کانال قرار گرفت و با تغییر در چیدمان ظروف، امکان شکار ذرات در فاصله‌ی بیشتر از 5 متر نیز فراهم آمد.

۶.۲. درصد رطوبت

با افزودن آب و ایجاد رطوبت بکنواخت بر سطح پشته، تأثیر درصد رطوبت‌های مختلف در کاهش میزان بادبردگی ذرات در بیشینه‌ی سرعت (11 متربرثانیه) مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که در تمامی آزمایش‌های بادبردگی انجام‌گرفته هسته‌ی مرکزی پشته تحت تأثیر قرار نمی‌گرفت، پشته‌ی با شیب کناره‌ی مشابه حالات قبل و ارتفاع $3/5$ سانتی‌متر ساخته شده و ارتفاع $1/5$ سانتی‌متر باقی‌مانده از پشته با قرار گرفتن پوشش ناپلونی و پارچه‌ی از بخش مرکزی جدا شد. به این ترتیب با مرطوب‌سازی سطح پوشش، امکان نفوذ آب به هسته وجود نداشت. مرطوب‌سازی پشته با پاشش آب از طریق آب‌پاش با وزن اولیه و ثانویه معلوم

مى يابند. در اىن بىن برخى ذرات كه در آزمائش با سرعت كم تر از جا بلند نشده اند، ممكن است با افزوده شدن سرعت باد از جا كنده شوند. بدين ترتيب اىن ذرات كه بزرگ تر از ساىر ذرات بادبرده اند، در فاصله لى كمى نسبت به پشته به مى رسند. چنان كه پىش تر نىز گفته شد، اىن ذرات با وجود تعداد كم شان، در زياد شدن جرم ذرات بادبرده در آن فاصله بسىار مؤثرند. بنا بر اىن با وجود انتقال نمودار به سمت راست در اىن ۴ آزمائش (افزاىش جرم ذرات بادبرده لى نظىر در فواصل بىشتر از مركز پشته شاهد اىن ادعاست)، به علت گفته شده در فوق، ممكن است در بخش سمت چپ نمودار كه نمايان گر فواصل كم تر نسبت به پشته است، جرم بادبردى افزاىش يابد. اگرچه اىن توضىح مى تواند دلىلى براى افزاىش جرم بادبرده در فواصل كم در آزمائش دوم باشد، ولى به دلىل اختلاف زياد اىن جهش و نىز عدم مشاهده لى اىن روند در آزمائش هاى بعدى، به نظر مى رسد كه خطاىى در اىن آزمائش وجود داشته است. اىن خطا احتمالاً ناشى از باز شدن كامل درىچه لى ورودى فن در اىن آزمائش براى تاىمن سرعت باد ۵ متر بر ثانىه، و اىجاد نوعى آشفتگى در جريان است كه نهاىتاً بر حركت ذرات در فواصل كم تاىر گذاشته و آنها را در فاصله لى كم تر از مقدار پىش بىنى شده به سطح مىز رسانده است.

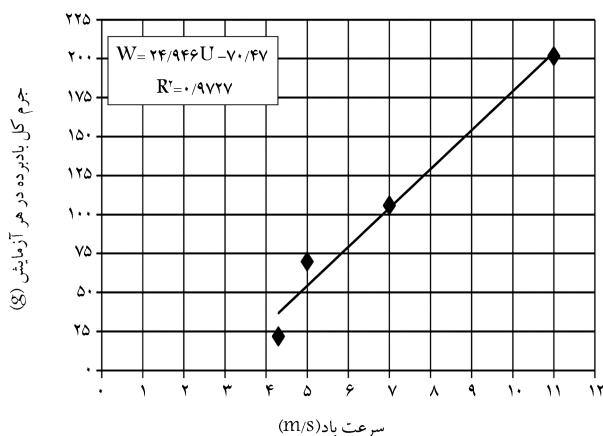
۲.۳. اندازه ذرات

با كمك عكس هاى تهىه شده از ذرات در فواصل مختلف از پشته و در هر آزمائش، مى توان مقدارى مشخص را براى قطر ذرات نشان داده شده به دست آورد. به اىن ترتيب نمودارهاى جداگانه لى براى هر آزمائش از قطر ذرات با توجه به فاصله از مركز پشته حاصل مى شود كه در نمودارهاى نىمه لگارىتمى با مسافت طى شده لى ذرات كه از رابطه لى ون كارمن به دست مى آىد، مقابسه شده اند. (شكل ۵)

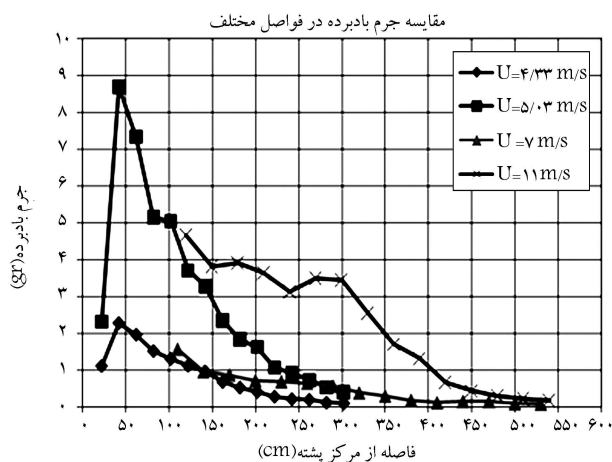
چنان كه پىش تر نىز اشاره شد، نمودارهاى اندازه لى ذرات در مقابل مسافت جا به جا شده در اشكال نشان داده شده تابعى توانى اند. در رابطه لى ون كارمن، فاصله لى طى شده با d^2 ارتباطى معكوس دارد، اما نتاىج آزمائش ات اىن تحقىق در اىن مسافت، با پىش بىنى رابطه لى ون كارمن اختلاف زيادى دارد كه علت آن، تفاوت در طىبع و رزش باد در دو حالت واقعى و تجربى است. در حالت واقعى باد به صورت پىوسته ذره را همراهى مى كند ولى در آزمائش انجام گرفته تنش وارده از طرف باد بر ذرات با دورتر شدن آنها كاهش مى يابد. همچنن در مورد رابطه لى ون كارمن بايد به اىن نكته توجه داشت كه در استفاده از رابطه لى مذكور بايد فرضى ات استوكس صادق باشند.^[۴] در اىن پروژه برخى از اىن فرضى ات، كه از مهم ترىن آنها مى توان به كروى نبودن ذرات اشاره كرد، برقرار نىستند.

بدىهى است با افزاىش سرعت جريان از آزمائش اول به چهارم، مسافت طى شده لى هر ذره با قطر مشخص بىشتر خواهد شد. اىن مطلب در مورد ذرات بزرگ تر كاملاً مشهود است به طورى كه ذره لى با قطر ۷۵ مىكرومتر به ترتيب در فواصل ۱۲۱،۲، ۱۲۸،۳، ۱۲۷،۵ و ۲۱۰،۷ سانتى متر به سطح رسىده است.

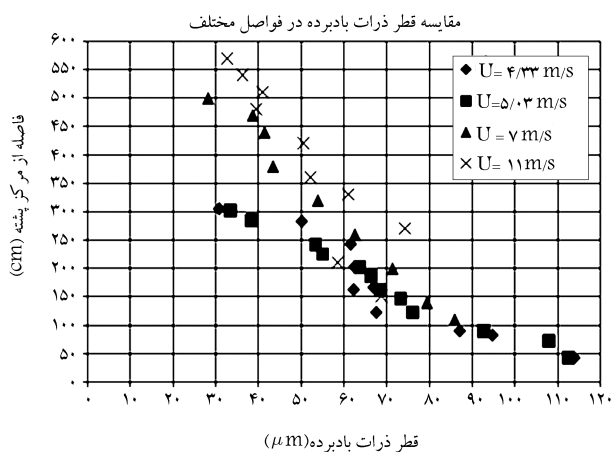
اما در مورد ذرات كوچك تر از ۵۰ μm ، در اىن قاعده ناهمگونى هاى دىده مى شود كه احتمالاً به دلىل برون يابى صورت گرفته و فقدان اطلاعات جمع آورى شده لى مستقىم از نمونه هاست. به عنوان مثال، مسافت طى شده لى ذره لى با قطر ۲۰ μm در آزمائش اول ۹۲۷،۷ cm است و در آزمائش دوم كه انتظار مى رود مقدار بىشترى داشته باشد، به ۹۰۷،۵ cm رسىده است. هرچند همان طور كه گفته شد، احتمالاً جريان در آزمائش دوم آشفتگى بىشترى داشته است كه به بروز ناهمگونى هاى در خروجى هاى آن انجامىده است.



شكل ۲. نمودار جرم كل ذرات بادبرده در سرعت بادهاى مختلف.

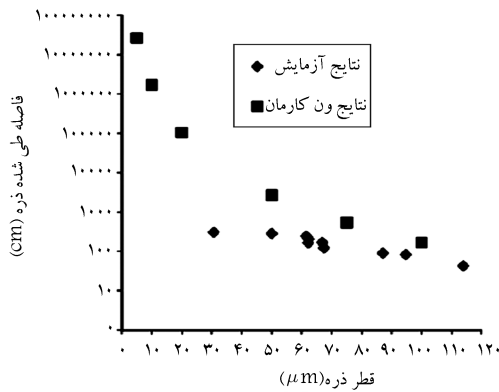


شكل ۳. جرم ذرات جا به جا شده در فاصله هاى مختلف آزمائش ات انجام شده.

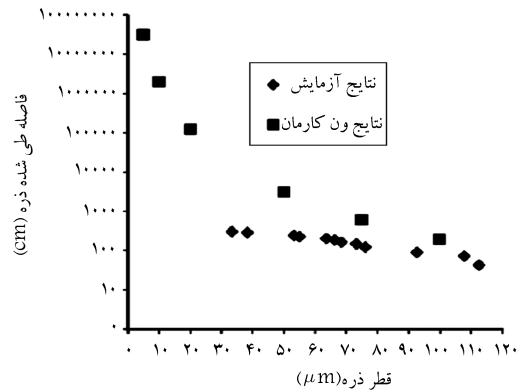


شكل ۴. قطر ذرات جا به جا شده در فاصله هاى مختلف آزمائش ات انجام شده.

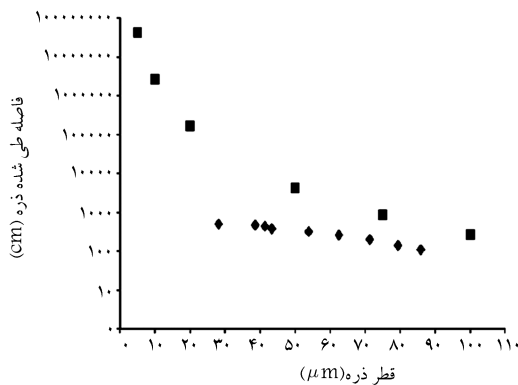
در فاصله هاى كم تر، بىشتر از ذرات قرار گرفته در مسافت هاى دور خواهد بود.^[۱۸] افزاىش جرم بر اثر فاصله، براى بادهاى با سرعت ۴،۳ و ۵ متر بر ثانىه، بىان گر اىن نكته است كه براى به سطح رسىدن بزرگ ترىن ذرات پشته كمىته فاصله لى مورد نىاز حدود ۴۰ سانتى متر است. به طور كللى با افزاىش سرعت، نمودارهاى رسم شده به سمت راست انتقال



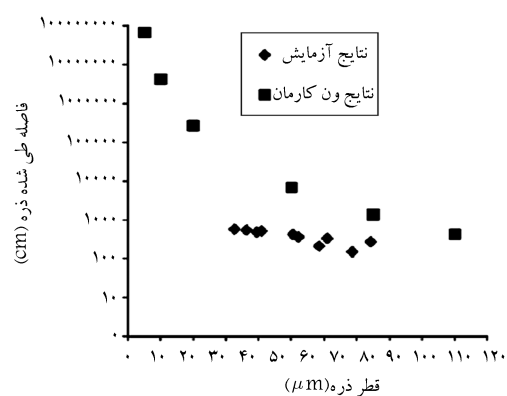
اندازه ذرات در مقابل فاصله از مرکز پشته در آزمایش اول



اندازه ذرات در مقابل فاصله از مرکز پشته در آزمایش دوم



اندازه ذرات در مقابل فاصله از مرکز پشته در آزمایش سوم



اندازه ذرات در مقابل فاصله از مرکز پشته در آزمایش اول چهارم

شکل ۵. نمودارهای اندازه‌ی ذره در مقابل فاصله از پشته، در آزمایشات چهارگانه.

که در آن p برحسب گرم بر مترمربع (gr/m^2)، و سطح جانبی پشته و سرعت‌ها برحسب متر بر ثانیه (m/s) هستند. به این ترتیب می‌توان میزان ذرات منتشره در دوره‌ی زمانی نیم‌ساعته را در تمامی سرعت‌های مورد نظر باد به دست آورد.

۴. شعاع تأثیر ذرات

با استفاده از نتایج به دست آمده می‌توان فاصله‌ی متوسط طی‌شده توسط هر ذره را در آزمایشات چهارگانه در قالب جدول ۲ خلاصه کرد. (شکل ۶)

از نتایج این جدول می‌توان دریافت که مسافت طی‌شده‌ی کلیه‌ی ذرات با افزایش سرعت باد زیاد می‌شود. اما رابطه‌ی ون‌کارمن نشان می‌دهد که این ارتباط خطی است، و به همان نسبت افزایش سرعت باد فاصله‌ی طی‌شدن ذرات نیز بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر برای بررسی درستی رابطه‌ی ون‌کارمن، باید کلیه‌ی نمودارهای فوق (در شرایط آزمایش یکسان)، به صورت خط راست باشند که این مطلب به استثناء ذره‌ی $5\mu m$ ، در سایر موارد کم‌وبیش قابل استنباط است.

چنان که رابطه‌ی مذکور نشان می‌دهد، طول پیموده‌شده -- علاوه بر سرعت و اندازه‌ی ذره -- به چگالی نسبی ذرات و گران‌روی جریان نیز ارتباط دارد؛ از آنجا که این چهار آزمایش در شرایط دمایی مختلفی انجام گرفته‌اند، این دو مقدار در هر مورد متفاوت‌اند. پس شکستگی‌های دیده شده در نمودارها را می‌توان ناشی از همین یکسان نبودن چگالی و گران‌روی دانست. همچنین درمورد استفاده از رابطه‌ی

۳.۳. ضریب انتشار^۹

برای به دست آوردن ضریب انتشار ذره از سرعت اصطکاکی و سرعت اصطکاکی آستانه استفاده می‌شود. در تعریف ضریب انتشار (EF) گفته شده که «مقداری مشخص است برای مرتبط‌کردن مقدار آلاینده‌ی ره‌اشده به اتمسفر بر اثر فعالیت یا فرایندی که آن آلاینده را ایجاد می‌کند».^[۴]

در این تحقیق می‌توان ضریب انتشار برای پشته را به صورت مقدار جرم ذرات بادبرده بر واحد سطح، و البته در مدت زمان نیم‌ساعت از بادبردگی تعریف کرد. EPA تابع پتانسیل بادبردگی برای سطح خشک و در معرض باد را چنین پیشنهاد کرده است:^[۱۲،۹]

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

که در آن u^* سرعت اصطکاکی، و u_t^* سرعت اصطکاکی آستانه است. بر این اساس تابع پتانسیل بادبردگی را باید تابعی درجه ۲ از تفاضل سرعت اصطکاکی و سرعت اصطکاکی آستانه در نظر گرفت، و در صورت رسم نمودار ضریب انتشار در مقابل تفاضل این دو سرعت می‌توان به رابطه‌ی ضریب انتشار در این تحقیق رسید. با محاسبه‌ی مساحت جانبی در معرض باد پشته و با در نظرگرفتن جرم کل ذرات بادبرده در هر آزمایش، تابع پتانسیل بادبردگی در این پروژه عبارت خواهد بود از:

$$P = 180/13(u^* - u_t^*)^2 + 682/68(u^* - u_t^*)$$

جدول ۳. فاصله‌ی ذرات ۱۰۰، ۷۵، ۵۰، ۲۰، ۱۰ و ۵ μm از مرکز در سرعت‌های مختلف.

سرعت (m/s)	PM-۱۰۰	PM-۷۵	PM-۵۰	PM-۲۰	PM-۱۰	PM-۵
۴٫۳۳	۷۷٫۸	۱۲۱٫۲	۲۲۶٫۲	۹۲۷٫۷۱	۲۶۹۷٫۷	۷۸۴۴٫۸
۵٫۰۳	۸۳٫۸	۱۲۸٫۳	۲۳۳٫۸	۹۰۷٫۵	۲۵۳۱٫۵	۷۰۶۱٫۶
۷	۱۱۹٫۴	۱۷۷٫۵	۳۱۰٫۶	۱۱۰۰٫۱	۲۸۶۳٫۱	۷۴۵۱٫۹
۱۱	۱۴۲٫۹	۲۱۰٫۷	۳۶۴٫۳	۱۲۵۵	۳۱۹۹٫۱	۸۱۵۴٫۹

جدول ۴. بادبردگی ذرات در حالت مرطوب شدن سطح (کلیه اوزان به گرم).

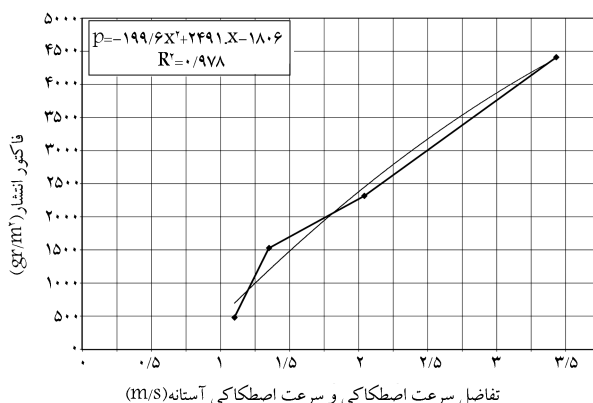
وزن کل رویه	وزن کل رویه پس از بادبردگی	وزن کل رویه ۱٫۵ cm	درصد رطوبت
۹۳۸٫۳۸۳	۸۹۱٫۲۹۷	۹۳۸٫۳۸۳	۱۰
۸۲۹٫۳۵۱	۷۴۶٫۱۳۶	۸۳۱٫۲۱۵	۴
۸۰۲٫۹۶۲	۶۹۵٫۲۹۷	۱۰۷٫۶۶۵	۲

اضافه شده است. به تعبیر دیگر، جرم خالص هدررفته‌ی ذرات پشته بر اثر بادبردگی، از ۵۰ گرم نیز کم‌تر است. در پایان آزمایش افزایش رطوبت سطح پشته می‌توان چنین نتیجه گرفت که در صورت مرطوب‌سازی سطح پشته به میزان ۱۰٪، میزان بادبردگی ذرات در مدت نیم‌ساعت از حدود ۲۰۲ گرم به ۴۴ گرم کاهش خواهد یافت. (جدول ۴)

۶. نتیجه‌گیری

- تابع پتانسیل بادبردگی و ضریب انتشار ذرات در این تحقیق عبارت است از:

$$P = 180 / 13 (u^* - u_t^*)^{1.682 / 68} (u^* - u_t^*)$$
- مسافت طی شده توسط ذره‌ی ۷۵ میکرومتر در دو حالت نظری و تجربی مطابقت دارد، اما نتایج آزمایش در سایر اندازه‌ها به روابط کلاسیک نزدیک نیست.
- به‌طور کلی نتایج آزمایشات انجام‌شده برای ذرات خارج از محدوده‌ی توزیع دانه‌بندی ذرات (ذرات کوچک‌تر از ۱۰-PM) قابل استناد نیست و منطقی به نظر نمی‌رسند.
- میزان بادبردگی کل ذرات با سرعت وزش باد ارتباط نسبتاً خطی دارد.
- مسافت طی‌شده توسط ذرات با سرعت باد به‌صورت خطی افزایش می‌یابد.
- با توجه به نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها، می‌توان سیستمی شبیه به تونل باد و Set-Up موجود ایجاد کرده و ذرات سنگ‌آهن را با کمک آن دانه‌بندی کرد.
- مرطوب‌سازی سطح پشته‌ها به‌منظور کاهش میزان بادبردگی بسیار مؤثر است، به‌طوری‌که افزودن ۱۰ درصدی رطوبت به سطح پشته می‌تواند میزان بادبردگی ذرات را تا ۷۸٪ کاهش دهد. همچنین در صورت ایجاد رطوبت ۲٪، بادبردگی تا حدود ۴۵٪ کم‌تر خواهد شد.



شکل ۶. شکل. تابع پتانسیل بادبردگی ذرات. تفاضل سرعت اصطکاکی و سرعت اصطکاکی آستانه (m/s)

ون‌کارمن باید به این نکته توجه کرد که این رابطه برای ذرات کروی و ذرات حائز شرایط قانون استوکس صادق است که بالطبع ذرات مورد آزمایش پشته از آن برخوردار نیستند و در تصاویر SEM تهیه شده نیز ساختار پولکی ذرات مشهودتر بود.

در ادامه با تعیین چگالی و گران‌روی جریان هوا در هر آزمایش، ضمن محاسبه‌ی این مسافت طی‌شده برای هر قطر ذره، نتیجه‌ی رابطه‌ی نظری ون‌کارمن و آزمایش‌های انجام‌گرفته‌ی فوق مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه‌ی جواب‌های به دست آمده از رابطه‌ی ون‌کارمن با نتایج آزمایش نشان می‌دهد که تنها در مورد ذره‌ی دارای قطر ۷۵ میکرون این دو رویکرد با یکدیگر مشابهت دارند اما در مورد ذرات بزرگ‌تر از این اندازه، اعداد حاصل از آزمایش بیشتر است و بر عکس برای ذرات کوچک‌تر از آن، رابطه‌ی نظری مسافت طی‌شده ذرات را دورتر به دست می‌آورد.

با توجه به پارامترهای مورد استفاده در رابطه‌ی ون‌کارمن، دلیلی برای وجود تناقض در دو حالت طبیعی و آزمایشگاهی وجود ندارد و فقط ممکن است مقدار ضریب E با آنچه در محاسبات فوق به دست آمد، متفاوت باشد. همان‌طور که گفته شد، مقدار E بین 10^4 تا 10^5 سانتی‌متر مربع برثانیه در نظر گرفته می‌شود که در اینجا کم‌ترین مقدار آن فرض شده است. بنابراین می‌توان اختلاف موجود را چنین توجیه کرد که بادی که در طبیعت می‌وزد، برخلاف باد ایجادشده در آزمایشگاه فاقد حالت ساکن در یک منبع است و به‌علت اختلاف فشار بین دو منطقه، ذره را تا فاصله‌ی زیادی همراهی می‌کند. ولی در آزمایشگاه، باد از منبعی نقطه‌یی شروع به وزیدن می‌کند و تدریجاً اثر آن بر ذره از بین می‌رود. به‌عبارت دیگر مقایسه‌ی فوق تنها می‌تواند در مورد نسبت تغییر سرعت باد و تغییر مسافت نظیر آن در دو حالت قابل استفاده باشد. به‌عنوان مثال برای ذره‌ی ۱۰ میکرومتر در دو حالت وزش باد با سرعت‌های ۷ و ۱۱ متر برثانیه، در دو وضعیت نظری و تجربی، می‌توان نوشت:

$$\text{حالت نظری: } \frac{u = \frac{7m}{s}}{u = \frac{11m}{s}} \rightarrow \frac{l = \frac{5219}{45} m}{l = \frac{8133}{52} m} = 0/64$$

$$\text{حالت تجربی: } \frac{u = \frac{7m}{s}}{u = \frac{11m}{s}} \rightarrow \frac{l = \frac{2863}{1} m}{l = \frac{3199}{1} m} = 0/89$$

۵. اثر مرطوب‌سازی پشته

مطابق جدول ۳، جرم ذرات بادبرده در حالت ایجاد رطوبت ۱۰٪ بر سطح پشته و در سرعت ۱۱ متر برثانیه حدود ۵۰ گرم است که شامل وزن ذرات بادبرده و رطوبت

پانوشت

1. creep
2. saltation
3. suspension
4. conical
5. oval
6. X-ray fluorescence
7. scanning electron microscopy (SEM)
8. transmission electron microscopy (TEM)
9. emission factor

منابع

1. Mansell, G.E., *Determining Fugitive Dust Emissions from Wind Erosion*, ENVIRON International Corporation (March 2004).
2. Leow, W.W. and Liang, L.C., *Atmospheric Boundary Layer Wind Tunnel Design*, TEC Group in the University of Adelaide, Australia (2005).
3. MacDougall, C.R., *Emprical Method for Determining Fugitive Dust Emissions*, Clark County Department of Air Quality Management, Las Vegas, US, (2002).
4. Vanoni, Vito A. "Sedimentation engineering", ASCE Manuals and Reports (54) (2006).

5. Greeley, R. and Iversen, J.D. "Wind tunnel studies of martian aeolian processes", *NASA Technical Memorandum, NASA TM X-62*, **297** (May 1973).
6. Torano, J.A., Rodriguez, R., Diego, I., Rivas, J.M. and Pelegry, A. "Influence of the pile shape on wind erosion CFD emission simulation", *Applied Mathematical modelling*, 31, pp.2487-2502.
7. Badr, T. and Jean, L.H. "Effect of aggregate storage piles configuration on dust emissions", *Atmospheric Environment Journal*, (2006).
8. Kardous, M.; Bergametti, G. and Marticorena, B. "Aerodynamic roughness length related to tillage ridges", *Annales Geophysicae*, **23**, pp. 3187-3193 (2005).
9. EPA, AP-42 Fugitive Dust Emission Factor. "Chapter 13: Miscellaneous sources".
10. Roney, J.A. and Bruce, R.W., *Estimating Fugitive Dust Emissions*, 1st Edition, National Pollutant Inventory, Australia (December 1999).
11. Sinclair Knight Merz Group, *Improvement of NPI Fugitive Particulate Matter Emission Estimation Techniques*, (May 2005).
12. Countess Environmental 4001Whitesail Circle, "WRAP fugitive dust handbook", West lake Village CA 91361 (September 2006).