



ارزیابی نقش حفاظتی پوسته‌های فیزیکی سطح خاک کانون‌های گرد و غبار خوزستان بر فرسایش بادی

حیدر غفاری گوشه^{۱*}

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز (h.ghafari@scu.ac.ir)

چکیده

تشکیل پوسته فیزیکی سطحی پس از بارندگی در خاک‌هایی با محتوای رس بیشتر از پنج در صد پدیده‌ای رایج در اغلب مناطق است. این پوسته فیزیکی به‌ویژه زمانی که خاک خشک است، نقش مهمی در محدود ساختن فراهمی ذرات برای فرسایش بادی به عهده دارند. تردد دام و وسایل نقلیه از علل اصلی تخریب و به‌هم‌خوردگی پوسته‌های سطحی هستند. در این مطالعه اثر به‌هم‌خوردگی پوسته فیزیکی توسط تردد دام بر آستانه سرعت برشی، میزان فرسایش خاک و شار انتشار PM10 بررسی شد. نمونه‌های خاک از کانون‌های گرد و غبار جنوب و جنوب شرقی خوزستان تهیه شد و درون سینی‌های مخصوص تونل باد ریخته شدند. برای شکل‌گیری پوسته فیزیکی، نمونه‌ها زیر بارانی مصنوعی با شدت ۲۵ میلی‌متر در ساعت با مدت زمان ۵ دقیقه قرار گرفتند. پس از تشکیل پوسته، با عبور دادن تعداد ۱۵ عدد دام سبک با دفعات ۱، ۳ و ۵ بار از روی نمونه خاک‌ها مقادیر متفاوت از تخریب ایجاد شد. نمونه‌ها داخل تونل باد قرار گرفتند و سرعت آستانه، مقدار فرسایش و شار انتشار PM10 اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد دفعات تردد دام از یک مرتبه به پنج مرتبه آستانه سرعت برشی فرسایش بین ۲۵ تا ۳۰ درصد و آستانه سرعت برشی انتشار PM10 بین ۳۵ تا ۴۸ درصد کاهش یافت. میزان کاهش در خاک لوم شنی بیشتر از دو خاک لوم رسی و سیلتی بود. مقدار فرسایش خاک به ترتیب در خاک لوم رسی، لوم سیلتی و لوم شنی به میزان ۱۱۷ درصد، ۵۴ درصد و ۲۱۸ درصد افزایش یافت. این تغییرات برای شار انتشار PM10 به ترتیب ۵۴۵، ۵۰۰ و ۸۰ در صد بود. با این حال، مقدار انتشار PM10 در خاک شنی به‌طور معنی داری بیشتر از دو خاک دیگر بود. حفظ پوسته‌های سطحی و جلوگیری از تخریب آنها به‌ویژه در فصول تابستان، می‌تواند تاثیر قابل توجهی در مهار فرسایش بادی و تولید گرد و غبار داشته باشد.

کلمات کلیدی: پوسته فیزیکی، آستانه سرعت برشی، تونل باد، PM10، گرد و غبار

مقدمه

در دهه‌های گذشته، فرسایش بادی و وقوع طوفان‌های گرد و غبار به یکی از مشکلات زیست محیطی جدی در استان نفت‌خیز خوزستان تبدیل شده است (Zarasvandi و همکاران، ۲۰۱۱). طوفان‌های گرد و غبار در خوزستان به طور عمده در طول تابستان رخ می‌دهند و دارای دو منشأ خارجی و داخلی هستند (درگاهیان و همکاران، ۱۳۹۷). منبع اصلی طوفان‌های گرد و غبار با منشأ خارجی عمدتاً بیابان‌های شنی و بسترهای خشک دریاچه‌ها و تالاب‌ها در کشورهای همسایه از جمله عراق، سوریه و عربستان بوده که توسط باد به ایران منتقل می‌شوند (Zarasvandi، ۲۰۰۹). 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 (اژدری، ۱۳۹۵) علاوه بر این در غرب استان نیز بخش‌های خشک شده تالاب هورالعظیم در غرب هویزه و نواحی پیرامون آن و همچنین بخش‌هایی از شمال خرمشهر نیز جزء مناطق منشأ هستند. طوفان‌های شدید گرد و غبار ناشی از کانون‌های شرق و جنوب شرق استان اغلب با وزش بادهای شرقی همراه است (سازمان هواشناسی اهواز، ۱۳۹۰). در بیشتر این پهنه‌ها کاهش رطوبت سطحی و شورشدن زمین در نتیجه خیزش آب‌های زیرزمینی به خوبی دیده می‌شود. حرکت آب‌های زیرزمینی کم عمق به سمت سطح خاک در نتیجه خاصیت موئینگی و تبخیر آن در سطح سبب تبلور نمک در فضای خالی بین ذرات خاک و متلاشی شدن ساختمان خاک شده، به گونه‌ای که در بسیاری از نقاط، در بخش سطحی خاک پوسته نمکی تشکیل شده و خاک زیر پوسته نمکی به عمق ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر حالت پفی پیدا کرده (اژدری، ۱۳۹۵) که با کوچکترین آشفستگی و تخریب به شدت مستعد فرسایش بادی می‌شود.

حساسیت خاک به فرسایش به چندین عامل از جمله آب و هوا، در دسترس بودن رطوبت، خصوصیات خاک، توپوگرافی، پوشش زمین و مدیریت بستگی دارد (Lal، ۱۹۹۴). علاوه بر اینها، عامل مهم و مؤثر دیگر بر فرسایش پذیری خاک که کمتر مورد توجه قرار گرفته است، تشکیل پوسته در سطح خاک‌ها به‌ویژه در مناطق خشک و بیابانی است که به عنوان یک عامل بسیار مهم در فرسایش بادی و آبی شناخته شده است (Belnap و Gillette، ۱۹۹۸؛ Graef و Stahr، ۲۰۰۰؛ Rice و McEwan، ۲۰۰۱؛ Singer و Shainberg، ۲۰۰۴). پوسته‌های سطحی خاک از جمله عوامل طبیعی هستند که می‌توانند خاک را در مقابل فرسایش بادی مقاوم سازند. در واقع، پاشخ خاک به نیروهای فرساینده باد و حتی آب تا حد بسیار زیادی توسط چند میلی‌متر اول خاک کنترل می‌شود. در خصوص نیروی باد، این توزیع اندازه و سازماندهی ذرات خشک است که مقاومت برشی و سرعت آستانه باد را برای شروع حرکت ذرات تعیین می‌کند. پوسته خاک یک لایه نازک از مواد یکپارچه در سطح خاک با ویژگی‌های ساختاری و مکانیکی متفاوت از منطقه زیرین است که در نتیجه فعل و انفعالات بین خواص فرآیندهای فیزیکی، بیولوژیکی و شیمیایی ایجاد می‌شود (Assouline، ۲۰۰۴؛ Lal و Bajracharya، ۱۹۹۹؛ Neave و Rayburg، ۲۰۰۷). به طور کلی، بر اساس مکانیسم غالب شکل‌گیری سه کلاس گسترده از پوسته‌های خاک یعنی بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی وجود دارد (Armenise و همکاران، ۲۰۱۸). پوسته‌های زیستی حاصل اجتماعی از ریزموجودات زنده خاک (مانند سیانوباکترها و خزها)، پوسته‌های شیمیایی حاصل تبلور املاح در سطح خاک‌های شور و پوسته فیزیکی حاصل عوامل فیزیکی از جمله برخورد قطرات باران می‌باشد (Williams و همکاران، ۲۰۱۸). مطالعات نشان داده که هر سه نوع پوسته‌ها نقش مهمی در افزایش آستانه سرعت فرسایش و در نتیجه کاهش فرسایش بادی دارند، البته تا زمانی که دست‌نخورده باقی بمانند (Belnap و همکاران، ۲۰۰۳). پوسته‌ها به دست‌خوردگی بسیار حساس هستند. Pi و Sharratt (۲۰۱۹) اثر پوشش پوسته‌ای بر سرعت آستانه فرسایش بادی را در پنج نوع خاک بررسی کردند و دریافتند که با افزایش پوشش سطحی خاک توسط پوسته فیزیکی سرعت آستانه فرسایش به شکل نمایی افزایش یافت. طوری که سرعت آستانه برای خاک دارای پوشش ۱۰۰٪ نسبت به خاک بدون پوشش پوسته‌ای دو برابر بزرگتر بود. Argaman و همکاران (۲۰۰۶) اثر پوسته سطحی بر آستانه شروع فرسایش بادی مطالعه و گزارش کردند که آستانه سرعت فرسایش بادی خاک‌های دارای پوسته دو برابر خاک‌های فاقد پوسته بود. در پژوهشی مشابه، Belnap و Gillette (۱۹۹۸) دریافتند که آستانه سرعت فرسایش بادی خاک شنی با پوسته

نازک بین ۳۰ الی ۲۷۰٪ بیشتر از همان خاک بدون پوسته سطحی بود. در پژوهشی دیگر در استرالیا، Leys و Eldridge (۱۹۹۸) گزارش دادند که سرعت آستانه خاک‌های مرتعی بین نیم تا یک و نیم برابر خاک‌های مرتعی فاقد پوسته بوده. Sharratt و Vaddella (۲۰۱۴) پس از ارزیابی پنج نوع خاک در بیابان‌های جنوب کالفرنیا، به این نتیجه رسیدند که آستانه فرسایش بادی با افزایش مقاومت و ضخامت پوسته سطحی به طور نمایی افزایش می‌یابد.

دست‌نخوردگی و حفاظت از پوسته‌های سطحی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. هرچند که به دلیل بالا بودن شوری خاک و وجود مقادیر زیاد رس در خاک اغلب کانون‌های گرد و غبار خوزستان، تشکیل سله و پوسته سطحی پدیده‌ای شایع است، اما تاکنون مطالعه‌ای در خصوص نقش پوسته‌های سطحی در این کانون‌ها بر مقدار فرسایش و آستانه سرعت بادی نشده است. لذا، این طرح با هدف بررسی تاثیر میزان توسعه‌یافتگی و دست‌خوردگی پوسته سطحی ناشی از تردد دام بر سرعت آستانه فرسایش بادی خاک در محیط کنترل شده آزمایشگاهی اجرا شد.

مواد و روش‌ها

۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه کانون‌های شرقی و جنوب شرقی اهواز را در بر می‌گیرد. این ناحیه دربرگیرنده پلايای خشک شده مالچ و آبگیرهای انتهایی رودخانه کوپال است که در طی خشکسالی‌های اخیر و کاهش آب ورودی خشک شده‌اند و به کانون تولید ریزگرد تبدیل شده‌اند. این منطقه به صورت دشت‌های آبرفتی وسیعی هستند که وجود فسیل‌های دوکفه‌ای و شکم پایان در بخش‌های فرسایش یافته آنها نشانه محیط‌های تالابی گذشته است. همچنین، بخش‌های وسیعی از این محدوده به ویژه در غرب رودخانه جراحی را زمین‌های کشاورزی دیم تشکیل می‌دهند که به دلیل خشکسالی‌های اخیر رها شده و به صورت کانون‌هایی جهت تولید ریزگرد تبدیل شده‌اند. با این حال، چرای مفرط و شدید این عرصه‌ها همچنان در منطقه رایج بوده و یکی از دلایل اصلی تخریب ساختمان خاک سطحی به شمار می‌رود. مساحت این مناطق در مجموع حدود ۱۵۶۲۰ هکتار است. اقلیم محدوده مطالعاتی بر اساس روش طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن اصلاح شده، فراخشک گرم تعیین شده و متوسط بارندگی سالانه ۲۱۰ میلی‌متر است. باد غالب منطقه در بهار و تابستان غرب و شمال غرب است و بیشترین فراوانی را هم در همین دو فصل یعنی دوره گرم سال دارد. در فصل پاییز و زمستان بادهای فراوانی کمتری برخوردارند، اما جهت غالب آنها همان غرب و شمال غرب می‌باشد در دوره سرد سال باد جنوب و جنوب شرق نسبت به فصل گرم از فراوانی و شدت بیشتری برخوردار است.

۲- جمع‌آوری نمونه خاک و تجزیه‌های آزمایشگاهی

با توجه به هدف مطالعه و بر اساس اطلاعات موجود سه نوع خاک با ویژگی‌های مختلف به ویژه از نظر بافت از سطح منطقه مورد مطالعه تهیه شد. ویژگی مشترک همه خاک‌های انتخاب شده استعداد تشکیل پوسته بود که با توجه به مشاهدات میدانی گزینش صورت گرفت. نمونه برداری در اواخر فصل زمستان و از عمق ۵ سانتی‌متری سطح خاک انجام شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و هواخشک گردیدند. سپس از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شدند و در سینی‌های مخصوص دستگاه تونل باد ریخته شدند. علاوه بر این، بخشی از نمونه خاک‌ها از الک ۲ میلی‌متر عبور داده شد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی هر کدام شامل بافت، توزیع اندازه خاکدانه‌ها در حالت

خشک، قابلیت هدایت الکتریکی، اسیدیته و ماده آلی طبق روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند (علی‌احیایی و بهبهانی زاده، ۱۳۸۵).

۳- ایجاد پوسته فیزیکی طبیعی

روش‌های مختلفی برای ایجاد پوسته سطحی وجود دارد؛ از قبیل خیس کردن با آب مقطر، خیس کردن با محلول نمکی و برخورد قطرات باران (Pi و Sharratt، ۲۰۱۹). در این آزمایش از شبیه‌ساز باران برای ایجاد پوسته‌های فیزیکی با توسعه‌یافتگی متفاوت استفاده شد. برای این کار، سینی‌های مخصوص را به‌طور کامل و تا لبه با خاک پر کرده و زیر دستگاه شبیه‌ساز باران قرار داده شدند. مطابق با بارندگی‌های رگباری در استان طی فصل بهار، بارانی با شدت ۲۵ میلی‌متر در ساعت به مدت ۵ دقیقه (۲،۲۵ میلی‌متر) بر تمام نمونه‌ها اعمال گردید. مطالعات نشان داده است که میزان توسعه‌یافتگی (ضخامت و مقاومت) پوسته سطحی تابعی از ویژگی‌های بارندگی و نوع خاک است (Yan و همکاران، ۲۰۱۵). پس از هوا خشک کردن خاک‌ها در هوای آزاد به مدت یک هفته، ضخامت و مقاومت پوسته سطحی در هر تیمار با استفاده از کولیس و پنترومتر دستی مدل D1558 اندازه‌گیری شد.

۴- اعمال تیمارهای دست‌خورده

پس از اعمال تیمار بارندگی، به منظور تشکیل و توسعه پوسته‌های سطحی نمونه‌ها هوا خشک شدند و از طریق عبور دادن تعداد ۱۵ راس گوسفند با دفعات ۱، ۳ و ۵ بار شدت‌های مختلفی از تخریب و دست‌خورده‌گی پوسته سطحی ایجاد شد.

۵- تونل باد

برای تعیین میزان تاثیر چوسته سطحی و به هم‌خوردگی آن بر آستانه سرعت فرسایش بادی از تونل باد ثابت مدار باز دانشکده کشاورزی شهید چمران اهواز استفاده شد. سینی مخصوص با ابعاد $3 \times 30 \times 50$ حاوی نمونه‌ها یکی یکی داخل تونل باد قرار گرفتند و سرعت باد با نرخ 0.05 متر بر ثانیه از صفر تا ۱۵ متر بر ثانیه افزایش یافت. سرعت آستانه فرسایش بادی در هر تیمار به روش مشاهده‌ای و لیزری تعیین گردید. سرعتی که در آن ذرات خاک شروع به جدا شدن کردند، آستانه فرسایش بادی در نظر گرفته شد. تشخیص شروع جابجایی و فرسایش به دو روش چشمی و لیزری توسط دستگاه غبارسنج مدل CASELLA-712 و باد سنج سیم‌داغ مدل TES-1341 صورت گرفت. غلظت گرد و غبار توسط دستگاه شمارشگر ذرات در فواصل زمانی یک ثانیه ثبت گردید.

۶- تعیین زبری ایرودینامیکی و آستانه سرعت برشی

سرعت برشی اصطلاحی است که برای استانداردسازی سرعت باد مورد استفاده قرار می‌گیرد و بعد آن همانند سرعت باد متر بر ثانیه (m/s) می‌باشد. سرعت برشی بیانگر سرعت نرمال شده یا مولفه افقی تنش رینولدز در امتداد بردار متوسط باد می‌باشد (Weber، ۱۹۹۹). زبری ایرودینامیکی نیز ارتفاعی است که سرعت باد در آنجا برابر صفر است (Zhang و همکاران، ۲۰۱۷). برای تعیین زبری ایرودینامیکی (z_0) و سرعت برشی (u^*) از معادله تجربی نیم‌رخ سرعت باد که لگاریتمی است و به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (Pi و Sharratt، ۲۰۱۹)، بهره گرفته شد.

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

که در آن u_z سرعت باد ($m.s^{-1}$) در ارتفاع z (m) و k ثابت وان کارمن (0.4) است. برای این کار لازم است که پروفیل سرعت باد حداقل در دو نقطه با فواصل مختلف از سطح خاک اندازه‌گیری شود. شیب و عرض از مبدا رابطه خطی بین u_z و $\ln(z)$ به ترتیب دربرگیرنده سرعت برشی (u^*) و زبری ایرودینامیکی (z_0) هستند.

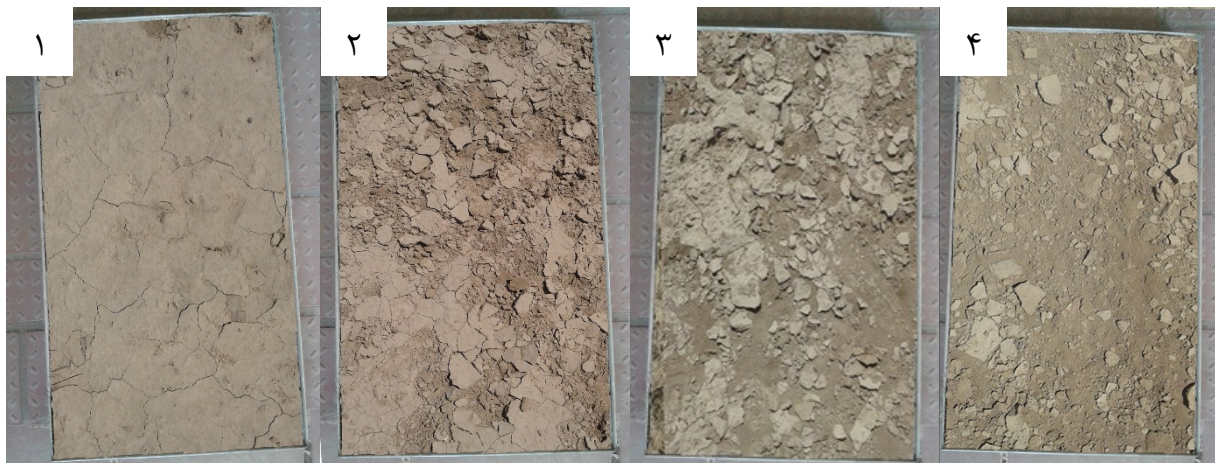
برای تعیین آستانه سرعت برشی، سینی‌ها داخل تونل باد قرار گرفتند و سرعت باد به تدریج از صفر تا ۱۵ متر بر ثانیه افزایش یافت. سرعتی که در آن حرکت ذرات خاک مشاهده شد، به عنوان سرعت آستانه فرسایش در نظر گرفته شد.

۷- اندازه‌گیری میزان فرسایش خاک و انتشار PM10

برای تعیین میزان هدررفت خاک در اثر فرسایش بادی، سینی حاوی خاک در داخل تونل باد به مدت ۵ دقیقه در معرض باد با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه (در ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری بالای نمونه خاک) قرار گرفت. شمارشگر لیزری در فاصله افقی ۲۰ سانتی‌متری سینی و در ارتفاع ۵ سانتی‌متری نسبت به سطح نمونه خاک نصب شد. در ورودی دستگاه شمارشگر یک قیف پلاستیکی با قطر ۵ سانتی‌متر نصب شد تا ذرات معلق و جهشی برخاسته از سطح خاک بین ارتفاع ۲.۵ و ۷.۵ سانتی‌متری وارد دستگاه شوند. غلظت گرد و غبار بر اساس گرم در متر مکعب در هر ثانیه ثبت شد. مقدار خاک فرسایش یافته از طریق معادله زیر محاسبه شد (Wu و همکاران، ۲۰۱۸):

$$TSP = C_p V_w \cdot A$$

که در آن، TSP کل ذرات معلق (mg)، C_p غلظت ذرات معلق و جهشی قرائت شده توسط دستگاه شمارنده لیزری ذرات گرد و غبار ($mg.m^{-3}$)، V_w سرعت باد درون تونل باد ($m.s^{-1}$) و A سطح مقطع فرضی با ارتفاع ۵ سانتی‌متر و عرض برابر با عرض سینی‌های مخصوص تونل باد.



شکل ۱- دست‌خوردگی پوسته سطحی در اثر تردد دام. (۱) بدون تردد، (۲) یک بار عبور، (۳) سه بار عبور و (۴) پنج بار عبور

به منظور اندازه‌گیری شار انتشار PM10 از فیلتر مخصوصی در ورودی غبارسنج لیزری استفاده شد که فقط اجازه عبور ذرات کوچکتر از ۱۰ میکرومتر را داد. در این حالت، عدد قرائت شده توسط دستگاه غبارسنج، نشان‌دهنده غلظت PM10 است. محاسبات مشابه فوق انجام شد.

۵) تجزیه و تحلیل داده‌ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار با استفاده از نرم افزار SPSS تجزیه و تحلیل شد. فاکتورهای اصلی شامل سه نوع خاک مختلف و چهار سطح دست‌خوردگی بود.

نتایج و بحث

الف) مشخصات خاک‌ها و پوسته فیزیکی تشکیل شده

برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. خاک‌ها در سه گروه بافتی لوم رسی، لوم سیلتی و لوم شنی قرار دارند. کانون‌های گرد و غبار خوزستان به دلیل موقعیت جغرافیایی عمدتاً شامل حوضه‌های دریاچه‌ها و تالاب‌های قدیمی (پلایاها) هستند که از رسوبات منفصل، سست و غیر سیمانی تشکیل شده‌اند (ازدری، ۱۳۹۵). 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 هستند.

جدول ۱ - مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

بافت خاک	رس %	سیلت %	شن ریز %	ماده آلی %	هدایت الکتریکی $dS.m^{-1}$	اسیدیته آهک %	ضخامت متوسط پوسته (mm)	مقاومت پوسته به نفوذ $(N.cm^{-2})$
لوم رسی	۳۲	۳۴	۵,۲	۰,۴۱	۴۳,۷	۸,۲	۶,۱ ^a	۹۵ ^a
لوم سیلتی	۱۶	۵۶	۱۵,۶	۰,۴۳	۲۶,۴	۸,۱	۵,۶ ^a	۱۰۶ ^a
لوم شنی	۹,۶	۲۶	۱۰,۷	۰,۳۶	۷,۶	۸,۱	۳,۷ ^b	۷۵ ^b

نتایج نشان داد که ضخامت و مقاومت پوسته تشکیل شده در خاک لوم رسی و لوم سیلتی نسبت به خاک لوم شنی به طور معنی داری بیشتر بود. ضخامت و مقاومت پوسته فیزیکی علاوه بر اینکه به شدت و مقدار بارندگی بستگی دارد تحت تاثیر خصوصیات خاک و همچنین شدت خیس و خشک شدن قرار دارد (فان و همکاران، ۲۰۰۸). از آنجایی که خصوصیات باران و شدت خشک شدن برای همه نمونه‌ها یکسان بود، اختلاف موجود در نمونه‌های خاک، به خصوصیات خاک‌ها مرتبط می‌شود. Yan و همکاران، (۲۰۱۵) حداقل بارش لازم برای تشکیل پوسته سطحی در اراضی خشک و نیمه خشک را ۰,۵ میلی‌متر گزارش کرده است.

ب) تحلیل واریانس

نتایج تجزیه واریانس متغیرهای اندازه‌گیری شده نشان داد که اثر خاک و تعداد دفعات عبور دام بر کلیه متغیرهای اندازه‌گیری شده در سطح ۵ درصد معنی دار بود. به استثناء زبری ایرودینامیکی که اثر تردد دام بر آن معنی دار نبود (جدول ۲). اثرات متقابل نیز به جز بر میانگین هندسی قطر ذرات و زبری ایرودینامیکی، بر سایر پارامترها در سطح ۵ درصد معنی دار بود.

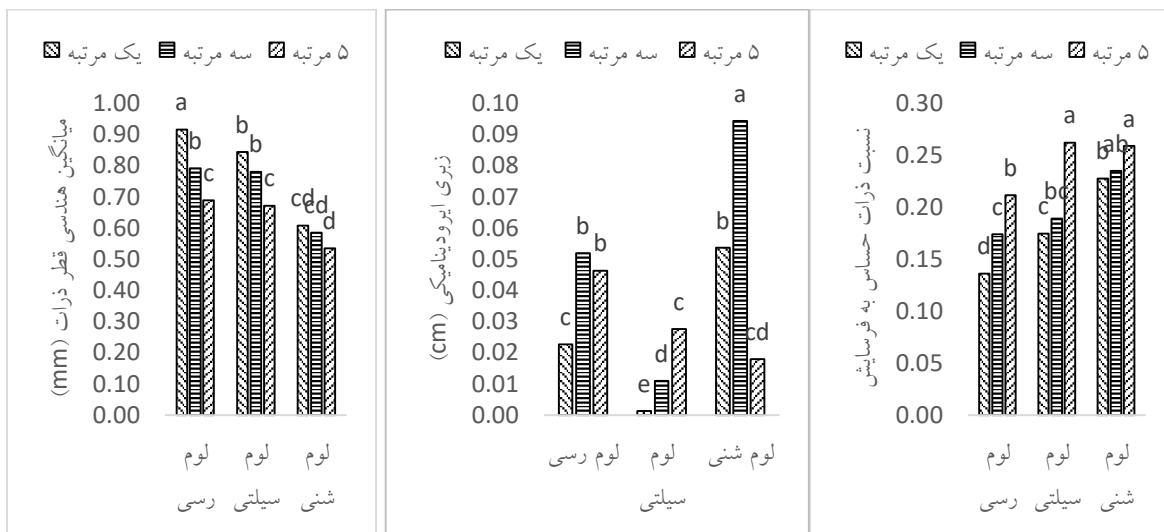
جدول ۲ - جدول تجزیه واریانس متغیرهای اندازه گیری شده

میانگین مربعات							درجه آزادی	منبع تغییر
شار انتشار M10	شار فرسایش	آستانه انتشار ذرات PM10	آستانه سرعت برشی فرسایش	زبری ایروودینامیکی	ذرات حساس به فرسایش	میانگین هندسی قطر ذرات		
30588 **	40117 **	.108 **	.044 **	.001 ns	.010 **	0.130 **	2	خاک
8232 **	144367 **	.087 *	.022 *	.004 *	.007 **	0.056 **	2	تردد دام
1679 **	8223 *	.079 **	.013 *	.002 ns	.002 *	0.004 n.s	4	خاک * تردد دام
16	2716	.017	.006	.001	.001	0.002	18	خطا

(ج) مقایسه میانگین‌ها

۱- پایداری خاکدانه‌ها و زبری ایروودینامیکی سطح

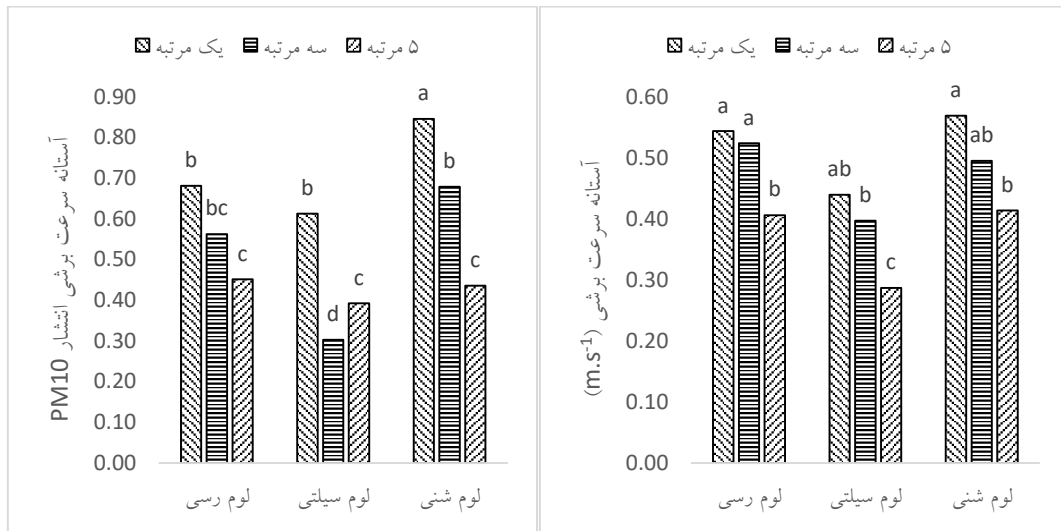
بین خاک‌های مختلف و تعداد دفعات عبور دام اختلاف معنی‌داری بین میانگین هندسی قطر ذرات و همچنین نسبت ذرات حساس به فرسایش (کوچکتر از ۰.۱ میلی متر) مشاهده شد. خاک لوم شنی دارای بیشترین نسبت ذرات حساس به فرسایش و کمترین میانگین هندسی قطر ذرات بود. در مقابل خاک لوم رسی دارای کمترین نسبت ذرات حساس به فرسایش و بیشترین میانگین هندسی قطر خاکدانه بود. دلیل آن را می‌توان ساختمان قوی تر خاک لوم رسی و لوم سیلتی عنوان کرد. در مورد اثر تعداد دفعات تردد دام در هر سه خاک با افزایش تردد نسبت ذرات حساس به فرسایش افزایش و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها کاهش یافت. شدت این تغییرات در خاک‌های ریز بافت شدیدتر بود. طوری که با 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 در صد و ۵۲ در صد افزایش و میانگین هندسی قطر ذرات به ترتیب ۲۵ در صد و ۲۰ در صد کاهش یافت. شدت تغییرات نسبت ذرات حساس به فرسایش و 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. بین زبری سطح بافت‌های مختلف خاک اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد اما اختلاف بین تعداد دفعات عبور دام معنی دار بود. به طور کلی، با افزایش تعداد دفعات تردد دام، زبری سطح افزایش یافت. 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 ۲- میانگین نسبی زبری ایرودینامیکی (راست)، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (وسط) و ذرات حساس به فرسایش (چپ).

۲- آستانه سرعت برشی سطح خاک

تقریباً در هر سه خاک با افزایش تعداد دفعات عبور دام و شدت تخریب پوسته فیزیکی تغییرات آستانه سرعت برشی فرسایش و آستانه سرعت برشی انتشار PM10، روند کاهشی را نشان داد (شکل ۵). در مورد خاک لوم رسی و سیلتی با افزایش تعداد دفعات تردد دام از یک مرتبه به پنج مرتبه آستانه سرعت برشی فرسایش و آستانه سرعت برشی انتشار PM10 به ترتیب حدود ۲۵ درصد و ۳۵ درصد کاهش یافته است. در مورد خاک لوم شنی میزان کاهش آستانه سرعت برشی فرسایش و انتشار PM10 به ترتیب ۳۰ و ۴۸ درصد بود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که خاک‌های سبک‌تر نسبت به تردد دام حساسیت بیشتری دارند و بنابراین نیاز به مدیریت چرای مناسب‌تری دارند. Belnap و همکاران (۲۰۰۶) نیز طی مطالعه‌ای گزارش دادند که لگدکوب شدن سطح خاک‌های دارای پوسته‌های زیستی به شدت باعث افت آستانه سرعت فرسایشی باد شد. ایشان ارتباط تنگاتنگی بین آستانه سرعت برشی و میزان فرسایش با مقدار توده زیستی مشاهده کردند.



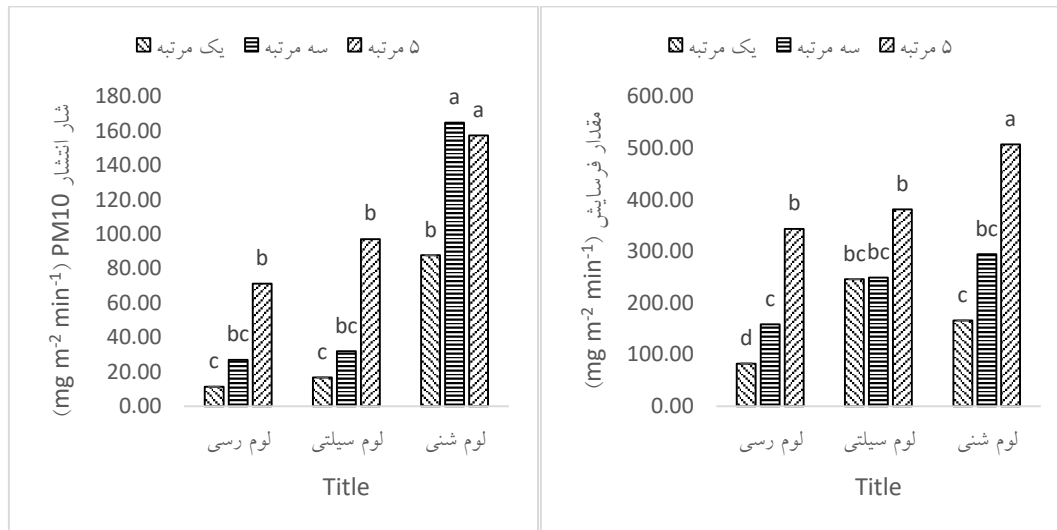
شکل ۳- آستانه سرعت برشی باد (u^*t) برای کل ذرات خاک (راست) و ذرات PM10 (چپ)

لازم به ذکر است که سرعت آستانه نمونه های شاهد (بدون تردد دام و دست خوردگی) بیشتر از حداکثر سرعت باد ایجاد شده در تونل باد (۱۵ متر بر ثانیه) بود که نشان دهنده مقاومت پوسته های تشکیل شده در سطح در برابر فرسایش است. مقدار فرسایش خاک و انتشار PM10 در این تیمارها صفر بود و هیچ گونه فرسایشی مشاهده نشد. همانطور که مطالعات دیگر اثبات کرده اند، پلایاها یا حوضه های رسوبی تشکیل شده در اثر خشک شدن دریاچه ها که غالباً به صورت یکپارچه و دارای پوسته های سطحی مقاوم هستند، یک سیستم رسوبی عرضه-محدود کلاسیک در نظر گرفته میشوند و درجات مختلفی از آشفتنگی و به هم خوردگی عامل اصلی و مستقیم تغییر این محدودیت است (Macpherson و همکاران، ۲۰۰۸).

۳- مقدار فرسایش و انتشار ذرات PM10

مقدار هدررفت مجموع ذرات معلق و جهشی و همچنین شار انتشار PM10 در خاک های مختلف و با تعداد دفعات عبور دام تغییرات معنی داری را نشان داد. بیشترین هدررفت خاک و انتشار PM10 در خاک لوم شنی (به ترتیب ۳۲۲ و ۱۳۷ mg m⁻² min⁻¹) و کمترین در خاک لوم رسی (به ترتیب ۱۹۴ و ۲۶ mg m⁻² min⁻¹) مشاهده شد. خاک های شنی به دلیل مقدار رس، سیلت و املاح کمتر و در نتیجه خاکدانه سازی ضعیف تر نسبت به خاک های ریزبافت حساسیت بیشتری به فرسایش دارند (Belnap و همکاران، ۲۰۰۷). هدررفت خاک و انتشار PM10 در خاک لوم سیلتی به ترتیب ۲۹۴ و ۴۸ mg m⁻² min⁻¹ به دست آمد. بین میزان هدررفت خاک در خاک لوم شنی و لوم سیلتی اختلاف معنی داری نبود، اما اختلاف معنی داری بین شار انتشار PM10 در این دو خاک وجود داشت. با افزایش تعداد دفعات عبور دام شار فرسایش خاک و شار انتشار PM10 در هر سه خاک به شدت افزایش یافت. به طوری که با افزایش تعداد دفعات عبور دام از ۱ به ۵ بار مقدار فرسایش خاک به ترتیب در خاک لوم رسی، لوم سیلتی و لوم شنی به میزان ۱۱۷ درصد، ۵۴ درصد و ۲۱۸ درصد افزایش را نشان داد. این تغییرات برای شار انتشار PM10 به ترتیب ۵۴۵، ۵۰۰ و ۸۰ درصد بود. ملاحظه می شود مقدار افزایش شار انتشار PM10 در خاک های رسی و سیلتی با افزایش دستخوردگی شدت بیشتری دارد. Eldridge و Belnap (۲۰۰۳) بیان داشتند که انواع مختلف پوسته های سطحی نقش حفاظتی در برابر فرسایش بادی را 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.



شکل ۴- مقدار هدررفت کل ذرات معلق و جهشی و چپ) شار PM_{10} (میلی گرم در متر مربع در دقیقه)

نتیجه‌گیری

بر اساس بازدیدها و مشاهدات به نظر می‌رسد یکی از عوامل اصلی ناپایداری و تخریب پوسته‌های سطح خاک تردد دام و وسایل نقلیه است که در کانون‌های گرد و غبار خوزستان به دلیل وجود شرکت‌های مختلف نفت و گاز و همچنین شغل اصلی مردم ساکن در این مناطق یعنی دام‌داری، این دست‌خوردگی به شکل زیادی اتفاق می‌افتد. تردد بیش از حد دام و وسایل نقلیه در این کانون‌ها، علاوه بر این که باعث تخریب پوشش گیاهی شده‌اند، پوسته‌های سطحی خاک را به عنوان آخرین مکانیزم دفاعی خاک در برابر فرسایش تخریب می‌کنند. همانطور که نتایج این تحقیق نشان داد، میزان فرسایش و انتشار PM_{10} در اثر افزایش تردد دام از ۱ مرتبه به پنج مرتبه و دست‌خوردگی پوسته‌های حساس سطح خاک، به ترتیب ۱۰۰ درصد و ۵۰۰ درصد افزایش یافت. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مدیریت چرا و کنترل تردد دام در عرصه‌های تولید گرد و غبار یکی از مهمترین عوامل کنترل کننده گرد و غبار است. البته از آنجایی که معیشت مردم در این مناطق وابسته به دام‌داری و کشاورزی است لازم است برای تامین علوفه ورد نیاز دام‌های مردم منطقه راهکاری اندیشیده شود. به عنوان مثال، می‌توان با تامین علوفه دولتی در فصل تابستان یا اختصاص دادن بخشی از اراضی این منطقه که در حاشیه کانال آب قرار دارند به کشاورزی پیشرفته و اصولی جهت تولید علوفه، از ورود دام‌ها به ویژه در فصل تابستان جلوگیری کرد.

منابع

۱. اژدری ع، ۱۳۹۵. گزارش ژئوشیمی رسوبی کانون های گردوغبار در استان خوزستان. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور. مدیریت زمین شناسی و اکتشافات معدنی منطقه جنوب باختری (اهواز).
۲. درگاهیان ف، لطفی نسب اصل س، خسروشاهی م، ۱۳۹۶. تعیین سهم منابع داخلی و خارجی گردوغبار در خوزستان. طبیعت ایران، جلد ۲، شماره ۵.
۳. سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۰. مرکز پردازش داده های هواشناسی استان اهواز، خوزستان، ایران.
۴. علی احيایی، م. بهبهانی زاده، ع.ا. ۱۳۷۲. شرح روش های تجزیه شیمیایی خاک. موسسه تحقیقات خاک و آب کشور. جلد ۱ و ۲.
5. Argaman, E., A. Singer, and H. Tsoar. 2006. Erodibility of some crust forming soils/sediments from the Southern Aral Sea Basin as determined in a wind tunnel. *Earth Surf. Process. Landf.* 31:47–63. doi:10.1002/esp.1230
6. Armenise, E., Simmons, R.W., Ahn, S., Garbout, A., Doerr, S.H., Mooney, S.J., Sturrock, C.J. and Ritz, K. (2018) Soil Seal Development under Simulated Rainfall: Structural, Physical and Hydrological Dynamics. *Journal of Hydrology*, 556, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.073>.
7. Assouline, S., 2004. Rainfall-induced soil surface sealing: a critical review of observations, conceptual models, and solutions. *Vadose Zone J.* 3 (2), 570–591.
8. Zhang F., Sha M., Wang G., Li Z., and Shao Y., 2017. Urban aerodynamic roughness length mapping using multitemporal SAR Data. *Advances in Meteorology*. doi.org/10.1155/2017/8958926
9. Macpherson, T., Nickling, W.G., Gillies, J.A., Etyemezian, V., 2008. Dust emissions from undisturbed and disturbed supply-limited desert surfaces. *J. Geophys. Res.* 113, F02S04. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JF000800>.
10. Belnap, J., S. L. Phillips, J. E. Herrick, and J. R. Johansen. 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.
11. Belnap, J., and D. Eldridge. 2003. Disturbance and recovery of biological soil crusts. Pages 363–383 in J. Belnap and O. L. Lange, editors. *Biological soil crusts: structure, function, and management*. Springer, Heidelberg, Germany.
12. Belnap, J. 2006. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrol. Processes* 20:3159-3178. doi:10.1002/hyp.6325
13. Weber, R. 1999. Remarks on the definition and estimation of friction velocity. *Boundary-Layer Meteorol.* 93, 197–209.
14. Bajracharya RM, Lal R. 1999. Land use effects on soil crusting and hydraulic response of surface crusts on a tropical Alfisol. *Hydrological Processes* 13: 59–72.
15. Belnap J, Büdel B, Lange OL. 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.
16. Belnap J, Gillette DA. 1998. Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance. *Journal of Arid Environments* 39: 133–142.
17. Belnap, J., B.J. Walker, S.M. Munson, and R.A. Gill. 2014. Controls on sediment production in two U.S. deserts. *Aeolian Res.* 14:15–24. doi:10.1016/j.aeolia.2014.03.007
18. Graef F, Stahr K. 2000. Incidence of soil surface crust types in semi-arid Niger. *Soil & Tillage Research* 55: 213–218. Heil JW, Juo ASR, McInnes KJ. 1997. Soil properties influencing surface sealing of some sandy soils in the Sahel. *Soil Science* 162: 459–469.



19. Lal R. 1994. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. *Soil Erosion Research Methods* 2: 1– 9.
20. Leys, J.F., and D.J. Eldridge. 1998. Influence of cryptogamic crust disturbance to wind erosion on sand and loam rangeland soils. *Earth Surf. Process. Landf.* 23:963–974. doi:10.1002/(SICI)1096-9837(199811)23:11<963::AIDESP914>3.0.CO;2-X
21. Neave, M., Rayburg, S., 2007. A field investigation into the effects of progressive rainfall-induced soil seal and crust development on runoff and erosion rates: the impact of surface cover. *Geomorphology* 87 (4), 378–390.
22. Pi, H., B.S. Sharratt, X. Li, and Z. Zheng. 2014. Threshold Friction Velocity Influenced by the Crust Cover of Soils in the Columbia Plateau. *Soil Sci. Soc. Am. J.* doi:10.2136/sssaj2018.06.0230
23. 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>.
24. Rajot J.L., S.C. Alfaro, L. Gomes, A. Gaudichet. 2003. Soil crusting on sandy soils and its influence on wind erosion
25. Rice MA, McEwan IK. 2001. Crust strength: A wind tunnel study of the effect of impact by saltating particles on cohesive soil surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 721–733.
26. Sharratt, B.S., and V. Vaddella. 2014. Threshold friction velocity of crusted windblown soils in the Columbia Plateau. *Aeolian Res.* 15:227–234. doi:10.1016/j.aeolia.2014.08.002
27. Singer M. J. and Shainberg I., 2004. Mineral soil surface crusts and wind and water erosion. *Earth Surf. Process. Landforms* 29, 1065–1075.
28. Williams, A.J., Pagliai, M., Stoops, G., 2018. Physical and biological surface crusts and seals. *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Elsevier, pp. 539–574.
29. Yan Y., Wu L., Xin X., Wang X., Yang G., 2015. How rain-formed soil crust affects wind erosion in a semi-arid steppe northern China. *Geoderma* 249–250 (2015) 79–86
30. Zarasvandi A, Carranza EJM, Moore F, Rastmanesh F (2011) Spatio-temporal occurrences and mineralogical–geochemical characteristics of airborne dusts in Khuzestan Province (southwestern Iran). *J Geochem Explor* 111:138–151
31. Zarasvandi, A., 2009. Environmental impacts of dust storms in the Khuzestan province. Environmental Protection Agency (EPA) of Khuzestan province, Internal Report. 375p.