

## بررسی ارتباط غلظت ریزگرد با رطوبت سطحی و توزیع اندازه ذرات خاک با استفاده از شبیه‌ساز متحرک فرسایش بادی در نواحی بیابانی غرب استان خوزستان

مهدی نورزاده حداد<sup>۱</sup>، استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور ایران  
حسینعلی بهرامی، دانشیار گروه خاکشناسی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران

### چکیده

پتانسیل خاک‌ها برای فرسایش بادی به عوامل مختلفی مثل توزیع اندازه ذرات بافت سطحی، رطوبت سطحی و سرعت باد بستگی دارد. در این تحقیق ارتباط غلظت ریزگرد با رطوبت سطحی و توزیع اندازه ذرات خاک سطحی با استفاده از شبیه‌ساز متحرک فرسایش بادی بررسی شد. این اندازه‌گیری‌ها در ۱۰ رطوبت و ۱۱ منطقه مستعد فرسایش بادی انجام گرفت. نتایج مطالعات صحرایی نشان داد که با افزایش رطوبت در خاک سطحی (۰-۳ سانتی‌متر) از صفر تا حدود ۳ درصد، میزان سرعت آستانه، افزایش و غلظت ریزگرد تولیدی کاهش می‌یابد. به طوری که در رطوبت ۲/۸ درصد، غلظت ریزگرد تقریباً به صفر می‌رسد. علاوه بر این در رطوبت‌های کم، خاک منطقه ۶، کمترین افزایش سرعت آستانه و خاک منطقه ۲، بیشترین افزایش سرعت آستانه را داشته است. همچنین خاک منطقه ۳، در شرایط خشک بیشترین تولید ریزگرد را با غلظت ۱۶۱/۲۶ میلی‌گرم بر مترمکعب و خاک منطقه ۲ در همین شرایط با تولید ۱۰۱/۲۳ میلی‌گرم بر مترمکعب ریزگرد، کمترین میزان غبار انتشار یافته را داشت. بنابراین تغییرات نرخ کاهش غلظت ریزگرد برای خاک مناطق مختلف، متفاوت بوده است، ولی در همه مناطق در رطوبت ۲/۲ درصد به شدت کاهش یافته و به صفر نزدیک شده است. هر چه درصد ذرات کوچکتر از ۱۰۰ میکرون در بافت سطحی خاک بیشتر باشد، باعث افزایش بیشتری در سرعت اصطکاکی آستانه ضمن افزایش رطوبت سطحی می‌گردد. همچنین هر چه درصد ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون در خاک سطحی بیشتر باشد، پتانسیل خاک‌ها برای تولید ریزگرد در شرایط خشک بیشتر می‌شود.

**کلمات کلیدی:** ریزگرد، سرعت آستانه، شبیه‌ساز متحرک، فرسایش بادی.

## مقدمه

طوفان‌های ریزگرد را می‌توان یکی از مهمترین دلایل آلودگی هوا در مناطق دارای چشمه‌های گرد و غبار و مناطق مجاور آنها برشمرد (اخوان قالیباف و پویان فر ۱۳۸۹). در استان خوزستان نیز ریزگردها به یک معضل اساسی تبدیل شده‌اند، به طوری که بر اساس گزارش سازمان بهداشت جهانی (WHO<sup>۱</sup>) شهر اهواز با داشتن میانگین سالیانه ۳۷۲ میکروگرم ذرات PM<sub>۱۰</sub> (ذرات کوچکتر از ۱۰ میکرومتر) در هر مترمکعب به عنوان آلوده‌ترین شهر جهان از نظر ذرات معلق (که عمدتاً شامل ریزگردها می‌شود) در سال ۲۰۱۱ معرفی شده است (فری من ۲۰۱۱) و منجر به مشکلات عدیده تنفسی و قلبی برای شهروندان استان‌های نواحی غربی کشور شده است (گراوندی و همکاران ۱۳۹۵، زلّی و همکاران ۲۰۱۴، سبزیعلیپور و همکاران ۲۰۱۶). کنترل و مهار این پدیده تنها به شرط شناخت دقیق و اندازه‌گیری کمی عوامل موثر بر تولید آن امکان‌پذیر خواهد بود. نبود ایستگاه‌های مناسب و کافی جهت اندازه‌گیری پارامترهای این پدیده از یکسو و پراکندگی مکانی زیاد مناطق مستعد این پدیده از سوی دیگر، از جمله مهمترین مشکلات بررسی کمی ریزگردها به شمار می‌روند (نورزاده و همکاران ۲۰۱۲). همچنین در بسیاری موارد اندازه‌گیری ویژگی‌های یک طوفان ریزگرد در شرایط طبیعی امکان‌پذیر نیست و تنها راه بررسی دقیق آن‌ها، شبیه‌سازی شرایط وقوع این طوفان‌ها است. یکی از فاکتورهای بسیار موثر که میزان حساسیت خاک سطحی را نسبت به میزان فرسایش بادی تحت تاثیر قرار می‌دهد، رطوبت است (دلیر حسن نیا و همکاران، ۱۳۹۰، چاهوکی و همکاران ۱۳۹۴، فسان و همکاران ۱۹۹۹). رطوبت با افزایش چسبندگی بین ذرات، باعث افزایش گردهم‌آیی ذرات خاک شده و افزایش سرعت آستانه فرسایش بادی<sup>۲</sup> می‌شود (اختصاصی و عظیم زاده ۱۳۹۱، یکتافر و همکاران ۱۳۹۴، فنگ و همکاران ۲۰۰۹، نورزاده و بهرامی ۲۰۱۳). تاثیر رطوبت بر

---

1- World Health Organization

2- Threshold Friction Velocity of Wind Erosion

کاهش غلظت ریزگرد بسته به شرایط مختلف رطوبتی سطح خاک و نوع خاک‌ها شدیداً متغیر است (گومز و همکاران ۲۰۰۳). براین اساس تاکنون پژوهش‌های متعددی جهت بررسی ارتباط رطوبت سطحی خاک و فرسایش بادی صورت گرفته است (میکامی و همکاران ۲۰۰۵). اغلب مطالعات گذشته در شرایط آزمایشگاه، ارتباط کمی رطوبت سطحی خاک و میزان ریزگرد را بررسی کرده‌اند، به نحوی که در سال ۱۹۹۶، شائو و همکاران با استفاده از یک شبیه‌ساز آزمایشگاهی ارتباط بین سرعت آستانه فرسایش بادی و رطوبت خاک‌های سطحی استرالیا را در قالب یک رابطه را معرفی کردند. از مشکلات این رابطه می‌توان به کم‌برآورد کردن<sup>۱</sup> سرعت آستانه در رطوبت‌های بالای  $0/03$  مترمکعب آب بر مترمکعب خاک ( $m^3 m^{-3}$ ) اشاره کرد. آقایان کونولیز و گابریلز (۲۰۰۳) با استفاده از یک شبیه‌ساز آزمایشگاهی به طول ۱۲ متر، عرض  $1/2$  متر و ارتفاع  $3/2$  متر در بلژیک ارتباط بین سرعت آستانه فرسایش بادی و رطوبت سطحی خاک را در دامنه رطوبتی صفر (کاملاً خشک) تا  $0/04$  کیلوگرم بر کیلوگرم بررسی کردند. در چین، هان و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از یک شبیه‌ساز آزمایشگاهی - صحرایی، ارتباط بین سرعت آستانه فرسایش بادی و رطوبت سطحی خاک را بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که این رابطه به صورت لگاریتمی و مستقیم بوده است. نورزاده و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعات صحرایی خود گزارش کردند که هر چه درصد ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون ( $PM_{75}$ ) در خاک سطحی بیشتر باشد، پتاسیل خاک‌ها برای تولید ریزگرد در شرایط خشک بیشتر می‌شود. علاوه بر این هر چه درصد این ذرات بیشتر باشد، با افزایش رطوبت، سرعت آستانه هم افزایش یافته و به عبارتی فرسایش - پذیری خاک سطحی کمتر می‌شود. به منظور بررسی ارتباط غلظت ریزگرد و رطوبت سطحی خاک در شرایط کاملاً طبیعی و دست‌نخورده، در این تحقیق ابتدا، سرعت آستانه فرسایش بادی در رطوبت‌های مختلف برای مناطق ۱۱ گانه تعیین شد و سپس غلظت ریزگرد در شرایط مختلف رطوبتی اندازه‌گیری گردید.

## داده‌ها و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

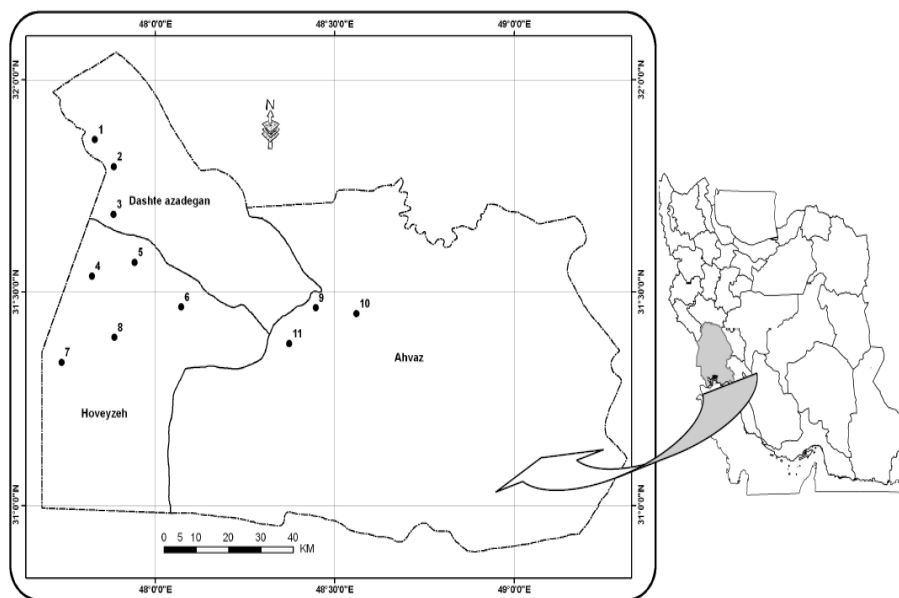
مناطق مورد مطالعه در این تحقیق شامل قسمت‌های غربی استان خوزستان می‌شدند که مستعد تولید طوفان‌های ریزگرد<sup>۱</sup> بودند. در مطالعات صحرائی نقاطی از این مناطق تحت بررسی قرار گرفتند که قبلاً در گزارشات مرتبط (گزارش مرکز تحقیقات خاک و آبخیزداری، ۱۳۸۹)، به عنوان منابع داخلی طوفان‌های ریزگرد و مناطق برداشت<sup>۲</sup> مورد تاکید قرار گرفته بودند. اراضی مورد نظر در محدوده شهرهای اهواز، دشت آزادگان (سوسنگرد) و هویزه واقع شده‌اند. این اراضی غالباً خشک، آهکی، با شوری بالا و در بسیاری مناطق خاک‌های غیرقابل کشت را شامل می‌شوند. رژیم رطوبتی و حرارتی این خاک‌ها به ترتیب اریدیک<sup>۳</sup> و هایپرترمیک<sup>۴</sup> را شامل می‌شود. شکل (۱) موقعیت مناطق مورد مطالعه و نقاط مورد نظر در اندازه‌گیری‌های صحرائی را نشان می‌دهد.

### اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

ویژگی‌های مختلف شیمیایی-فیزیکی خاک سطحی (عمق ۳-۰ سانتی‌متری) نقاط مورد مطالعه در ارتباط با فرسایش بادی اندازه‌گیری شدند. ویژگی‌های اندازه‌گیری شده شامل هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، درصد آهک (CaCO<sub>3</sub>%)، درصد کربن آلی (OC%)، بافت خاک، وزن مخصوص و توزیع اندازه ذرات ۵ می‌شوند. رطوبت سطحی خاک با استفاده از روش انعکاس‌سنجی (TDR) و قرار دادن حسگرهای انعکاس‌سنج در عمق ۳ سانتی‌متری خاک اندازه‌گیری شد. غلظت ریزگرد موجود در هوا در حین آزمایش با استفاده از دستگاه غبارسنج ایزوکتیک بر حسب میلی‌گرم بر مترمکعب (mg m<sup>-3</sup>) اندازه‌گیری شد. سرعت آستانه فرسایش بادی نیز با استفاده از

- 
- 1- Dust Storms
  - 2- Deflation Regions
  - 3- Aridic
  - 4- Hyperthermic
  - 5- Particle Size Distribution

روش چشمی (مشاهده‌ای) در طول آزمایش اندازه‌گیری شد (شائو، ۲۰۰۸). کلیه اندازه‌گیری‌ها در فصل بهار و در زمانی صورت گرفته که میانگین دمای هوا بین ۲۲ الی ۲۵ درجه سانتیگراد بوده است.



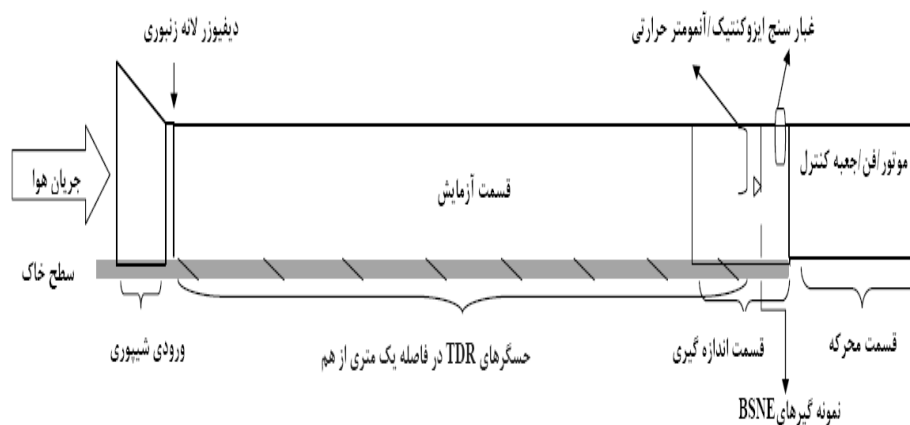
شکل ۱- موقعیت مناطق مورد مطالعه

### اندازه‌گیری‌های صحرائی

به منظور شبیه‌سازی شرایط وقوع طوفان‌های ریزگرد، از شبیه‌ساز متحرک فرسایش بادی استفاده شد (نورزاده و همکاران، ۲۰۱۲). قسمت‌های مختلف و ابعاد بخش‌های مختلف شبیه‌ساز در شکل (۲) نشان داده شده است. پس از کالیبره کردن سیستم شبیه‌ساز مشخص شد که پروفیل سرعت باد تابعی از رابطه (۱-۲) است که در این رابطه،  $U_z$  سرعت باد در ارتفاع  $Z$ ،  $U^*$  سرعت آستانه فرسایش بادی،  $Z_0$  طول زبری و  $K$  ثابت وان کارمن<sup>۱</sup> (حدود ۰/۴) را نشان می‌دهد (فیستر و ریس، ۲۰۰۹).

1- Von Karman Constant

$$U_z = \frac{U_*}{K} \cdot \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \quad [۱]$$



شکل ۲- نحوه نصب سیستم شبیه‌ساز در مکان‌های مورد آزمایش

همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است، از سمت راست به چپ به ترتیب، قسمت محرکه که دارای یک فن مکند است و قسمت‌های اندازه‌گیری، آمایش، دیفیوزر لانه زنبوری<sup>۱</sup> و ورودی مخروطی شکل<sup>۲</sup> قرار گرفته‌اند. در بخش اندازه‌گیری، ابزارهای اندازه‌گیری در مکان‌های مشخصی نصب شدند، به نحوی که غبارسنج ایزوکتیک در فاصله ۸ متری ورودی و ارتفاع ۰/۶۵ متری سطح زمین قرار داده شد. همچنین به منظور جمع‌آوری رسوبات برای بررسی‌های بیشتر از ۴ نمونه‌گیر رسوب BSNE به صورت خطی که در فواصل ۰/۲۰، ۰/۳۵، ۰/۵۰ و ۰/۶۵ متری از دیواره سمت چپی بدنه شبیه‌ساز قرار گرفته بودند، استفاده شد. این نمونه‌گیرها در فاصله ۷/۵ متری از ورودی و در ارتفاع ۰/۴۵ متری بالای سطح زمین به نحوی قرار گرفتند که مزاحمتی برای اندازه‌گیری‌های غلظت ریزگرد (که توسط غبارسنج ایزوکتیک اندازه

1- Honeycomb Diffuser

2- Conic Entrance

گیری می‌شد) فراهم نیاورد. همچنین به منظور بررسی تغییرات سرعت باد در سیستم باد سنج حرارتی در ارتفاع ۰/۶۵ متری درون بخش اندازه‌گیری نصب شد. همان‌طور که در شکل بالا نیز مشخص است، از ۸ حسگر TDR به منظور تعیین متوسط رطوبت سطحی استفاده شد که به فاصله ۱ متری از هم و در طول قسمت آزمایش قرار گرفتند. طول هر یک از این حسگرها ۱۰ سانتی‌متر بود و با توجه به اینکه تمامی اندازه‌گیری‌ها می‌بایست سطحی و در عمق ۰-۳ سانتی‌متری باشد، این حسگرها به شکل مورب و به نحوی که عمق مذکور را پوشش دهند در خاک قرار گرفتند. بر اساس مطالعات گذشته و با توجه به تغییرات شدید رطوبت سطحی در زمان‌های بالاتر از ۳ دقیقه، زمان انجام هر آزمایش در هر نقطه ۳ دقیقه تعیین شد و تمامی پارامترها در این مدت اندازه‌گیری شدند. با توجه به اینکه جنس بدنه قسمت‌های آزمایش و اندازه‌گیری از پلکسی‌گلاس شفاف بود، در طی هر آزمایش (شبیه‌سازی) و با تولید گرد و غبار، در اثر جاذبه الکترواستاتیک بدنه مقدار زیادی گرد و غبار به دیواره داخلی می‌چسبید و مانع دید کافی می‌شد. به منظور برطرف کردن این مشکل، مواد محلول آنتی‌الکترواستاتیک قبل از هر آزمایش و نصب سیستم به دیواره‌های داخلی اسپری می‌شد. همچنین قبل از هر شبیه‌سازی نمونه‌های مرکب سطحی خاک به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی برداشت شدند. بعد از نصب حسگرهای TDR، آب کافی به منظور رسیدن به رطوبت مورد نظر بر سطح خاک اسپری می‌شد. سپس سرعت باد (طوفان شبیه‌سازی شده) تا حدی که حرکت خاک سطحی دیده شود، افزایش می‌یافت. این سرعت به مدت ۳ دقیقه به طور ثابت نگه داشته می‌شد و اندازه‌گیری‌های TDRها و غبارسنج بطور پیوسته ذخیره می‌گردید.

## نتایج و بحث

### ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک‌ها

جدول (۱)، ویژگی‌های اندازه‌گیری شده نمونه خاک‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس جدول مذکور می‌توان گفت کلیه مناطق مورد مطالعه دارای خاک‌های آهکی و شور بوده‌اند. به طوری که حداقل و حداکثر EC در آنها ۱۹/۶ و ۹۹/۴ دسی‌زیمنس بر متر

بوده و درصد کربنات کلسیم بین ۲۲/۲۵ تا ۳۹ درصد متغیر بوده است. علاوه بر این در تمامی نمونه‌های خاک مناطق مورد مطالعه، درصد کربن آلی بسیار کم و زیر ۱ درصد بوده است. دلیل کمبود شدید کربن آلی در سطح این خاک‌ها، لم‌پزراع بودن آنها می‌باشد. همچنین وزن مخصوص تمامی خاک‌ها بین ۲/۲۲ تا ۲/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب متغیر بوده است.

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیک و شیمیایی نمونه خاک‌های مناطق مورد مطالعه

شماره خاک	EC (dSm <sup>-1</sup> )	pH	OC (%)	CaCO <sub>3</sub>	ρ <sub>s</sub> (g cm <sup>-3</sup> )
۱	۴۴/۸	۷/۷۱	۰/۳۵	۲۸/۲۵	۲/۲۷
۲	۹۴/۶	۷/۵۹	۰/۹۳	۲۲/۲۵	۲/۶۲
۳	۵۲/۵	۷/۸۴	۰/۴۸	۳۴/۵۰	۲/۵۶
۴	۹۱/۳	۷/۶۲	۰/۷۲	۲۴/۷۵	۲/۴۴
۵	۸۲/۶	۷/۹۳	۰/۶۴	۳۴/۵۰	۲/۵۶
۶	۹۹/۴	۷/۷۹	۰/۸۴	۲۹/۰۰	۲/۲۲
۷	۲۶/۹	۸/۱۹	۰/۱۷	۳۹/۰۰	۲/۳۵
۸	۲۲/۷	۸/۱۳	۰/۵۰	۳۶/۵۰	۲/۳۸
۹	۱۹/۶	۷/۷۵	۰/۹۳	۳۲/۵۰	۲/۳۱
۱۰	۵۹/۰	۸/۱۱	۰/۴۲	۳۵/۵۰	۲/۴۵
۱۱	۳۶/۶	۷/۷۸	۰/۵۰	۳۲/۵۰	۲/۵۳

منبع: یافته‌های تحقیق

جدول (۲) توزیع اندازه ذرات سطحی خاک‌های مناطق مورد مطالعه را نشان می‌دهد. تاثیر زیاد توزیع اندازه ذرات خاک سطحی روی پتانسیل خاک‌ها برای بلند شدن و فرسایش یافتن از یکسو و استفاده از توزیع اندازه ذرات در بسیاری از مدل‌های فرسایش بادی از سوی دیگر، اهمیت این ویژگی را نمایان می‌سازد. در این تحقیق مرز ریزگرد حد ۷۵ میکرومتر (۷۵ PM یا ۷۵ <) در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در جدول مذکور مشخص است، درصد ذرات ریزگرد در بافت سطحی خاک‌ها کمتر از ۱۵ درصد بوده است. همچنین بر اساس طبقه بندی USDA در اکثر موارد بیش از ۵۰



درصد ذرات خاک شامل شن خیلی درشت و درشت<sup>۱</sup> می‌شدند. بر این اساس می‌توان پیش‌بینی کرد که ذرات بیشتر دارای حرکت جهشی و تعلیق باشند. با توجه به اینکه در این تحقیق مرز بالای اندازه ذرات ۲۰۰۰ میکرومتر بود، حرکت لغزشی در نظر گرفته نشده است.

همان‌طور که جدول (۴-۲) نشان می‌دهد، خاک‌های مناطق ۳ (منطقه بستان) و ۶ (منطقه آل بو حمدی در هویزه) دارای بیشترین درصد PM ۷۵ بوده و در مقابل خاک‌های مناطق ۲ (منطقه شاه آباد در دشت آزادگان) و ۸ (منطقه مشرفه در هویزه) کمترین میزان ذرات این دامنه را دارا هستند. همچنین خاک‌های مناطق ۴ (منطقه شیخ محمد در هویزه) و ۲۵ (منطقه محمد صافی در شوش) با بیش از ۵۵ درصد ذرات ۲۰۰۰-۵۰۰ میکرون، بیشترین حجم از این ذرات را به خود اختصاص داده‌اند.

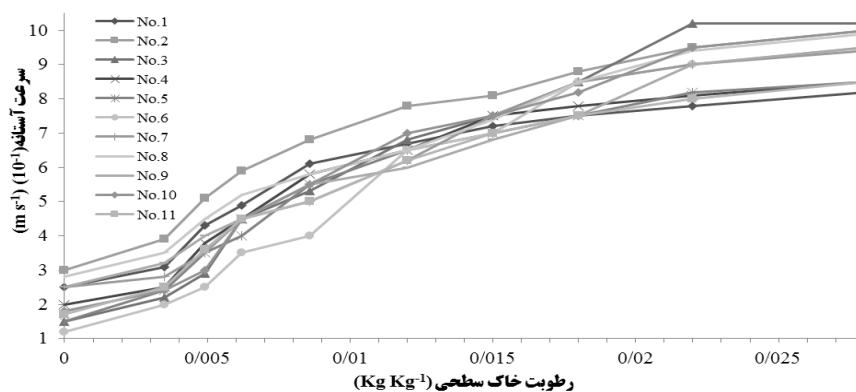
جدول ۲. توزیع اندازه ذرات نمونه خاک‌های مناطق مورد مطالعه

نمونه	کلاس توزیع اندازه ذرات (μm)						قطر متوسط (μm)
	< ۷۵	۷۵-۱۰۰	۱۰۰-۱۵۰	۱۵۰-۳۰۰	۳۰۰-۵۰۰	۵۰۰-۲۰۰۰	
۱	۷/۸۳	۳/۷۳	۱۰/۲۸	۱۹/۴۶	۱۵/۸۸	۴۲/۸۲	۳۸۳
۲	۶/۵۱	۲/۴۰	۵/۱۲	۶/۵۹	۲۸/۴۴	۵۰/۸۶	۵۲۵
۳	۱۴/۰۵	۶/۶۷	۱۸/۰۴	۱۰/۶۶	۱۲/۰۸	۳۸/۵۰	۴۵۸
۴	۱۱/۵۴	۲/۴۰	۵/۲۲	۱۲/۶۶	۱۳/۰۴	۵۵/۱۴	۶۳۴
۵	۸/۲۹	۸/۲۳	۸/۶۸	۱۵/۷۰	۱۶/۹۴	۴۲/۱۶	۳۸۲
۶	۱۲/۳۷	۱۴/۴۴	۱۰/۵۷	۱۱/۱۰	۱۱/۳۴	۴۰/۱۸	۵۰۵
۷	۷/۲۹	۱۰/۴۵	۲۹/۸۸	۲۹/۳۸	۷/۶۰	۱۵/۴۰	۱۶۴
۸	۶/۹۳	۳/۱۱	۷/۳۰	۱۹/۱۴	۱۷/۶۲	۴۵/۹۰	۴۲۷
۹	۷/۴۶	۲/۵۰	۶/۴۶	۱۷/۸۲	۱۹/۴۶	۴۶/۳۰	۴۴۹
۱۰	۹/۲۹	۶/۲۱	۱۱/۲۲	۱۵/۱۰	۲۲/۳۲	۳۵/۸۶	۳۱۱
۱۱	۷/۶۰	۲/۷۰	۱۴/۱۶	۱۳/۷۶	۱۷/۹۶	۴۳/۸۲	۴۰۴

منبع: یافته‌های تحقیق

### ارتباط رطوبت سطحی خاک و سرعت اصطکاکی آستانه فرسایش بادی

شکل (۳)، ارتباط بین رطوبت سطحی خاک و سرعت اصطکاکی آستانه در خاک های مناطق مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است این ارتباط به صورت مستقیم (افزایش یکی باعث افزایش دیگری می‌شود) و غیرخطی است، اما نحوه افزایش، تغییرات، حد پائین و بالای آن برای هر خاک متفاوت است.



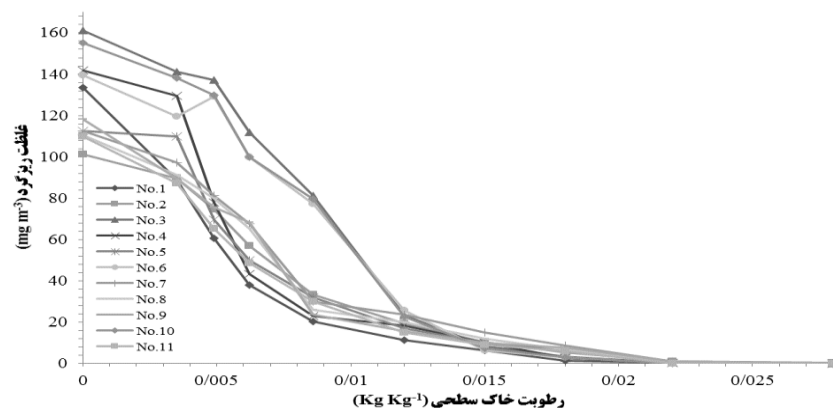
شکل ۳. ارتباط رطوبت سطحی خاک با سرعت اصطکاکی آستانه برای تمامی خاک‌های مناطق مورد مطالعه

بر این اساس، خاک منطقه ۶ در شرایط خشک (رطوبت صفر) کمترین سرعت اصطکاکی آستانه (۰/۱۲ متر بر ثانیه) را داشته است. این بدان معنا است که در شرایط همسان راحت‌تر از خاک سایر مناطق حرکت می‌کند (فرسایش می‌یابد). همچنین جدول (۲) نشان می‌دهد که این خاک دارای بیشترین درصد ذرات کوچکتر از ۱۰۰ میکرون است که به شدت به فرسایش حساس هستند (چیپل، ۱۹۵۶). علاوه بر این خاک منطقه ۶ بیشترین افزایش سرعت آستانه را تا رطوبت ۰/۰۱۳ Kg Kg<sup>-1</sup> داشته است. در مقابل خاک منطقه ۲ کمترین افزایش سرعت آستانه را تا رطوبت ۱ Kg Kg<sup>-1</sup> داشته است و این در حالی است که این خاک در رطوبت صفر (شرایط خشک) بیشترین مقاومت (بیشترین سرعت آستانه) را مقابل وزش باد دارا بوده است. همچنین

از مقایسه خاک‌های ۲ و ۶ (جدول ۴-۲) مشخص است که به ترتیب کمترین (۸/۹۱ درصد) و بیشترین (۲۶/۸۱ درصد) ذرات کوچکتر از ۱۰۰ میکرون (که به شدت مستعد فرسایش هستند) را داشته‌اند. همچنین خاک منطقه ۲ با داشتن بیش از ۷۰ درصد ذرات با اندازه‌ای بین ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرون نسبت به خاک منطقه ۶، بافت درشت‌تری دارد. بر این اساس می‌توان افزایش بیشتر سرعت آستانه را با افزایش رطوبت برای خاک‌های مورد مطالعه به این صورت تفسیر کرد که افزایش میزان ذرات ریزتر از ۱۰۰ میکرون در خاک باعث افزایش شیب ارتباط دو پارامتر مورد نظر (سرعت آستانه و رطوبت) می‌گردد. به عبارت دیگر هر چه درصد ذرات کوچکتر از ۱۰۰ میکرون در بافت سطحی خاک بیشتر باشد، باعث افزایش بیشتری در سرعت اصطکاک آستانه ضمن افزایش رطوبت سطحی می‌گردد. این در حالی است که نتایج آزمون ANOVA نشان داد که رطوبت سطحی خاک با درصد ذرات کوچکتر از ۱۰۰ میکرون ارتباط معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ داشته است.

#### ارتباط رطوبت سطحی خاک و غلظت گرد و غبار

شکل (۴)، ارتباط بین رطوبت سطحی خاک و غلظت ریزگردها را در خاک‌های مناطق مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است غلظت غبار انتشار یافته در سطح خاک با افزایش رطوبت سطحی کاهش یافته است. تغییرات نرخ کاهش برای خاک مناطق مختلف، متفاوت بوده است، ولی تمامی خاک همه مناطق در رطوبت ۲/۲ درصد به شدت کاهش یافته و به صفر نزدیک شده است. بنابراین می‌توان گفت در نقطه رطوبتی ۲/۲ درصد، نیروهای بین ذره‌ای بیشترین تاثیر را از رطوبت موجود در خاک سطحی جهت افزایش چسبندگی بین ذرات خاک، می‌پذیرند.



شکل ۳. ارتباط رطوبت سطحی خاک با غلظت ریزگرد تولیدی برای تمامی خاک‌های مناطق مورد مطالعه

همان‌طور که شکل (۴) نشان می‌دهد، خاک منطقه ۳ در شرایط خشک (رطوبت صفر) بیشترین تولید ریزگرد را با غلظت  $161/26$  میلی‌گرم بر مترمکعب داشته است که این مقدار بیش از  $1000$  برابر از حد مجاز استاندارد برای انسان ( $150$  میکروگرم بر مترمکعب) بیشتر است. این در حالی است که خاک منطقه ۲ در همین شرایط با تولید  $101/23$  میلی‌گرم بر مترمکعب ریزگرد، کمترین میزان غبار انتشار یافته را داشته است. با افزایش تدریجی رطوبت (از صفر تا حدود  $3$  درصد وزنی) میزان غبار انتشار یافته کاهش یافته و در رطوبت  $3$  درصد وزنی ( $0/03$  کیلوگرم بر کیلوگرم) کمترین میزان را خاک منطقه ۳ با غلظت  $0/11$  میکروگرم بر مترمکعب داشته است. همچنین در این رطوبت بیشترین مقدار ریزگرد انتشار یافته از سطح خاک متعلق به خاک منطقه ۲ بوده است. همان‌طور که در جدول (۲) مشخص است، خاک منطقه ۲ دارای کمترین مقدار ذرات کوچکتر از  $75$  میکرون بوده است. این ارتباط به صورتی است که با افزایش ذرات کوچکتر از  $75$  میکرون باعث افزایش پتاسیل خاک‌ها برای تولید ریزگرد در شرایط خشک می‌شود؛ زیرا این ذرات کوچکتر از  $75$  میکرون هستند که مستعد انتشار در هوای مجاور خاک هستند. علاوه بر این هر چه درصد این ذرات بیشتر باشد، با

افزایش رطوبت، سرعت آستانه هم افزایش یافته و به عبارتی فرسایش‌پذیری خاک سطحی کمتر می‌شود. علاوه بر این نتایج آزمون ANOVA نشان داد که غلظت ریزگرد با ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون ارتباط معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ داشته است.

### نتیجه‌گیری

نتایج نهایی این تحقیق حاکی از آن بود که افزایش رطوبت سطحی خاک باعث افزایش نیروی چسبندگی بین ذرات خاک شده و باعث افزایش سرعت آستانه فرسایش بادی می‌شود. به عبارت دیگر افزایش رطوبت باعث کاهش فرسایش بادی و غلظت ریزگرد تولیدی می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که در رطوبت حدود ۲ درصد، غلظت ریزگرد تولیدی به شدت کاهش یافته و در تمامی خاک‌ها به صفر نزدیک می‌شود. همچنین در این رطوبت، میزان افزایش سرعت آستانه با افزایش رطوبت (شیب افزایش سرعت آستانه با رطوبت) به شدت کاهش پیدا می‌کند. بنابراین می‌توان رطوبت حدود ۲ درصد را به عنوان یک نقطه بحرانی رطوبتی تعیین کرد. این نتایج تا حدودی با نتایج هان و همکاران (۲۰۰۹) متفاوت است. به گونه‌ای که ایشان رطوبت ۱/۲ درصد را به عنوان نقطه بحرانی رطوبتی برای خاک‌های شنی چین تعیین کردند. این در حالی است که مکانیزم اندازه‌گیری‌ها در تحقیق حاضر، متفاوت است به نحوی که هان و همکاران (۲۰۰۹)، اندازه‌گیری‌هایشان را روی خاک دست‌خورده و شرایط آزمایشگاه انجام دادند، ولی نتایج تحقیق حاضر بر اساس اندازه‌گیری‌های صحرائی و خاک دست‌نخورده به دست آمده است. به عبارت دیگر دست‌خورده شدن خاک‌ها و تخریب ساختمان ضعیف این‌گونه خاک‌ها خود به عنوان یک عامل مهم در کاهش سرعت آستانه فرسایش بادی قلمداد می‌گردد. همچنین با توجه به شور بودن خاک‌های منطقه مورد مطالعه می‌توان نوع آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در این خاک‌ها را بر میزان رطوبت موثر دانست (نورافر و همکاران ۱۳۹۳). این در حالی است که در تحقیق حاضر غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها اندازه‌گیری نشده و فرض بر این است که غلظت یون‌های موثر در

شوری خاک‌های منطقه مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری با هم نداشته‌اند. علاوه بر رطوبت، توزیع اندازه ذرات خاک نیز بر سرعت آستانه و غلظت ریزگرد تولیدی تاثیر به‌سزایی دارد (لارنت و همکاران، ۲۰۰۶). بر اساس نتایج به دست آمده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در اراضی مستعد بدون پوشش (گیاهی، سنگریزه و سله)، هر چه درصد ذرات کوچکتر از ۱۰۰ میکرون در بافت سطحی خاک بیشتر باشد، باعث افزایش بیشتری در سرعت اصطکاکی آستانه ضمن افزایش رطوبت سطحی می‌گردد. همچنین هر چه درصد ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون در خاک سطحی بیشتر باشد پتاسیل خاک‌ها برای تولید ریزگرد در شرایط خشک بیشتر می‌شود.

### منابع

- امیدوار، کمال، (۱۳۹۰) بررسی و تحلیل هم‌دیدگی گرد و غبار اسفند (۱۳۸۷) در منطقه یزد، اولین کنگره بین‌المللی پدیده گرد و غبار و مقابله با آثار زیانبار آن، دانشگاه رامین خوزستان، ص ۳۶۳.
- امیدوار، کمال، و زهرا امیدوی، (۱۳۹۲). تحلیل پدیده گرد و غبار در جنوب و مرکز استان فارس دوره ۱، مجله کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، شماره ۱، بهار، صفحات (۸۵-۱۱۴).
- اختصاصی، محمد رضا و حمیدرضا عظیم زاده، (۱۳۹۱) بررسی شاخص‌های دانه بندی خاک با استفاده از دو روش الک تر و خشک در مطالعات فرسایش آبی و بادی (مطالعه موردی: رسوبات دشت سر پوشیده یزد). خشک بوم. شماره ۲. صفحات (۹-۱).
- اخوان قالیباف، محمد و ناصر پویان فر، (۱۳۸۹)، ریزگردهای مصنوعی محلی، خطری جدی در سامانه‌های مواصلاتی خطوط جاده ای و هوایی شهر یزد، دومین همایش ملی فرسایش بادی، یزد. ص ۲۱۸.
- بررسی منشا و علل وقوع طوفان‌های جنوب غرب و غرب کشور و مناطق تحت تاثیر آنها، (۱۳۸۹)، گزارش مرکز تحقیقات خاک و آب‌خیزداری، سازمان ترویج، آموزش و تحقیقات کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی. ۳۱۴ صفحه.

- دلیرحسین نیا<sup>T</sup> رضا، امیرحسین ناظمی، سیدعلی اشرف صدرالدینی و داوود فرسادی زاده، (۱۳۹۰)، مدل تعیین تلفات بادبردگی و تبخیر در اسپری نازل‌های سامانه آبیاری سنتریپوت. مجله دانش آب و خاک. جلد ۲۱، شماره ۱، صفحات (۱-۱۴).
- زارع چاهوکی، اصغر، محمدرضا اختصاصی، محمدرضا طالبی، سیدمهدی علی حسینی، (۱۳۹۴)، بررسی علل هیدروژنومورفولوژیکی تشکیل الگوهای چندضلعی در شق‌های دشت یزد-اردکان. خشک بوم. شماره ۱ صفحات (۳۱-۴۲).
- گراوندی، سحر، الهه زلّقی، غلامرضا گودرزی، محمدجواد محمدی، علی اکبر بابایی، احمدرضا یاری و مهدی نورزاده حداد، (۱۳۹۵). مواجهه با ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون و تأثیر آن در بروز بیماری‌های تنفسی و قلبی-عروقی در هوای شهر اصفهان. تحقیقات نظام سلامت. شماره ۴. صفحات (۱-۵).
- نورافر، علیرضا، احمد پهلوانروی، محمد نهتانی و حسین نگارش، (۱۳۹۳)، بررسی رابطه میزان هدایت الکتریکی EC خاک و سرعت آستانه فرسایش بادی، دومین همایش ملی بیابان با رویکرد مدیریت مناطق خشک و کویری، سمنان، دانشکده کویرشناسی دانشگاه سمنان، مرکز بین‌المللی بیابان دانشگاه تهران. ص ۱۴۲.
- نورزاده حداد مهدی، حسینعلی، بهرامی، فرود شریفی و دیرک گوسنس، (۱۳۹۰) بررسی کارایی نمونه‌گیر BSNE در تعیین متوسط نرخ افقی رسوبات بادی با استفاده از شبیه‌ساز متحرک فرسایش بادی. اولین کنگره بین‌المللی پدیده گرد و غبار و مبارزه با پیامدهای آن. دانشگاه رامین. ص ۹۶۱.
- یکتافر، مسعود، محمد زارع، محمد اخوان قالیباف و سیدرضا مهدوی اردکانی، (۱۳۹۴)، بررسی شدت بیابان‌زایی در اراضی آبیاری شده با پساب تصفیه شده شهر یزد و مقایسه آن با اراضی طبیعی با بهره‌گیری از معیار خاک در مدل IMDPA. آب و خاک. شماره ۶. صفحات (۱۵۰۶-۱۵۲۱).

Chepil W Silla, (1956), Influence of moisture on erodibility of soil by wind. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 20: 288-292.

Cornelis W Millr, and Donald, Gabriels, (2003), The effect of surface moisture on the entrainment of dune sand by wind: an evaluation of selected models. Sedimentology 50: 771-790.

F'ecan, Fred, Bill, Marticorena, and Gil, Bergametti, (1999), Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas. *Annales Geophysicae* 17: 149–157.

Feng, Ding Jung, Zing su, Li, and Jung Ro, Ni, (2009), Sidewall effects of a wind tunnel on wind velocity and mass flux in Aeolian sand transport. *Geomorphology* 106: 253-260.

Fister, Worfalg, and Jonny Bill, Ries, (2009), Wind erosion in the central Ebro Basin under changing land use management. Field experiments with a portable wind tunnel. *Journal of Arid Environments* 73: 996–1004.

Freeman, Math, (2011), The world's most polluted cities. *Thejournal.ie*, issue 26 Sept. 2011, <http://www.thejournal.ie/gallery-the-worlds-most-polluted-cities-237312-Sep2011>.

Gomes, Lara, Jiating Lora, Rajot, Sascano, Alfaro, Alvares, Gaudichet, (2003), Validation of a dust production model from measurements performed in semi-arid agricultural areas in Spain and Niger. *Catena* 52: 257–271.

Han, Qinjie, Jianjang, Qu, Kecun, Zhang, Ruiping, Zu, Kinghe, Niu, and Kongtai, Liao, (2009), Wind tunnel investigation of the influence of surface moisture content on the entrainment and erosion of beach sand by wind using sands from tropical humid coastal southern China. *Geomorphology* 104: 230–237.

Laurent, Brad, Marticorena, Bill, Gil, Bergametti, and Feng, Mei, (2006), Modeling mineral dust emissions from chinese and mongolian deserts. *Global Planet Change* 52: 121–141.

Mikami, Masao, Terou, Aoki, Masahide, Ishizuka, Sadayo, Yabuki, Yuda, Yamada, Wendo, Gao, and Fing, Zeng, (2005), Observation of number size distribution of desert aerosols in the south of the Taklimakan Desert, China. *J Meteorol Soc Japan* 83A:31–43.

Nourzadeh Mehdi, Hosseinali, Bahrami and Forod, Sharifi, (2012), A new portable-stationary wind erosion simulator for Aeolian measurements. *Soil Science Congress*. Izmir, Turkey.

Nourzadeh Mehdi, Hosseinali, Bahrami, Dirk, Goossens, and Donald, Fryrear, (2012), Determining soil erosion and threshold friction velocity at different soil moisture conditions using a portable wind tunnel. *Annals of Geomorphology*. 57:97-109.

Nourzadeh, Mehdi, and Hosseinali, Bahrami, (2013), Investigating six empirical models for threshold friction velocity estimation, Southwest regions of Iran. *International journal of agronomy and plant production*.4(7): 1427-1432.

Sabzalipour, Sima, Mehdi, Nourzadeh Haddad, Elaheh, Zallaghi, (2016), A Survey of Cardiovascular and Respiratory Diseases Attributable to PM10



pollutant in the western Half of Iran (Ahwaz, Bushehr and Kermanshah Provinces) with Use of AIRQ Model. Der Pharmacia Letter. In Press.

Shao Yaping, Raupach MR and John, Leys,. 1996. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. Aust J Soil Res 34: 309–342.

Shao, Yaping, (2008), Physics and modeling of wind erosion. Springer.

Zallaghi Elaheh, Gholamreza, Goudarzi, Mehdi, Nourzadeh Haddad, Seyed Masoomeh, Moosavian, MohammadJavad, Mohammadi, (2014), Jundishapur J Health Sci. 2014 October; 6(4): 1-5.