

## The Effect of Physical Crust Development and Disturbance on Erodibility and Dust Emission in Laboratory Conditions

HEIDAR GHAFARI\*

Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

(Received: Dec. 28, 2020- Revised: Feb. 13, 2021- Accepted: Apr. 3, 2021)

### ABSTRACT

Soil surface crusting, especially the physical type, is an important feature of dust source areas in Khuzestan province, which can have a significant impact on soil protection against wind erosion. But in most wind erosion studies, it has not been considered. The aim of this study was to investigate the effect of physical crust disturbance caused by livestock traffic on soil crusted erodibility and dust emission. For this purpose, three dominant soils with the characteristic of surface crust formation were selected from the areas and transferred to the laboratory. The soils were placed into wind tunnel trays and subjected to a simulated rainfall to form a physical crust on their surfaces. After the soils dried and the physical crust formed, the trays were exposed to different trampling by livestock's hoof including 1, 2 and 5 crossings. The trays were then transferred to a wind tunnel laboratory and threshold friction velocity (TFV), erosion rate and PM10 emission flux were measured. The results showed that erosion and dust diffusion in the control treatment (without livestock traffic) was zero in all three soil types and with increasing the number of livestock traffic from one to five times TFV decreased by 25 to 49%, and the amount soil erosion and dust emission increased between 54-317% and 80-545%, respectively. The physical crust of sandy soil was more sensitive to livestock traffic than clay loam and silt loam. The findings of this study show that the formation of physical crust in this area is a desirable and valuable feature for inhibiting erosion and dust, which acts as a natural stabilizer and protecting them can have a huge impact on dust control.

**Keywords:** Dust Storms, Livestock Traffic, Wind Tunnel, PM10 Emission, Threshold Friction Velocity.

## اثر تشکیل و تخریب پوسته فیزیکی بر فرسایش پذیری و انتشار گرد و غبار در شرایط آزمایشگاهی

حیدر غفاری\*

گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱/۱۴)

### چکیده

تشکیل پوسته سطحی به ویژه از نوع فیزیکی ویژگی اصلی خاک اکثر کانون‌های گرد و غبار در استان خوزستان بوده که می‌تواند نقش اساسی در حفاظت خاک در برابر فرسایش بادی به عهده داشته باشد، اما در اکثر مطالعات فرسایش بادی توجهی به آن‌ها نشده است. این مطالعه با هدف بررسی اثر به هم خوردگی پوسته‌های فیزیکی سطح خاک ناشی از تردد دام بر میزان فرسایش پذیری خاک‌های پوسته‌ای و انتشار گرد و غبار انجام شد. برای این منظور سه نمونه خاک غالب منطقه با ویژگی پتانسیل تشکیل پوسته سطحی انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شدند. خاک‌ها در سینی‌های تونل باد ریخته شدند و جهت ایجاد شرایط طبیعی و تشکیل پوسته فیزیکی در سطح آن‌ها تحت یک بارندگی شبیه‌سازی شده قرار گرفتند. پس از خشک شدن و تشکیل پوسته فیزیکی، سینی‌ها در معرض تردد چند دام سبک با تعداد دفعات ۱، ۲ و ۵ بار قرار گرفتند. سپس سینی‌ها به آزمایشگاه تونل باد منتقل شدند و آستانه سرعت اصطکاکی (TFV)، مقدار فرسایش بادی و شار انتشار PM10 اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در هر سه نوع خاک مقدار فرسایش و انتشار گرد و غبار در تیمار شاهد (بدون تردد دام) صفر بود و با افزایش تعداد دفعات تردد دام از یک بار تا ۵ بار آستانه سرعت اصطکاکی ۲۵ تا ۴۹ درصد کاهش، و مقدار فرسایش خاک و انتشار گرد و غبار به ترتیب بین ۵۴-۳۱۷ درصد و ۸۰-۵۴۵ درصد افزایش یافت. پوسته فیزیکی خاک لوم شنی نسبت به خاک لوم رسی و لوم سیلتی حساسیت بیشتری در برابر تردد دام داشت. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که تشکیل پوسته فیزیکی در این نوع مناطق یک ویژگی مطلوب و با ارزش برای مهار فرسایش و گرد و غبار است که به عنوان یک تثبیت کننده طبیعی عمل می‌کند و حفظ آنها می‌تواند تاثیر بسیار زیادی در کنترل گرد و غبار داشته باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تردد دام، تونل باد، انتشار PM10، آستانه سرعت اصطکاکی.

### مقدمه

می‌باشند. طوفان‌های شدید گرد و غبار ناشی از کانون‌های شرق و جنوب شرق استان اغلب با وزش بادهای شرقی همراه می‌باشد (Zarasvandi et al., 2011). در بیشتر این مناطق پدیده پوسته‌ای شدن سطح خاک به خوبی دیده می‌شود که دلیل آن ساختمان ضعیف و فراوانی ذرات رس و سیلت و همچنین املاح محلول است. ضربه قطرات باران عامل اصلی تشکیل پوسته فیزیکی است (Yan et al., 2015). نفوذ آب‌های زیرزمینی شور در نتیجه خاصیت موئینگی و تبخیر آن از سطح سبب تبلور املاح و تشکیل پوسته نمکی می‌شود. تبلور نمک در فضای خالی بین ذرات خاک سبب متلاشی شدن ساختمان خاک شده، به گونه‌ای که در بسیاری از نقاط خاک زیر پوسته نمکی به عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر حالت پفی پیدا کرده (GSI, 2016) که با کوچکترین آشفتگی و تنش به شدت مستعد فرسایش بادی هستند.

پاسخ خاک به نیروهای فرساینده باد و حتی آب تا حد بسیار زیادی توسط چند میلی‌متر اول خاک کنترل می‌شود

در دهه‌های گذشته، فرسایش بادی و وقوع طوفان‌های گرد و غبار به یکی از مشکلات زیست محیطی جدی در استان خوزستان تبدیل شده است (Zarasvandi et al., 2011). طوفان‌های گرد و غبار در خوزستان به طور عمده در فصل تابستان روی می‌دهند و دارای دو منشأ خارجی و داخلی می‌باشند (Dargahian et al., 2017). بیابان‌های شنی و بسترهای خشک دریاچه‌ها و تالاب‌های کشورهای همسایه از جمله عراق، سوریه و عربستان به عنوان منابع اصلی گرد و غبار خارجی شناسایی شده‌اند (Zarasvandi et al., 2011). کانون‌های داخلی تولید گرد و غبار با مساحتی حدود ۳۴۵۰ کیلومتر مربع، به طور عمده از شرق و جنوب شرق اهواز تا شرق هندیجان در جنوب شرق استان گسترش دارند (GSI, 2016). علاوه بر این، بخش‌های خشک شده تالاب هورالعظیم در غرب هویزه و نواحی پیرامون آن و همچنین بخش‌هایی از شمال خرمشهر جزء منابع داخلی تولید گرد و غبار

خاک می‌تواند منجر به افزایش آسیب‌پذیری خاک در برابر فرسایش بادی شود (Baddock, Belnap and Gillette, 1997; Munson et al., 2011; et al., 2011). علی‌رغم سابقه طولانی تحقیقات جهانی بر پوسته‌های سطحی خاک و نقش آن‌ها در فرایندهای مختلف به‌ویژه فرسایش خاک، اما در کشور مطالعات کمی در این زمینه انجام شده که عمدتاً بر پوسته‌های زیستی تمرکز دارند. در حالی که گستره حضور پوسته‌های فیزیکی به‌ویژه در دشت‌های آبرفتی خشک قابل توجه است. بازدیدها و مشاهدات صورت گرفته از کانون‌های جنوبی و جنوب شرقی اهواز حاکی از آن است که تشکیل پوسته فیزیکی در سطح خاک‌های این مناطق پدیده‌ای شایع است. با این حال، در اکثر مطالعات فرسایش بادی و گرد و غبار انجام شده در منطقه توجهی به آن‌ها نشده است. لذا، این مطالعه با هدف بررسی اثر به‌هم‌خوردگی پوسته‌های فیزیکی سطح خاک ناشی از تردد دام بر میزان فرسایش‌پذیری خاک‌های پوسته‌ای و انتشار گرد و غبار در شرایط آزمایشگاهی انجام شد. با توجه به شواهد بحث شده، فرضیه‌های اصلی این تحقیق این است که دست‌خوردگی و تخریب پوسته‌های سطحی توسط فعالیت‌های انسانی یکی از عوامل اصلی تولید گرد و غبار در منطقه بوده و بافت خاک بر میزان آسیب‌پذیری پوسته‌ها ناشی از تنش‌های خارجی و در نتیجه میزان اثرپذیری آستانه سرعت اصطکاکی تأثیرگذار است.

## مواد و روش‌ها

### جمع‌آوری نمونه خاک و تجزیه‌های آزمایشگاهی

با توجه به هدف مطالعه و بر اساس اطلاعات موجود، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو تیمار شامل نوع خاک و سطوح مختلف دست‌خوردگی با سه تکرار طراحی شد. سه نمونه خاک با بافت متفاوت از سطح اراضی بیابانی جنوب و جنوب شرق شهر اهواز که از کانون‌های اصلی گرد و غبار هستند، تهیه شد (شکل ۱). نقاط انتخاب شده برای نمونه‌برداری به لحاظ فیزیوگرافی در واحد دشت‌های آبرفتی واقع شده‌اند؛ اقلیم منطقه از نظر آب و هوایی در زمره اقلیم خشک تا فراخشک بوده؛ خاک‌های این مناطق غالباً در سه راسته انتی‌سول، اریدی‌سول و اینسپتی‌سول طبقه‌بندی شده‌اند و تشکیلات زمین‌شناسی عمدتاً متعلق به دوران سوم زمین‌شناسی شامل سازندهای اصلی میشان، گچساران و آغاچاری می‌باشد. کاربری اصلی اراضی مرتع و زراعت دیم بوده و گونه‌های گیاهی غالب منطقه از نوع شورپسند مانند شورگرز، چمن شور، هالکنوم، اشنان، خارشر و غیره است (RIFR, 2018).

(Singer and Shainberg, 2004). در خصوص نیروی باد، این توزیع اندازه و چسبندگی ذرات خشک است که مقاومت برشی و سرعت آستانه باد (حداقل سرعت باد که ذرات خاک شروع به جدا شدن از سطح خاک می‌کنند) را تعیین می‌کند (Singer and Shainberg, 2004). در واقع، فرسایش خاک توسط باد هنگامی آغاز می‌شود که سرعت اصطکاکی سطح از آستانه آن فراتر رود. آستانه سرعت اصطکاکی نشان‌دهنده ظرفیت سطح برای مقاومت در برابر سایش و فرسایش بادی است (Shao, 2000) که هم فرکانس و هم شدت وقایع فرسایش را کنترل می‌کند (Marticorena et al., 1997). در مناطق خشک و کویری، عوامل مختلفی وجود دارد که باعث افزایش مقاومت خاک در برابر فرسایش بادی و در نتیجه افزایش آستانه سرعت اصطکاکی می‌شود (Belnap et al., 2033). پوسته‌های سطحی (فیزیکی و زیستی) خاک از جمله عواملی طبیعی هستند که می‌توانند خاک را در برابر نیروهای باد به‌ویژه در شرایط خشکی، مقاوم سازند. پوسته‌های فیزیکی لایه‌ای یکپارچه و مترکم با ویژگی‌های ساختاری (تخلخل کم‌تر و جرم مخصوص ظاهری زیادتر)، مکانیکی (مقاومت برشی زیادتر) و هیدرولیکی (نفوذپذیری کم‌تر) متفاوت از خاک زیرین هستند که در نتیجه رخدادهای و عوامل طبیعی مانند برخورد قطرات باران و رسوب‌گذاری تشکیل شده و بسته به مکانیسم و عوامل تشکیل، به دو دسته ساختاری<sup>۱</sup> و رسوبی<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند (Pagliai and Stoops, 2010). پوسته‌های فیزیکی معمولاً زمانی تشکیل می‌شوند که پیوند بین ذرات خاک به طور فزاینده‌ای با افزایش املاح، رس یا سیلت تقویت شوند (Pi And Sharrat, 2019). پوسته‌های زیستی خاک حاصل تجمع سیانوباکتیریا، جلبک‌ها، خزها و گل‌سنگ‌ها در سطح خاک می‌باشند که با اتصال ذرات خاک به یکدیگر از طریق دفع برون سلولی پلی‌ساکاریدهای و موسیلاژهای مرتبط با ریزین‌ها، ریزوئیدها یا لیف‌های ارگانیک‌های مختلف (Belnap et al., 2014)، سطح خاک را در برابر فرسایش مقاوم می‌سازند. علاوه بر این، پوسته‌های زیستی به دلیل اینکه روی سطح خاک تشکیل می‌شوند، همانند یک سپر سطح خاک را از قرار گرفتن در معرض باد محافظت می‌کنند. رطوبت نیز اثرات گذرا و کوتاه مدت بر مقاومت خاک در برابر فرسایش دارد. رطوبت خاک همانند پلی ذرات را به هم متصل می‌کند و وزن رسوبات و خاکدانه‌ها را افزایش می‌دهد (Ravi et al., 2006). سرانجام، اجزاء غیرقابل فرسایش سطح خاک شامل سنگ‌ها، کلوخه‌های بزرگ خاک و پوشش گیاهی می‌توانند بر میزان فرسایش تأثیر بگذارند (Munson et al., 2011). ایجاد اختلال در هر یک از این سپرهای حفاظتی

ویژگی مشترک همه خاک‌های انتخاب شده استعداد تشکیل پوسته بود که با توجه به مشاهدات میدانی گزینش صورت گرفت. نمونه‌برداری در اواخر فصل زمستان و از عمق ۵ سانتی-متری سطح خاک انجام شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و هواخشک گردیدند. سپس از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شده و در سینی‌های مخصوص دستگاه تونل باد با ابعاد  $30 \times 30 \times 50$  ریخته شدند. از هر نوع خاک، تعداد ۹ سینی تهیه شد. علاوه بر این، بخشی از نمونه خاک‌ها از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شامل بافت، قابلیت هدایت الکتریکی، اسیدیته، کربنات کلسیم معادل و ماده آلی طبق روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند (Ali Ehyaei, and Behbehani Zade, 1993).

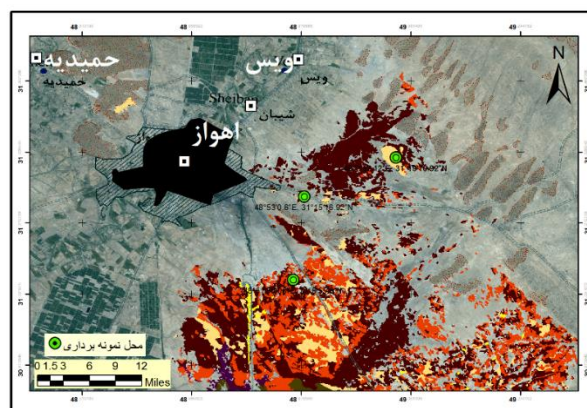
### اعمال تیمارهای دست‌خوردگی

روش‌های مختلفی برای ایجاد دست‌خوردگی سطح خاک توسط محققان استفاده شده که به دو گروه طبیعی و مصنوعی تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های طبیعی مثل عبور وسایل نقلیه (Baddock et al., 1997) و عبور دام (Belnap and Gillette, 1997) و روش مصنوعی مانند اعمال نیروی مکانیکی بر سطح خاک از طرق راه رفتن با کفش آجدار (Belnap and Gillette, 1997) و عبور موتورهای چهارچرخ کوچک با تایرهای فلزی یا آجدار (Macpherson et al., 2008). با توجه به اینکه تردد دام یکی از عوامل اصلی تخریب پوسته‌های سطحی خاک در منطقه مورد مطالعه است و همچنین، نزدیک بودن شرایط به حالت طبیعی، از تردد دام برای ایجاد شدت‌های مختلف دست‌خوردگی استفاده شد (Baddock et al., 2011). به منظور شبیه‌سازی اثر تردد دام بر پوسته‌های سطح خاک در حالت طبیعی، سینی‌های خاک به سه گروه ۹ تایی (سه نوع خاک با سه تکرار) تقسیم شدند و از روی هر گروه تعداد ۱۵ راس دام سبک (بر اساس نوع دام‌های غالب در منطقه) به ترتیب با دفعات ۱، ۳ و ۵ بار عبور داده شد (شکل ۲). سینی‌ها در یک مسیر مشخص و حصار کشی شده در سه ردیف و سه ستون کنار هم چیده شدند، طوری که دام‌ها اجباراً از روی آنها عبور کنند.

### آزمایش‌های تونل باد

برای ارزیابی حساسیت پوسته سطحی به دست‌خوردگی و تاثیر تخریب آن بر آستانه سرعت باد و همچنین میزان هدررفت خاک و انتشار  $PM_{10}$  از یک تونل باد ثابت و مدار باز با طول ۸ متر و عرض  $0.7$  متر و یک فن دمنده مدل زمینس ILA5 با دور موتور  $3525$  rpm استفاده شد. سینی‌های مخصوص حاوی نمونه‌های خاک در اتاق آزمون تونل باد قرار گرفتند و هر کدام در دو نوبت جداگانه تحت آزمایش واقع شدند. در نوبت اول سرعت باد از صفر تا  $15$  متر بر ثانیه با آهنگ  $0.05$  متر بر ثانیه افزایش یافت. سرعت آستانه فرسایش بادی، هم به صورت بصری و هم توسط دستگاه لیزری شمارشگر ذرات (مدل CASELLA-712) تعیین شد. سرعتی که در آن حرکت ذرات خاک مشاهده شد ( $TFV_0$ ) و یا قرائت‌های شمارشگر لیزری روند صعودی پیدا کردند ( $TFV_1$ )، به

ویژگی مشترک همه خاک‌های انتخاب شده استعداد تشکیل پوسته بود که با توجه به مشاهدات میدانی گزینش صورت گرفت. نمونه‌برداری در اواخر فصل زمستان و از عمق ۵ سانتی-متری سطح خاک انجام شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و هواخشک گردیدند. سپس از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شده و در سینی‌های مخصوص دستگاه تونل باد با ابعاد  $30 \times 30 \times 50$  ریخته شدند. از هر نوع خاک، تعداد ۹ سینی تهیه شد. علاوه بر این، بخشی از نمونه خاک‌ها از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شامل بافت، قابلیت هدایت الکتریکی، اسیدیته، کربنات کلسیم معادل و ماده آلی طبق روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند (Ali Ehyaei, and Behbehani Zade, 1993).



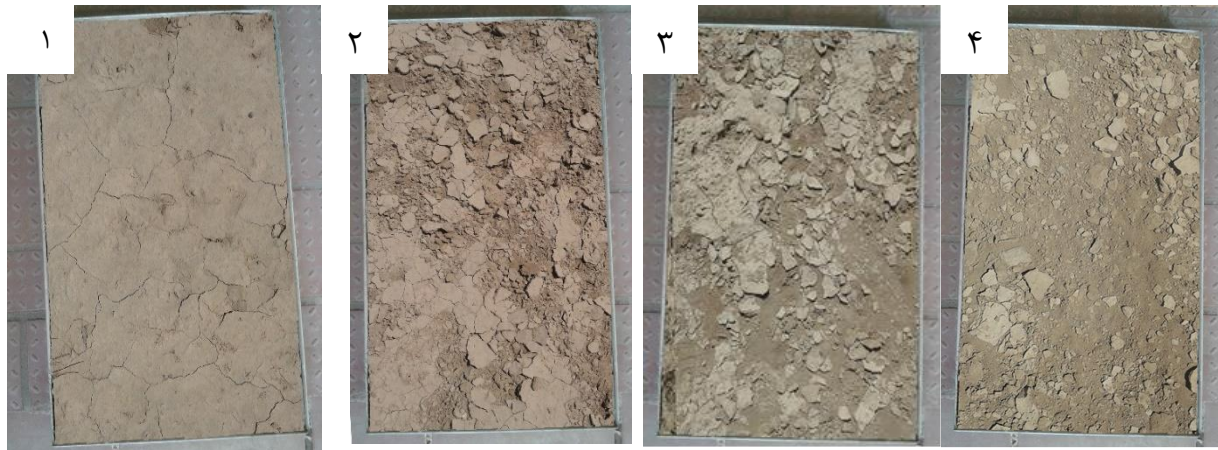
شکل ۱- نقشه محل نقاط نمونه‌برداری

### ایجاد پوسته فیزیکی طبیعی

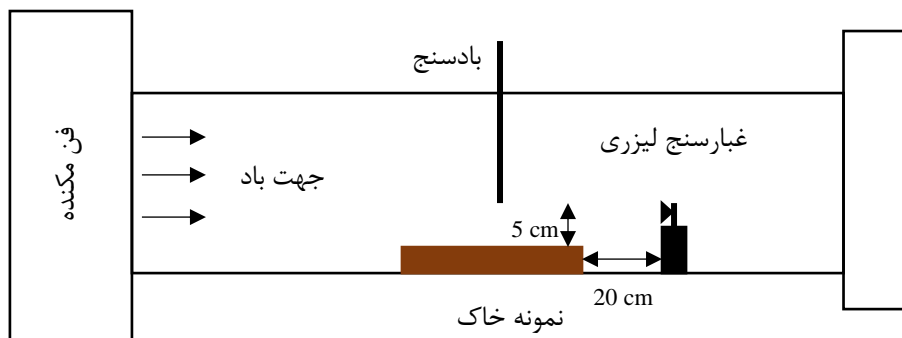
با توجه به دست‌خوردگی خاک‌ها و تخریب پوسته‌های سطحی هنگام نمونه‌برداری، فراهم کردن شرایط تشکیل مجدد پوسته سطحی مد نظر قرار گرفت. مکانیزم‌های مختلفی برای ایجاد پوسته سطحی وجود دارد؛ از قبیل خیس کردن با آب مقطر، خیس کردن با محلول نمکی و برخورد قطرات باران (Pi and Sharratt, 2019). در این تحقیق برای ایجاد پوسته‌های فیزیکی از شبیه‌سازی باران استفاده شد (Armenise et al., 2018). زیرا باران به عنوان عامل اصلی تشکیل پوسته فیزیکی در منطقه مطرح است. برای این کار، سینی‌های مخصوص را با خاک پر کرده و زیر باران شبیه‌سازی شده قرار داده شدند. با توجه به شرایط اقلیمی منطقه بارانی با شدت ۲۵ میلی‌متر در ساعت به مدت ۵ دقیقه (مطابق با میانگین حداقل شدت بارندگی‌های کوتاه مدت در منطقه در بازه زمانی ۴۰ ساله؛ Adib and Gafari Rad, 2019) بر تمام نمونه‌ها اعمال گردید. خاکدانه‌ها در اثر برخورد قطرات باران متلاشی شده و پوسته فیزیکی تشکیل می‌شود (Bu et al., 2013). مطالعات نشان داده است که میزان توسعه‌یافتگی (ضخامت و مقاومت) پوسته سطحی تابعی از ویژگی‌های بارندگی و نوع خاک است

شد. در این حالت، سرعتی که در آن غلظت ذرات شروع به افزایش کرد به عنوان سرعت آستانه انتشار ذرات  $PM_{10}$  ( $TFV_{PM_{10}}$ ) و مجموع غلظت اندازه‌گیری شده به عنوان شار انتشار  $PM_{10}$  در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری سرعت باد از بادسنج نوع سیم داغ مدل TES-1341 استفاده شد. شمارشگر لیزری ذرات در فاصله افقی ۲۰ سانتی‌متری و ارتفاع ۵ سانتی‌متری نسبت به سینی نمونه خاک نصب شد (شکل ۳).

عنوان سرعت آستانه فرسایش در نظر گرفته شد. پس از رسیدن سرعت باد به حداکثر خود، به مدت ۱۲۰ ثانیه غلظت ذرات با فواصل زمانی یک ثانیه توسط دستگاه شمارشگر لیزری ثبت شد. در این حالت، غلظت ذرات شمارش شده شامل کل ذرات معلق بود و شار غلظت اندازه‌گیری شده به عنوان شار فرسایش بادی محاسبه شد. نوبت دوم نیز مشابه نوبت اول انجام شد، با این تفاوت که یک فیلتر مخصوص  $PM_{10}$  در ورودی دستگاه شمارگر نصب



شکل ۲- حالت‌های مختلف دست‌خوردگی پوسته فیزیکی سطح خاک در اثر تردد دام. (۱ بدون تردد، ۲ یک بار عبور، ۳ دو بار عبور و ۴ ۵ بار عبور)



شکل ۳- طرح‌واره محل قرارگرفتن نمونه خاک و تجهیزات اندازه‌گیری در تونل باد

(Pi and Sharratt, 2019).

$$u_z = \left(\frac{u^*}{k}\right) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

که در آن  $u_z$  سرعت باد ( $m.s^{-1}$ ) در ارتفاع  $z$  (m) و  $k$  ثابت وان کارمن (۰٫۴) است. برای این کار لازم است که سرعت باد حداقل در دو نقطه با فواصل مختلف از سطح خاک اندازه‌گیری شود. برای تعیین زبری ایرودینامیکی و سرعت اصطکاکی معادله فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت. شیب و عرض از مبدا رابطه خطی بین  $u_z$  و  $\ln(z)$  به ترتیب دربرگیرنده  $u^*$  و  $z_0$  می‌باشند.

$$\ln z = \left(\frac{k}{u^*}\right) u_z + \ln z_0$$

سرعت اصطکاکی که در آن فرسایش یا انتشار ذرات گرد و

میزان شار فرسایش و انتشار گرد و غبار از معادله زیر محاسبه شد (Wu and et al., 2018):

$$Q = \frac{1}{A_b} C_p V_w \cdot A_f$$

که در آن،  $Q$  شار فرسایش/ $PM_{10}$  ( $mg\ m^{-2}\ min^{-1}$ )،  $C_p$  غلظت ذرات قرائت شده توسط دستگاه شمارنده لیزری ( $mg.m^{-3}$ )،  $V_w$ ، سرعت باد درون تونل باد ( $m.s^{-1}$ )،  $A_f$  سطح مقطع جریان ( $m^2$ ) و  $A_b$  سطح سینی خاک می‌باشند.

تعیین زبری ایرودینامیکی و آستانه سرعت اصطکاکی خاک

برای تعیین زبری ایرودینامیکی ( $z_0$ ) و سرعت اصطکاکی ( $u^*$ ) از معادله لگاریتمی سرعت باد معروف به قانون دیوار<sup>۱</sup> استفاده شد

غبار شروع شود، آستانه سرعت اصطکاکی (TFV) است (Pi and Sharratt, 2019).

### پایداری خاکدانه‌ها و جزء حساس به فرسایش

در پایان آزمایش‌های تونل باد، پایداری خاکدانه‌های حاصل از تخریب پوسته‌ها توسط آزمون الک خشک تعیین شد. برای این منظور حدود یک تا ۱٫۵ کیلوگرم خاک خشک (TW) توسط سری الک‌ها شامل ۴،۷۵، ۲، ۱، ۰٫۵، ۰٫۲۵ و ۰٫۱۲۵ که از بزرگ به کوچک روی هم سوار شدند، به مدت ۸ دقیقه روی دستگاه لرزاننده با ۵۰ نوسان در دقیقه الک شد (Katra, 2020). وزن باقیمانده روی هر الک (Wi) به طور جداگانه توزین و برای محاسبه میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها<sup>۱</sup> (GMWD) استفاده شدند. مجموع وزن ذرات عبور کرده از الک ۱ میلی‌متر ( $W_{0.1}$ ) به عنوان جزء حساس به فرسایش بادی<sup>۲</sup> (WEF)، در نظر گرفته شد.

$$GMWD = \sum \log Xi . Wi$$

$$WEF = \frac{W_{0.1}}{TW} 100$$

که Xi میانگین قطر خاکدانه‌های باقیمانده روی هر الک می‌باشد.

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

نتایج به شکل فاکتوریل در غالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ تجزیه و تحلیل شدند.

### نتایج و بحث

#### مشخصات نمونه خاک‌ها و پوسته فیزیکی تشکیل شده

برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. خاک‌ها در سه گروه بافتی لوم رسی، لوم سیلتی و لوم شنی قرار دارند. وجود مقادیر قابل توجه ذرات سیلت و شوری و قلیائیت زیاد از جمله مشخصات این اراضی به شمار می‌رود که باعث حساسیت زیاد این خاک‌ها به فرسایش بادی شده است. وجود املاح زیاد و کم‌عمق بودن سفره آب زیرزمینی در نتیجه تبخیر باعث شکل‌گیری پوسته‌های نمکی و ساختارهای رسی پف کرده می‌شود. این ساختارهای رسی پف کرده و پوسته‌های نمکی به شدت مستعد فرسایش بادی می‌باشند.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک‌های مورد مطالعه

بافت خاک	رس %	سیلت %	شن ریز %	OM %	EC dS.m <sup>-1</sup>	pH	TNV %	ضخامت متوسط پوسته (mm)	مقاومت فروری پوسته (N.cm <sup>-2</sup> )
لوم رسی	۳۲	۳۴	۵/۲	۰/۴۱	۴۳/۷	۸/۲	۳۴	۶/۱ <sup>a</sup>	۹۵ <sup>a</sup>
لوم سیلتی	۱۶	۵۶	۱۵/۶	۰/۴۳	۲۶/۴	۷/۹	۳۸	۵/۶ <sup>a</sup>	۱۰۶ <sup>a</sup>
لوم شنی	۹/۶	۲۶	۱۰/۷	۰/۳۶	۷/۶	۷/۸	۵۸	۳/۷ <sup>b</sup>	۷۵ <sup>b</sup>

خشک ۰/۵ میلی‌متر گزارش کرده است (Yan et al., 2015).

#### پایداری خاکدانه‌ها و زبری ایرودینامیکی سطح

بین خاک‌های مختلف و تعداد دفعات عبور دام اختلاف معنی‌داری بین میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها و همچنین جزء حساس به فرسایش مشاهده شد. بیشترین مقدار جزء حساس به فرسایش و کمترین میانگین هندسی قطر ذرات در خاک لوم شنی مشاهده شد. در مقابل خاک لوم رسی دارای کمترین مقدار جزء حساس به فرسایش و بیشترین میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها بود (شکل ۴). دلیل آن را می‌توان ساختمان قوی‌تر خاک لوم رسی و لوم سیلتی عنوان کرد. جزء حساس به فرسایش با مقدار ذرات شن همبستگی مثبت و با ذرات رس، سیلت و مواد آلی همبستگی منفی دارد (Lopez et al., 2007). افزایش تعداد دفعات تردد دام در هر سه خاک باعث افزایش معنی‌دار در مقدار جزء حساس به فرسایش و کاهش میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها شد. شدت این تغییرات در خاک‌های ریز بافت‌تر شدیدتر بود. طوری که با

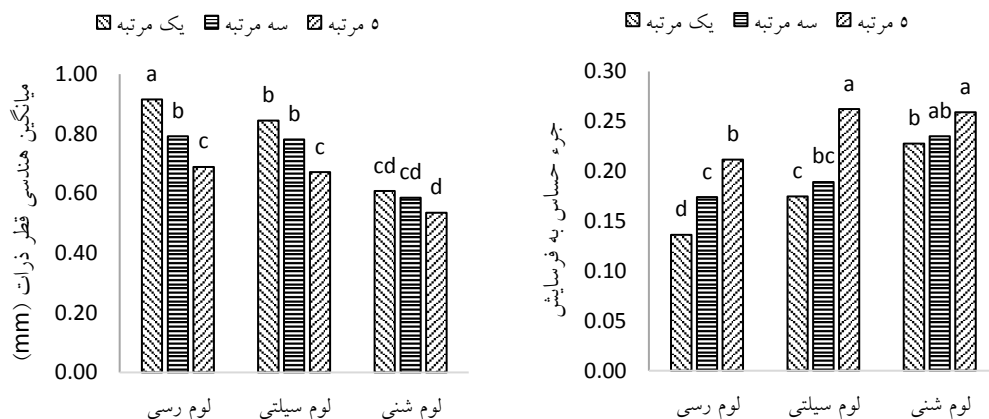
#### OM ماده آلی خاک، EC هدایت الکتریکی، pH واکنش خاک و

#### TNV کربنات کلسیم معادل

ضخامت و مقاومت فروری پوسته‌های فیزیکی تشکیل شده در سطح خاک پس از خشک‌شدن اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که ضخامت و مقاومت پوسته تشکیل شده در خاک لوم رسی و لوم سیلتی نسبت به خاک لوم شنی به طور معنی‌داری بیشتر بود (جدول ۱). ضخامت و مقاومت پوسته فیزیکی علاوه بر این که به شدت و مقدار بارندگی بستگی دارد تحت تاثیر خصوصیات خاک از جمله بافت و همچنین شدت خیس و خشک شدن قرار دارد (Fan et al., 2008). میزان رس موجود در خاک مهمترین عامل در تشکیل و مقاومت پیوند فیزیکی بین ذرات خاک دارد (Brungard et al., 2015). از آنجایی که ویژگی‌های باران و شدت خشک‌شدن برای همه نمونه‌ها یکسان بود، اختلاف مشاهده شده در نمونه‌های خاک به خصوصیات خاک‌ها مرتبط می‌شود. حداقل بارش لازم برای تشکیل پوسته سطحی در اراضی خشک و نیمه

چرای متوسط و شدید به ترتیب به میزان ۲۰ و ۳۰ درصد کاهش یافت. میزان افزایش جزء حساس به فرسایش و کاهش میانگین هندسی قطر ذرات در خاک لوم شنی کمتر بود که احتمالاً دلیل آن تخریب ساختمان خاک در همان مراحل اول تردد دام است. اما تخریب ساختمان خاک در خاک لوم رسی و لوم سیلتی به تدریج و با افزایش تردد دام رخ داده است.

افزایش تعداد دفعات تردد دام از یک مرتبه به پنج مرتبه نسبت ذرات حساس به فرسایش در خاک لوم رسی و لوم سیلتی به ترتیب ۶۱ درصد و ۵۲ درصد افزایش و میانگین هندسی قطر ذرات به ترتیب ۲۵ درصد و ۲۰ درصد کاهش یافت. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های دیگر مانند Katra (2020) مطابقت دارد. وی گزارش داد که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها پس از یک دوره



شکل ۳- اثرات متقابل بافت و تعداد تردد دام بر میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها و جزء فرسایش پذیر (ستون‌های دارای حروف لاتین متفاوت با یکدیگر اختلاف معنی‌دار دارند).

(z0) سطح خاک (ستون‌های دارای حروف لاتین متفاوت با یکدیگر اختلاف معنی‌دار دارند).

#### آستانه سرعت اصطکاکی سطح خاک

در این تحقیق، دو نوع سرعت آستانه اندازه‌گیری شد: (۱) سرعت آستانه برای شروع فرسایش بادی و (۲) سرعت آستانه برای شروع انتشار PM10. سرعت آستانه شروع فرسایش به دو شکل چشمی و لیزری (بدون فیلتر) تعیین شد. تقریباً در هر سه خاک با افزایش تعداد دفعات عبور دام هر سه آستانه سرعت اصطکاکی اندازه‌گیری شده کاهش یافتند (شکل ۶). لازم به ذکر است که سرعت آستانه نمونه‌های شاهد (بدون تردد دام و دست‌خوردگی) خارج از دامنه حداکثر سرعت باد ایجاد شده در این مطالعه بود و هیچ‌گونه فرسایشی در این تیمارها مشاهده نشد. این نشان‌دهنده اهمیت پوسته‌های تشکیل شده در افزایش مقاومت خاک در برابر فرسایش بادی است. همان‌طور که در مطالعات دیگر نیز اشاره شده، پلایاها یا حوضه‌های رسوبی به دلیل تشکیل پوسته مقاوم در سطح خاک، یک سیستم رسوبی عرضه-محدود<sup>۱</sup> در نظر گرفته می‌شوند و ایجاد آشفستگی و به هم خوردگی ناشی از فعالیت‌های انسانی عامل اصلی و مستقیم در تغییر این محدودیت به شمار می‌رود (Macpherson et al., 2008).

آستانه سرعت اصطکاکی PM10 در تمام تیمارها بیشتر از

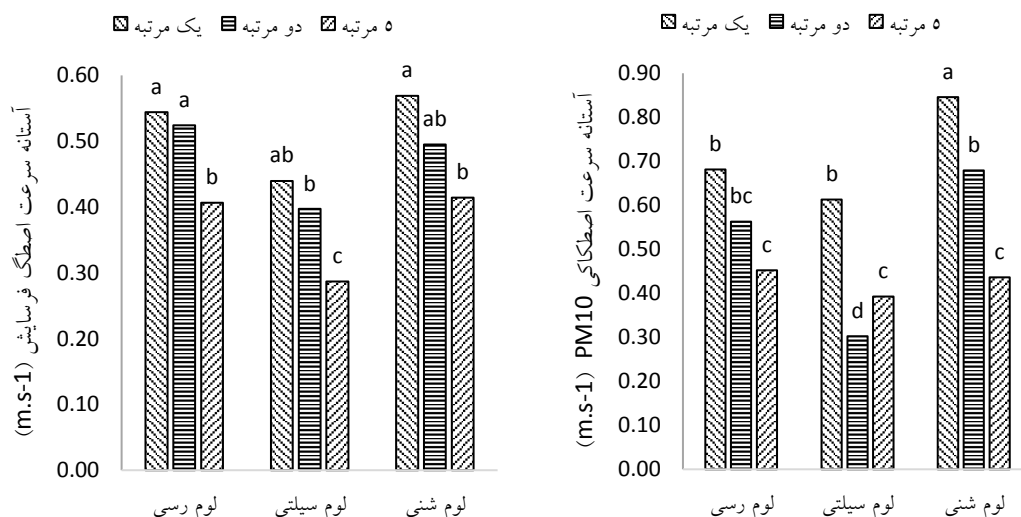
بین زبری سطح بافت‌های مختلف خاک اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد، اما اختلاف بین تعداد دفعات عبور دام معنی‌دار بود. به طور کلی، با افزایش تعداد دفعات تردد دام، زبری سطح افزایش یافت (شکل ۵). در مورد خاک شنی زبری سطح ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. در این خاک احتمالاً ابتدا تشکیل کلوخه‌ها در اثر شکسته شدن پوسته سطحی باعث افزایش زبری شده اما با افزایش تردد و خرد شدن کلوخه‌ها، سطح هموارتر شده و در نتیجه زبری دوباره کاهش یافته است. در مورد خاک‌های لوم رسی و لوم سیلتی احتمالاً به دلیل داشتن ساختمان خاک پایدارتر، در اثر تردد دام و شکستن پوسته سطحی کلوخه‌های مقاوم به فرسایش در سطح خاک تشکیل شده و زبری سطح افزایش یافته است.



شکل ۴- اثرات متقابل بافت و تعداد تردد دام بر میانگین زبری ابرودینامیکی

کردند که انتشار گرد و غبار در سرعت‌هایی کمتر از آستانه سرعت شروع فرسایش ذرات جهشی و خزشی رخ داده است. ایشان اظهار داشتند در شرایطی که اثر بمباران ذرات جهشی وجود نداشته باشد، نیروی بالابر ایرودینامیکی<sup>۱</sup> یکی از مسیرهای بالقوه برای انتشار گرد و غبار است.

آستانه سرعت اصطکاکی فرسایش بود. این نشان می‌دهد که هرچند در اثر تردد دام و تخریب ساختمان سطحی خاک منابعی از ذرات ریز برای فرسایش فراهم شده است، اما انتشار گرد و غبار بعد از حرکت ذرات درشت‌تر و بمباران ذرات جهشی اتفاق افتاده است. این یافته با یافته‌های برخی از محققان منطبق نیست. به عنوان مثال، (wu *et al.*, 2018) در مطالعه خود به این نکته اشاره



شکل ۶- اثرات متقابل نوع خاک و تعداد تردد دام بر آستانه سرعت اصطکاکی فرسایش (بدون فیلتر) (الف) و انتشار PM10 (با فیلتر) (ب) (ستون‌های دارای حروف لاتین متفاوت با یکدیگر اختلاف معنی‌دار دارند).

نکته جالب توجه این‌که علی‌رغم وجود اختلاف معنی‌دار بین آستانه سرعت خاک‌های مختلف در مراحل اولیه به‌هم‌خوردگی، اما با افزایش تردد دام و تشدید دست‌خوردگی ساختمان سطح خاک، مقادیر سرعت‌های آستانه‌ای به ویژه در خصوص انتشار PM10 همگرا شده و به یک عدد تقریباً ثابتی میل کردند. به نظر می‌رسد اثرات بافت خاک بر آستانه سرعت اصطکاکی عمدتاً در پوسته‌های فیزیکی سطح خاک تجلی می‌یابد. زیرا مقادیر آستانه با افزایش تخریب پوسته‌ها در هر سه نوع خاک به هم نزدیک می‌شوند. این یافته نشان می‌دهد که در صورت فراهم بودن منابع قابل فرسایش ریز و نبود موانع، تاثیر خصوصیات خاک در انتشار و انتقال ذرات خاک کمتر شده و سرعت باد نقش اصلی را ایفا می‌کند. در واقع، دست‌خوردگی و آشفستگی سطح خاک عرصه‌های عرضه-محدود را به عرصه‌های انتقال-محدود<sup>۲</sup> تبدیل می‌کند. در عرصه‌های انتقال-محدود این نیروی باد است که فرایند انتقال را کنترل می‌کند (Macpherson *et al.*, 2008) و با کوچکترین وزرش باد، فرسایش و انتشار ذرات رخ می‌دهد. در این مورد، (Belnap and Gillette 1997) نشان دادند که با افزایش

با افزایش تعداد دفعات تردد دام از یک مرتبه به پنج مرتبه، آستانه سرعت اصطکاکی فرسایش در خاک لوم رسی، لوم سیلتی و لوم شنی به ترتیب حدود ۲۵ درصد، ۳۵ درصد و ۲۸ درصد و آستانه سرعت اصطکاکی انتشار PM10 برای این خاک‌ها به ترتیب ۳۴، ۳۶ و ۴۹ درصد کاهش یافته است. در تحقیق مشابهی توسط (Belnap and Gillette 1997) دست‌خوردگی کم، متوسط و زیاد یک خاک با پوسته مقاوم ناشی از عبور وسایل نقلیه به ترتیب باعث کاهش ۷۳، ۸۵ و ۹۵ درصدی در آستانه سرعت اصطکاکی شد.

از این یافته‌ها می‌توان استنباط کرد که خاک‌های سبک‌تر نسبت به تردد دام حساسیت بیشتری دارند و مدیریت چرای مناسب‌تری را می‌طلبند. در تحقیقی مشابه، (Belnap *et al.* 2007) گزارش دادند که لگدکوب شدن سطح خاک‌های دارای پوسته‌های زیستی به شدت باعث افت آستانه سرعت فرسایشی باد شد. ایشان اظهار داشتند که در مناطق بیابانی و خشک حفظ پوسته سطحی خاک و جلوگیری از به‌هم‌خوردگی آنها تاثیر قابل-توجهی در کاهش فرسایش بادی و کنترل گرد و غبار دارد.



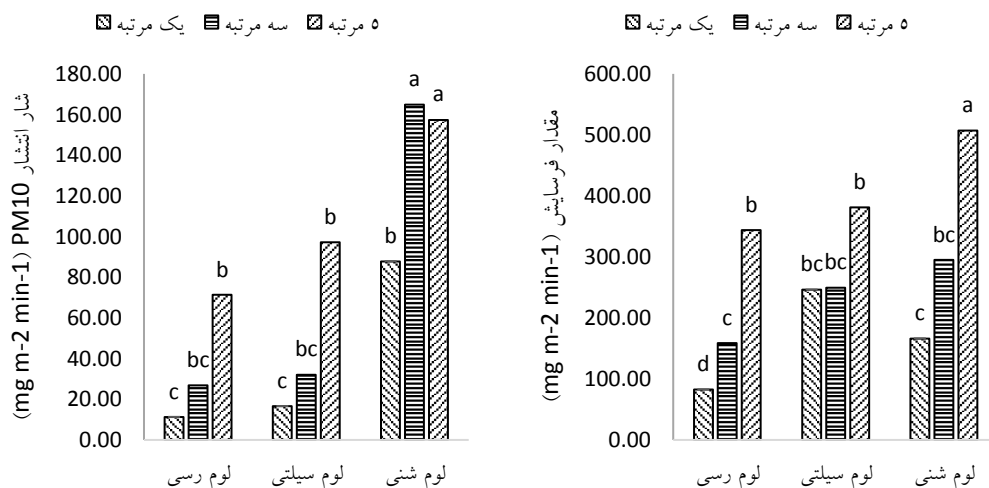
خاک در خاک لوم سیلتی، لوم شنی و لوم رسی به ترتیب به میزان ۵۴ درصد، ۲۰۵ درصد و ۳۱۷ درصد افزایش را نشان داد (شکل ۷). این تغییرات برای شار انتشار PM10 به ترتیب ۵۴۵، ۵۰۰ و ۸۰ درصد بود. ملاحظه می‌شود مقدار افزایش شار انتشار PM10 در خاک‌های رسی و سیلتی با افزایش دست‌خوردگی شدت بیشتری دارد. در یک مطالعه مشابه، Baddock *et al.* (2011) مشاهده کردند یک مرتبه عبور یک راس دام سنگین اثر معنی‌داری بر غلظت و شار انتشار PM10 نداشت اما با افزایش تعداد تردد به ۱۰ مرتبه، اثر قابل توجهی در میزان انتشار PM10 اتفاق افتاد. Chen (1991) نشان داد مقدار فرسایش در خاک‌های دست‌خورده در مقایسه با همان در حالت دست‌نخورده در حدود ۴ برابر بیشتر است. Baddock *et al.* (2011) معتقدند که دست‌خوردگی به تنهایی عامل انتشار PM10 از سطح خاک‌های دارای پوسته فیزیکی نیست و نقش ذرات جهشی در تداوم انتشار ذرات اهمیت زیادی دارد. وقتی که سطح خاک به هم خورده شود، ذرات شن جدا شده فرسایش را فعال و تقویت کرده و ذرات ریز به هوا منتشر می‌شوند (Chen and Fryrear, 1997). Gillette *et al.* (1982) اختلالات ناشی از فعالیت‌های انسانی<sup>۱</sup> را عامل اصلی فرسایش‌پذیری خاک‌های بیابانی دارای پوسته سطحی و فراهمی ذرات ریز قابل انتشار در هوا می‌دانند.

شدت به هم خوردگی پوسته سطحی خاک‌هایی با مقاومت متفاوت، مقدار آستانه سرعت اصطکاکی آنها به سمت آستانه سرعت اصطکاکی یک خاک شنی خشک بدون پوشش میل کرد.

#### مقدار هدررفت خاک و شار انتشار PM10

نتایج نشان داد نوع خاک و تعداد دفعات عبور دام تاثیر معنی‌داری بر میزان فرسایش و شار انتشار PM10 داشت. بیشترین هدررفت خاک و انتشار PM10 در خاک لوم شنی (به ترتیب ۳۲۲ و ۱۳۷  $\text{mg m}^{-2} \text{min}^{-1}$ ) و کمترین در خاک لوم رسی (به ترتیب ۱۹۴ و ۲۶  $\text{mg m}^{-2} \text{min}^{-1}$ ) مشاهده شد. خاک‌های شنی به دلیل مقدار رس، سیلت و املاح کمتر و در نتیجه خاکدانه‌سازی ضعیف‌تر نسبت به خاک‌های ریزبافت حساسیت بیشتری به فرسایش دارند (Belnap *et al.*, 2007). هدررفت خاک و انتشار PM10 در خاک لوم سیلتی به ترتیب ۲۹۴ و ۴۸  $\text{mg m}^{-2} \text{min}^{-1}$  به دست آمد. اختلاف بین میزان هدررفت خاک در خاک لوم شنی و لوم سیلتی معنی‌دار نبود، اما بین شار انتشار PM10 در این دو خاک اختلاف معنی‌داری مشاهده شد.

با افزایش تعداد دفعات عبور دام شار فرسایش خاک و شار انتشار PM10 در هر سه نمونه خاک به شدت افزایش یافت. طوری که با افزایش تعداد دفعات عبور دام از ۱ به ۵ بار مقدار فرسایش



شکل ۷- الف) مقدار هدررفت کل ذرات معلق و جهشی و ب) شار PM10 (میلی‌گرم در مترمربع در دقیقه) (ستون‌های دارای حروف لاتین متفاوت با یکدیگر اختلاف معنی‌دار دارند).

و به شدت نسبت به نیروهای فشاری و برشی ایجاد شده توسط وسایل نقلیه و یا تردد دام‌ها آسیب‌پذیر هستند. ایشان حفظ پوسته‌های سطحی را یکی از راهکارهای مناسب و موثر در کاهش فرسایش بادی عنوان کرده‌اند.

نکته قابل توجه این‌که، مقادیر فرسایش و شار PM10 در خاک‌های لوم رسی و لوم سیلتی در نهایت به یک عدد ثابت رسیده و اختلاف بین آنها پس از ۵ بار عبور دام معنی‌دار نیست. Belnap and Eldridge (2003) بیان داشتند که انواع مختلف پوسته‌های سطحی نقش حفاظتی در برابر فرسایش بادی را دارند

## نتیجه‌گیری

مردم منطقه راهکاری اندیشیده شود. به عنوان مثال، می‌توان از ورود دام به عرصه‌های حساس در فصل تابستان جلوگیری کرد و در عوض علوفه مورد نیاز آن‌ها را تامین کرد یا یارانه پرداخت شود؛ یا می‌توان بخشی از اراضی منطقه را که در حاشیه کانال آب قرار دارند و امکان کشت دارند، با رعایت اصول علمی و مدیریت مناسب و آموزش کشاورزان به کشت مداوم محصولات علوفه‌ای اختصاص داد. همچنین با توجه به حساسیت بسیار زیاد خاک‌های موجود در کانون‌های تولید گرد و غبار در خوزستان به دست‌خوردگی، استفاده از سیستم بدون خاک‌ورزی به جای خاک‌ورزی مرسوم توصیه می‌شود.

## سپاسگزاری

این مقاله از طرح پژوهشی داخلی دانشگاه شهید چمران اهواز به شماره ۱۳۲۴ استخراج شده است. بدین وسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Adib, A. and Gafari Rad, S. (2019). Development of a new integrated method for generation IDF curves based on three climatic changes scenarios. *International Journal of Science and Technology*. 26 (2), pp. 742-751.
- Ali Ehyaei, M. and Behbehani Zade, AA. (1993). *Methods of Soil Chemical Analysis*. Soil and Water Research Institute of Agricultural Extension and Education, Tehran, Iran.
- Baddock M. C., Zobeck T. M., Van Pelt R. S. and Fredrickson E. L. (2011). Dust emissions from undisturbed and disturbed, crusted playa surfaces: Cattle trampling effects. *Aeolian Research* 3, 31-41
- Belnap J, Büdel B. and Lange O.L. (2003). Biological soil crusts: characteristics and distribution. In *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*, Belnap J, Lange OL (eds). Springer-Verlag: Berlin; 3-30.
- Belnap, J. and Eldridge D. (2003). Disturbance and recovery of biological soil crusts. In *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*, Belnap J, Lange OL (eds). Springer-Verlag: Berlin; 363-383.
- Belnap, J. and Gillette, D.A.I. (1997). Disturbance of biological soil crusts: impacts on potential wind erodibility of sandy desert soils in southeastern Utah. *Land Degrad. Dev.* 8, 355-362
- Belnap, J., Phillips, S. L., Herrick, J. E. and Johansen, J. R. (2007). Wind erodibility of soils at Fort Irwin, California (Mojave Desert), USA, before and after trampling disturbance: implications for land management. *Earth Surface Processes and Landforms* 32:75-84.
- Belnap, J., Walker, B.J., Munson, S.M. and Gill, R.A. (2014). Controls on sediment production in two U.S. deserts. *Aeolian Res.* 14:15-24. doi:10.1016/j.aeolia.2014.03.007
- Brungard, C.W., Boettinger, J.L. and Hips, L.E. (2015). Wind erosion potential of lacustrine and alluvial soils before and after disturbance in the eastern Great Basin, USA: Estimating threshold friction velocity using easier-to-measure soil properties. *Aeolian Research*, 18, 185-203. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2015.07.006>
- Bu, C.F., Gale, W.J., Cai, Q.G. and Wu, S.F. (2013). Process and Mechanism for the Development of Physical Crusts in Three Typical Chinese Soils. *Pedosphere* 23: 321-332.
- Chen, W. (1991). Wind tunnel simulation on loessal soil erosion by wind (in Chinese with English abstract). *Acta Water and Soil Conservatia Sinica*. 5: 105-108.
- Chen, W. and Fryrear D.W. (1997). Influence of mechanical disturbance on erodibility of sandy loam soils by wind, paper presented *International Symposium on Wind Erosion*, U. S. Dep. of Agric., Agric. Res. Serv., Wind Erosion Res. Unit, Kans. State Univ., Manhattan, Kans., 3-5 June.
- Dargahian, F., Lotfinasab Asl S., Khosroshahi, M. and Gohardoust, A. (2017). Determining the share of internal and external resources of dust in Khuzestan province. *Iran nature journal*. 2 (5), 36-41 (in farsii)

- Fan, Y., Lei, T., Shainberg, I. and Cai, Q. (2008). Wetting rate and rain depth effects on crust strength and micromorphology. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72, pp. 1604-1610
- Geological Survey and Mineral Explorations of Iran (GSI) (2016). *Sedimentary geochemistry of dust sources in Khuzestan province*. Report (in farsi)
- Gillette, D.A., Adams, J., Muhs, D. and Kihl, R. (1982). Threshold traction velocities and rupture moduli for crusted desert soils for the input of soil particles into the air. *J. Geophysical Res.* 87(C11): 9003-9015.
- Katra I. (2020). Soil Erosion by Wind and Dust Emission in Semi-Arid Soils Due to Agricultural Activities. *Agronomy*, 10, 89; doi:10.3390/agronomy10010089
- Lopez, M.V., de Dios Herrero, J.M., Hevia, G.G., Gracia, R. and Buschiazzo, D.E. (2007). Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies. *Geoderma* 139, 407-411.
- Macpherson, T., Nickling, W.G., Gillies, J.A. and Etyemezian, V. (2008). Dust emissions from undisturbed and disturbed supply-limited desert surfaces. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F2): F02S04.
- Marticorena, B., Bergametti, G., Gillette, D., Belnap, J. (1997). Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and arid areas of the United States. *J. Geophys. Res.* 102 (D19), 23277-23287.
- Munson, S.M., Belnap, J., Okin, G.S. (2011). Responses of wind erosion to climate-induced vegetation changes on the Colorado Plateau. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 108, 3854-3859.
- Pi, H., Sharratt, B. (2019). Threshold friction velocity influenced by the crust cover of soils in the Columbia plateau. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 83 (1), 232-241. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.06.0230>.
- Ravi, S., Zobeck, T.M., Over, T.M., Okin, G.S. and D'Odorico, P. (2006). On the effect of moisture bonding forces in air-dry soils on threshold friction velocity of wind erosion. *Sedimentology* 53, 597-609.
- Research Institute of Forest and Rangeland (RIFR) of Iran, (2018). *Comprehensive studies of internal-origin dust control in Khuzestan province*. Report (in Persian)
- Shao, Y. (2000). *Physics and Modeling of Wind Erosion*. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands.
- Wu W., Yan P., Wang Y., Dong, M., Meng, X. and Xinran, J.I. (2018). Wind tunnel experiments on dust emissions from different landform types. *Journal of Arid Land*, <https://doi.org/10.1007/s40333-018-0100-4>.
- Yan, Y., Wu, L., Xin, X., Wang, X. and Yang, G. (2015). How rain-formed soil crust affects wind erosion in a semi-arid steppe northern China. *Geoderma* 249-250 (2015) 79-86
- Zarasvandi, A., Carranza E.J.M., Moore, F. and Rastmanesh, F. (2011). Spatiotemporal occurrences and mineralogical-geochemical characteristics of airborne dusts in Khuzestan Province (southwestern Iran). *J Geochem Explor* 111:138-151.
- Pagliai, M. and Stoops G. (2010). Physical and biological surface crusts and seals. In: Stoops G, Marcelino V, Mees F (eds) *Interpretation of micromorphological features of soils and Regoliths*. Elsevier, Amsterdam, pp 419-440.