

Determining the Most Important Indicators of Surface Crust Resistance and Their Effect on Wind Erosion Control in Dust Storm Sources in Khuzestan

A. Danesh¹, A. Sadeghipour^{2*}, N. Kamali³, H. R. Abbasi⁴

1. Ph. D. student, Desert Studies Faculty, Semnan University, Semnan, Iran.
2. Associate professor, Desert Studies Faculty, Semnan University, Semnan, Iran.
3. Associate Professor, Rangeland research division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.
4. Assistant Professor, Desert research division, Research Institute of Forests and rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

* Corresponding Author: a.sadeghipour@semnan.ac.ir

Received date: 11/12/2023

Accepted date: 11/01/2024

 [10.22034/JDMAL.2024.2017702.1445](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2024.2017702.1445)

Extended Abstract

Introduction

In most arid and semi-arid areas, the soils have a compact surface layer that is denser and less permeable than the underlying layers. These layers are referred to as surface coating when they are wet, and when they dry, they are referred to as surface crust. Surface crust can be divided into physical, chemical, and biological crusts depending on the nature of formation. Physical and biological soil crusts are the most significant types of soil crusts in arid and semi-arid regions. Two types of the physical crust are structural and depositional. Natural events, such as raindrops and the drying process, are the primary causes of the formation of surface crust. The process involves the creation of hard, thin layers on the surface of the soil. The thickness of the surface crusts is typically between 1 mm and 5 cm. Many researches have described different theoretical mechanisms for the formation of surface crusts in soil and reported their effective role in controlling wind erosion. The formation of crust in soil involves multiple stages, and the reaction of the soil surface to raindrop energy is divided into two main parts, as it was demonstrated. The first part involves the splashing of soil particles by raindrops' impact. A layer with a thickness of approximately 0.1 mm is produced in this instance. The second component is composed of fine soil particles that penetrate the soil pores with water and cause the formation of a layer that is 2 mm thick. According to a study, soil loss control is not affected by the crust cover beyond 30%. There is a linear relationship between soil loss and surface crust coverage, as the surface crust cover develops gradually, soil loss differs between soil types.

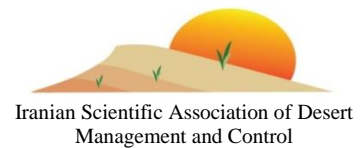
Material and Methods

During field surveys of dust storm sources in Khuzestan, it was observed that there are surface crusts that are strong enough to act as a barrier against wind erosion in certain locations. The



Desert Management

www.isadmc.ir



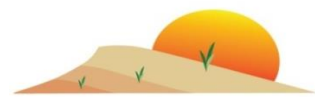
suggestion was made to investigate the type and general characteristics of these surface crusts. The purpose of this study is to examine the general characteristics of these surface crusts and their effect on wind erosion control. The study was conducted by randomly obtaining 18 surface crust samples, each containing three sub-samples from a depth of 0 to 5 cm from the dust storm sources of Khuzestan province. After being air dried, they were then passed through a sieve of 2 mm. The factors of pH, EC, CaCo₃, CEC, ESP, Ca, Mg, Po³⁻₄ texture, initial moisture, and apparent density of the surface crusts were measured. The soil's sensitivity to crust formation was assessed by using soil stability index, Crusting Index, pressure resistance, and shear resistance. The stability of soil aggregates was assessed using the mean weight diameter and geometric mean diameter indices. Soil samples were collected and tested in a wind tunnel to examine the impact of these surface crusts on wind erosion control and the amount of soil loss and the speed of wind erosion were assessed. An orbital wind tunnel device was utilized for this purpose. Trays with soil were placed on the bottom of the tunnel in this manner. After the wind blew (speeds of 15, 10, 25 m/s) by measuring the difference in the weight of the tray before and after the wind blowing, the amount of erosion was calculated from a certain surface. Then, the threshold speed for wind erosion was determined. Statistical analysis was carried out using SPSS 26 software. The Kolmogorov-Smirnov test was used to verify data normality. Then, the data sets were entered into a step-by-step regression as independent components to determine their relationship with the index of crust formation and stability of soil aggregates, as well as the effect of crusts and stability of soil aggregates on the amount of wind erosion. The accuracy of the regression models was verified by using RMSE, RSE, MAE, and R² statistics. The morphology of the crusts was finally determined by using a scanning electron microscope.

Results and Discussion

The results showed that the lowest amount of RMSE, and RSE statistics, and the lowest absolute error for evaluating the sensitivity of soil to crust formation in the dust storm sources of East Ahvaz, Southeast Ahvaz and Omidieh, Mahshahr and Hendijan, respectively belong to the index of compressive strength, soil stability and shear resistance. The scanning electron microscope images taken of the crusts of three dust storm sources indicated that small foreign matter is present in the soil's pores. The features of the sedimentary crust are displayed in all the images. The external materials in the crust structure reflect the different washing processes in soil particles, which cause adhesion and connection between the soil particles and make the crusts resistant to wind erosion. Based on the given explanations, it is possible that the crusts found in Khuzestan's dust storm sources are usually sedimentary crusts. Results also showed that the wind erosion threshold speed in the dust storm sources of East Ahvaz, South East Ahvaz and the sources of Mahshahr, Omidie and Hendijan are 1.44, 1.62 and 2.1 times their powdered state, respectively. These sources experience a soil loss of 3.55, 2.09, and 3.01 times the intact crusts, respectively.

Keywords: Aggregate Stability; Wind Tunnel; Threshold speed; Pressure resistance; Shear resistance





تعیین مهم‌ترین شاخص‌های مقاومت سله و تأثیر آن بر کنترل فرسایش بادی در کانون‌های گردوغبار خوزستان

عابد دانش^۱، احمد صادقی پور^{۲*}، نادیا کمالی^۲، حمیدرضا عباسی^۴

۱. دانشجوی دکتری مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
۲. دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
۳. دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات مرتع، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
۴. استادیار پژوهش، بخش تحقیقات بیابان، موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: a.sadeghipour@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۱



10. 22034/JDMAL. 2024. 2017702. 1445

چکیده

بررسی حاضر به منظور تعیین برخی ویژگی‌های سله و ارتباط آن با کنترل فرسایش بادی در کانون‌های گردوغبار خوزستان انجام شد. برای انجام این پژوهش، تعداد ۱۸ نمونه سله هر کدام شامل سه نمونه فرعی از عمق ۵cm تا ۰ از کانون‌های گردوغبار استان خوزستان برداشت شد، پس از هوا خشک شدن از الک ۲mm عبور داده شد. سپس متغیرهای pH، EC، CaCO₃، Ca، ESP، CEC، Ca، Mg، K، PO₄³⁻، بافت، رطوبت اولیه، چگالی ظاهری سله‌ها اندازه‌گیری شد همچنین میزان حساسیت خاک به تشکیل سله با به‌کارگیری شاخص‌های پایداری خاک، سلبندی خاک، مقاومت فشاری، مقاومت برشی ارزیابی شد و از شاخص‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها برای بررسی میزان پایداری خاکدانه‌ها بهره‌گیری شد. همچنین برای بررسی تأثیر این سله‌ها بر میزان کنترل فرسایش بادی نمونه‌هایی برای آزمایش تونل باد برداشت شد و مقدار بادبردگی و سرعت آستانه فرسایش بادی آنها تعیین شد. برای بررسی صحت و دقت مدل‌های رگرسیونی از آماره‌های AME، RSE، RMSE و R² استفاده شد. نتایج بررسی ساختار سله‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که بیشتر سله‌های موجود در کانون‌های گردوغبار از نوع رسوبی می‌باشند همچنین مطابق با یافته‌های بررسی حاضر برای ارزیابی حساسیت خاک به تشکیل سله در کانون گردوغبار شرق اهواز شاخص مقاومت فشاری، در کانون گردوغبار جنوب شرق اهواز شاخص پایداری و در کانون گردوغبار امیدیه، ماهشهر و هندیجان شاخص مقاومت برشی شناخته می‌شود از مقایسه سرعت آستانه فرسایش بادی و مقدار هدررفت خاک در سله سطحی و نیز نمونه‌های تخریب‌شده آن چنین نتیجه گرفته می‌شود که در سله‌های سطحی هر کانون میزان فرسایش بادی از حالت تخریب‌شده آن کمتر است.

واژگان کلیدی: پایداری خاکدانه؛ تونل باد؛ سرعت آستانه؛ مقاومت فشاری؛ مقاومت برشی



■ مقدمه

بیشتر خاک‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارای لایه سطحی فشرده‌ای هستند که نسبت به لایه‌های زیرین خود متراکم‌ترند و تخلخل کمتری دارند (۳۰). هنگامی که این لایه‌ها مرطوب می‌شوند به‌عنوان اندوده سطحی^۱ و زمانی که خشک هستند به‌عنوان سله^۲ معرفی می‌شوند (۴۲). سله‌ها نقش مهمی در محافظت از خاک در برابر فرسایش بادی (۱۳) و افزایش پایداری و حاصلخیزی خاک دارند (۱۹). سله را می‌توان از نظر ماهیت تشکیل به سه نوع فیزیکی، شیمیایی و زیستی تقسیم‌بندی کرد (۴۰)؛ اما در مناطق خشک و نیمه‌خشک سله‌های فیزیکی و زیستی مهم‌ترین انواع سله خاک می‌باشند (۱۴). سله فیزیکی به دو نوع سله ساختاری (۳۸) و سله رسوبی (۱۰) تقسیم می‌شود. سله‌ها بیشتر بر اثر رویدادهای طبیعی مانند برخورد قطرات باران و فرآیند خشک شدن ایجاد می‌شوند و شامل تشکیل لایه‌های نازک سخت در سطح خاک می‌باشند. ضخامت سله‌ها معمولاً از کمتر از ۱mm تا ۵cm متغیر است (۱۲).

سله‌های ساختاری در بیشتر خاک‌ها در طول بارندگی و پس‌از آن تشکیل می‌شوند که با تأثیر بر ساختار منافذ خاک، تأثیرات مهمی بر فرآیندهای هیدرولوژیک و فرسایشی دارند (۴۵). تشکیل این سله‌ها پدیده‌ای رایج در مناطقی با خاک‌های فقیر و پوشش گیاهی تنک می‌باشد (۱۲). هنگامی که لایه سطحی خاک به‌شدت خشک، پایداری خاکدانه‌ها کم، OM خاک ناچیز و ساختمان خاک ضعیف می‌باشد، پس از یک بارندگی ناگهانی یا غرقاب شدن خاک، خاکدانه‌ها متلاشی شده و ساختمان خاک تغییر می‌یابد و ذرات خاک متلاشی می‌شود. در صورتی که ذرات برداشت شده درشت نباشند در جریان سطحی شناور و منتقل می‌شوند و سله فیزیکی تشکیل می‌شود. این سله‌ها دارای ضخامتی در حدود ۱-۳mm می‌باشند که بسیار سخت و متراکم و درعین حال شکننده می‌باشند (۸). هم‌چنین در صورت انتقال ذرات تخریب‌شده خاک به‌وسیله آب یا باد و رسوب‌گذاری آن‌ها در مکانی دیگر، پس از

ته‌نشست و تشکیل ساختار مجدد، لایه‌ای به وجود می‌آید که پس از تبخیر آب، خشک‌شده و دچار ترک‌خوردگی می‌گردد، به این لایه، سله رسوبی گفته می‌شود. سله‌های زیستی خاک نیز جوامعی از موجودات زنده در سطح خاک در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک هستند، آن‌ها در سراسر جهان با ترکیب و پوشش گونه‌های مختلف بسته به توپوگرافی، ویژگی‌های خاک، آب‌وهوا، جوامع گیاهی، زیستگاه‌های کوچک و رژیم‌های اختلال یافت می‌شوند (۶). این سله‌ها که سله‌های میکروبیوتیک^۳ خاک نیز نامیده می‌شوند، معمولاً از توسعه جوامع میکروارگانیسم‌ها؛ شامل سیانوباکترها، جلبک‌های یوکاریوتی و گل‌سنگ‌ها، هم‌چنین باکتری‌ها، خزه‌ها، یا قارچ‌ها بر روی سطح سله فیزیکی خاک ناشی می‌شوند (۱۴)؛ و جزء اصلی اکوسیستم‌های خشک می‌باشند (۴۴). پژوهش‌های نسبتاً زیادی تاکنون سازوکارهای نظری مختلف تشکیل سله در خاک را توصیف و نقش تأثیرگذار آن بر کنترل هدررفت خاک از طریق فرسایش بادی را گزارش کرده‌اند. پژوهش‌های مختلف نشان داده است که تشکیل سله در خاک شامل چندین مرحله است و عکس‌العمل سطح خاک به انرژی قطرات باران به دو بخش اصلی تقسیم می‌شود، بخش اول پاشیدگی ذرات خاک بوسیله انرژی قطره‌های باران است، در این حالت لایه‌ای تشکیل می‌شود که تقریباً ۰/۱mm ضخامت دارد و قسمت دوم ذرات ریز خاک است که توسط قطرات باران پراکنده شده و با آب نفوذی وارد منافذ خاک می‌شود و باعث به وجود آمدن لایه‌ای می‌گردد که ۲mm ضخامت دارد (۳۷).

با تشکیل سله، مقاومت برشی و فشاری افزایش می‌یابد و مانعی برای مهار فرسایش بادی تا زمان شکسته شدن می‌باشد. مطالعه مقاومت سله سطحی و خاک تالاب بختگان به فرسایش بادی و تولید گردوغبار تحت تأثیر خشکسالی نشان داد نرخ فرسایش با مقدار EC، Na و درصد رس رابطه مثبت دارد و مقدار فرسایش در سرعت‌های کم با CaCO₃ رابطه مثبت و در سرعت‌های زیاد رابطه‌ای منفی دارد و با مقدار C، OM، درصد ماسه و سیلت

³Microbiotic¹Surface Sealing²Crust

ارتفاعات، از شمال به حد جنوبی اراضی کشاورزی ده سلامت و از جنوب به ارتفاعات جنوب شرقی اهواز محدود است جاده اهواز امیدیه از لبه جنوبی این کانون می‌گذرد مساحت این کانون برابر با ۴۲۹۶۱ha می‌باشد. از نظر آب و هوایی جزو اقلیم خشک تا فراخشک با فصل‌های سرد است. علاوه بر این تبخیر سطحی خاک و وجود آب زیرزمینی موجب تجمع املاح در سطح خاک می‌شود. ب) کانون گردوغبار جنوب شرق اهواز: این کانون در بین شهرستان‌های اهواز، شادگان، ماهشهر و رامشیر قرار دارد. مساحت آن حدود ۱۸۵۳۴۶ha برآورد می‌شود (پ) کانون گردوغبار ماهشهر-امیدیه-هندیجان: شهرستان امیدیه در شمال غرب این کانون، شهرستان بندر ماهشهر در غرب آن و در نهایت شهرستان هندیجان در جنوب غرب کانون واقع شده است. مساحت این کانون برابر با ۲۵۴۸۲۵ha است؛ و قسمت اعظمی از آبراهه‌های موجود در این کانون در بخش شرق و جنوب شرق آن قرار دارد. این کانون حاصل رسوب‌گذاری نهشته‌های کواترنر رودخانه‌های زهره و جراحی در طول سالیان متمادی تشکیل شده است. بخش‌های پایینی این محدوده متشکل از اراضی پست و شور ساحلی است که حاصل عقب‌نشینی خلیج فارس در سال‌های گذشته می‌باشد (۱). به‌طور کلی در این کانون‌ها گیاهان دارای چهار تیپ رویشی مختلف از گیاهان نم پسند شور روی، تالابی، خشکی‌زی شورپسند و شن‌دوست است. در این کانون‌ها گیاهانی مانند *Lycium shawii* Roem. & Schult، *Aeluropus lagopoides* L، *Tamarix tetragyna* Ehrenb، *Atriplex SP* و *Seidlizia SP*. با شرایط اقلیمی و خاکی منطقه رویش یافته و سازگار شده‌اند، که از طریق شناخت گونه‌های گیاهی با غالبیت زیاد تیپ‌های گیاهی بصورت مجزا نام‌گذاری شده‌اند (۱۱).

رابطه منفی داشت، پس دلیل زیاد بودن میزان فرسایش در سطح رسوبات بستر خشک شده تالاب می‌تواند مربوط به پایین بودن مقدار آنها باشد (۲). در مطالعه‌ای با عنوان تأثیر سله فیزیکی بر فرسایش‌پذیری بادی خاک‌های شمال غربی اقیانوس آرام، ایالات متحده آمریکا نشان داده شده است تا زمانی که پوشش سله بیشتر از ۳۰٪ نباشد تأثیر چندانی در هدر رفت خاک ندارد هم‌چنین رابطه بین هدررفت خاک و پوشش سله تقریباً خطی است، با توسعه تدریجی پوشش سله، میزان تغییر در هدررفت خاک در بین انواع خاک‌ها متفاوت است (۳۳). کانون‌های گردوغبار خوزستان در سطح سه کانون به نام‌های کانون جنوب شرق اهواز؛ ماهشهر-امیدیه-هندیجان و شرق اهواز مشخص شدند (۱). بررسی‌های میدانی این کانون‌ها نشان داد که در برخی نقاط سله‌های محکمی وجود دارند که مانعی در مقابل فرسایش بادی می‌باشند. بر همین اساس پیشنهاد شد که نوع، ساختار و ویژگی‌های عمومی این سله‌ها مشخص شود تا چنانچه امکان مدیریت آن‌ها وجود دارد در سطح خاک‌های کانون‌های فرسایش بادی پیشنهاد و نحوه مدیریت آن‌ها مشخص شود. هدف مطالعه حاضر تعیین نوع سله‌ها، مهم‌ترین شاخص‌های مقاومت سله و بررسی میزان تأثیر آنها بر کنترل فرسایش بادی در کانون‌های گردوغبار خوزستان می‌باشد.

■ مواد و روش

منطقه مورد بررسی

بررسی حاضر در کانون‌های مهم تولید گردوغبار استان خوزستان انجام شد (۱) (جدول ۱).
الف) کانون گردوغبار شرق اهواز: این کانون از غرب به محدوده اراضی کشاورزی روستاهای شرق اهواز، از شرق به

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی کانون‌های گردوغبار مورد مطالعه

کانون	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میانگین بارش سالانه (mm)	میانگین دمای سالانه (°C)
شرق اهواز	۳۰° ۴۲' شرقی	۵۰° ۳۱' شمالی	۲۰۱	۲۶
جنوب شرق اهواز	۴۰° ۴۸' شرقی	۲۰° ۳۱' شمالی	۱۲۵	۲۷
شماره ۵، ۶، ۷	۲۰° ۴۹' شرقی	۵۰° ۳۰' شمالی	۲۰۱	۳۵

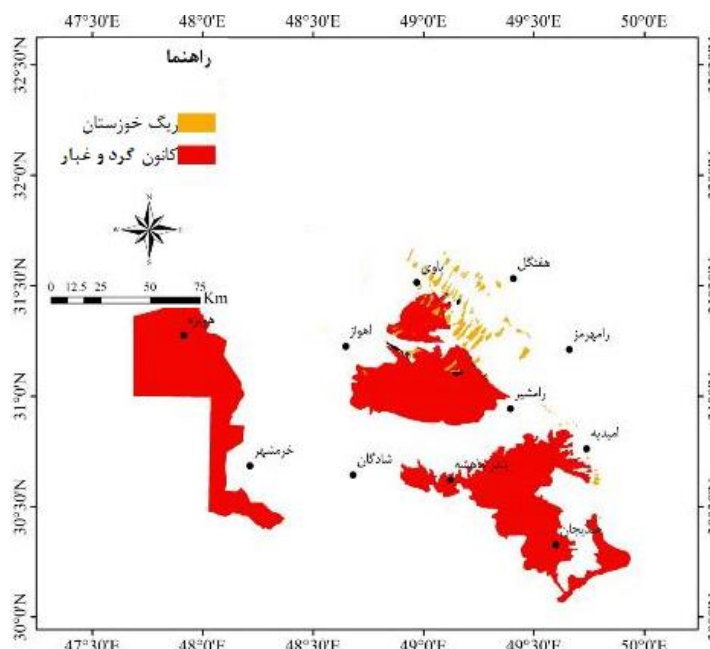
نمونه‌برداری

با بازدید از منطقه و پیمایش میدانی نمونه‌برداری به صورت تصادفی، در اسفندماه ۱۴۰۱ انجام شد (شکل ۱). مناطق مورد بررسی شامل کانون‌های گردوغبار شرق اهواز، جنوب شرق اهواز و شماره ۵، ۶ و ۷ می‌باشند که اقلیم خشک و شکل‌گیری سله سطحی خاک از مسائل این منطقه است. نمونه‌های سله از سطح کانون‌های گردوغبار به صورت تصادفی برداشت شد؛ بدین ترتیب که ۱۸ نمونه مرکب از سله‌های سطحی و هر نمونه شامل سه نمونه فرعی از هر کانون با استفاده از بیلچه از عمق صفر تا ۵cm خاک نمونه‌برداری شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه انتقال داده و هوا خشک شدند، بخشی از آن‌ها برای انجام بررسی‌های آزمایشگاهی کوبیده و از الک ۲mm عبور داده شد. مقدار باقی‌مانده از نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های مربوط به سله سطحی و پایداری خاکدانه استفاده شد.

تعیین نوع سله

برای تعیین نوع سله از میکروسکوپ الکترونیکی روبشی^۱ بهره گرفته شد (۴۳). بدین منظور از تعداد ۳ نمونه

مرکب از سله‌های اندازه‌گیری شده در هر کانون گردوغبار استفاده شد. نمونه‌های سله برداشته شده با کاغذ صافی بسته‌بندی شد. نمونه‌ها حداقل به مدت ده روز خشک شدند. سپس یک قطعه کوچک از هر کدام از نمونه‌های سله‌ها با دقت بریده شد و با لایه نازکی از پوشش طلا بر روی قسمت خرد میکروسکوپ نصب شد. نمونه تهیه شده در زیر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی مدل فیلیپس ایکس ۱۳۰^۲ ساخت کشور هلند و در آزمایشگاه مرکز ملی تحقیق و توسعه مهندسی مواد^۳ در استان قم قرارداد داده شده و تصویرهای عمودی و افقی با بزرگنمایی ۱۵۰۰ تا ۳۵۰۰ برابر گرفته شد و برای شناسایی میکروارگانیسم‌ها با لایه‌های رسوب‌گذاری شده مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تصاویر، در بین ذرات خاک هر سه منطقه، اثری از فعالیت میکروارگانیسم‌ها مانند رشته‌های میکروبی در زیر میکروسکوپ مشاهده نشد. ولی مشاهده شد که ذرات ریز سیمان کننده در میان منافذ خاک وجود دارد که سبب چسبندگی و اتصال میان ذرات خاک شده و سله‌ها را در برابر فرسایش بادی مقاوم می‌کند.



شکل ۱. نقشه موقعیت مکانی کانون‌های گردوغبار مورد بررسی (۱)

^۱Scanning Electronic Microscope

^۲Philips X130

^۳The Natation Center for R&D of Science and Materials Engineering

STI شاخص پایداری خاک برحسب درصد، SOC درصد C خاک، Clay درصد رس و Silt درصد سیلت می‌باشد. اگر مقدار این شاخص کمتر از ۵ باشد، بدین معناست که ساختمان خاک دچار تخریب شده است، اگر مقدار این نمایه بین ۵ تا ۷ باشد به منزله آن است که ساختمان خاک در معرض خطر زیاد تخریب قرار دارد و اگر این شاخص بیشتر از ۹٪ به دست آمد، خاک مقدار کافی C برای نگهداری ساختمان خود را در اختیار دارد. شاخص سله^۲ توسط FAO در سال ۱۹۸۰ پیشنهاد شده و طبق رابطه (۲) محاسبه گردید (۲۶).

$$CI = \frac{1.5fS + 0.75Sc}{Clay + (10 \times SOM)} \quad (2)$$

که در آن CI شاخص سله بندی بر حسب درصد، fS سیلت ریز بر حسب درصد، Clay درصد رس، Sc درصد سیلت درشت، SOM درصد OM می‌باشد. در پژوهش حاضر مقاومت فشاری^۳ و مقاومت برشی به صورت مستقیم و میدانی اندازه‌گیری گردیدند. برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری از دستگاه فروسنج موسوم به پنترومتر^۴ (۱۹) و مقاومت برشی سله‌ها نیز با استفاده از دستگاه پره برشی اندازه‌گیری شدند (۲۴). برای تعیین مقدار پایداری خاکدانه‌ها، از روش الک خشک استفاده شد (۲۳). برای این کار از الک‌های ۴/۷۵، ۲، ۱، ۰/۶، ۰/۲۵ و ۰/۱۵ mm استفاده شد. میانگین وزنی^۵ و هندسی قطر خاکدانه‌ها^۶ با توزین جداگانه مقدار ۷۰۰ gr تا ۵۰۰ gr روی هر الک به مدت ۵ min و استفاده از رابطه‌های (۳) و (۴) انجام پذیرفت.

$$MWD = \sum_{i=1}^n (X_i \cdot W_i) \quad (3)$$

$$GMD = \exp \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{w_i} \cdot w_i \cdot \log x_i \right) \right] \quad (4)$$

که در آن MWD میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، GMD میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها، X_i میانگین قطر

تعریف سله رسوبی و سله ساختاری را در سال ۱۹۸۰ ارائه شده است، طبقه‌بندی سله در منابع گوناگون علمی متفاوت است، اما توافق بر سر دو نوع عمده آن وجود دارد: سله ساختاری که بدون دخالت مواد سیمان کننده تشکیل می‌شود و سله رسوبی که همیشه مواد سیمان کننده در ساخت آن وجود دارد (۴۳).

تعیین ویژگی فیزیکی و شیمیایی سله

آزمایش‌های مربوط به متغیرهای فیزیکوشیمیایی سله‌ها در آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشکده کویرشناسی دانشگاه سمنان انجام شد. pH با pH متر و EC نیز با EC سنج اندازه‌گیری شد (۲۶). K، Ca و Mg در خاک بطور کلی با اندازه‌گیری اشکال محلول در خاک برآورد شدند و برای اندازه‌گیری آنها از روش تیتراسیون استفاده شد (۳۸). CEC به روش چاپمن اندازه‌گیری شد (۳۲). برای اندازه‌گیری pH از عصاره ۱:۵ آب به خاک استفاده شد. مقدار $CaCO_3$ از روش خنثی‌سازی با محلول اسیدکلریدریک تعیین شد (۳۹). مقدار ESP با استفاده از نسبت جذب سدیم بدست آمد. مقدار PO_4^{3-} خاک با روش اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری گردید (۲۸). جهت تعیین بافت و محاسبه درصد رس، سیلت ریز و درشت و ماسه سله‌ها مقدار ۵۰ gr خاک توزین و از روش هیدرومتری در قرائت‌های ۴۰ s، ۴ min و ۲ hr بهره گرفته شد (۱۶). برای محاسبه جرم مخصوص ظاهری خاک، از روش کلوخه و پارافین استفاده شد و برای این کار قطعه‌هایی با ضخامت ۱۰ mm از سله‌ها انتخاب شدند. اندازه‌گیری میزان رطوبت اولیه یا مقدار آب موجود در سله‌ها از روش وزنی انجام شد (۳۵).

شاخص‌های ارزیابی سله

شاخص پایداری ساختمان خاک^۱: این نمایه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد (۲۶).

$$STI = \frac{1.72 * SOC}{Clay + Silt} * 100 \quad (1)$$

⁴ Pentrometer

⁵ Weighted Mean Diameter

⁶ Geometric Mean Diameter

¹ Soil Structural Index

² Crust Index

³ Pressure Resistance

سینی‌های محتوی خاک سله دار و بدون سله در کف تونل قرار داده شد و پس از وزش باد در سرعت‌های مختلف ۱۰، ۱۵ و ۲۵ m/s با روش توزین، سرعت آستانه فرسایش بادی با روش مشاهداتی و مقدار هدر رفت خاک محاسبه شد و رابطه خط آن‌ها برآزش شد.

تحلیل آماری

برای تجزیه و تحلیل داده‌های آماری از نرم‌افزار SPSSver26 استفاده شد. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. سپس مجموعه داده‌ها به‌عنوان مؤلفه‌های مستقل به رگرسیون گام‌به‌گام وارد شدند و رابطه آن‌ها با شاخص شکل‌گیری سله و نیز پایداری خاکدانه‌ها هم‌چنین میزان تأثیر سله‌ها و پایداری خاکدانه‌ها بر مقدار بادبردگی مشخص شد.

نتایج

بررسی نوع سله

پس از بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به سله‌های کانون‌های گردوغبار مشخص شد که در بین ذرات خاک هر سه منطقه، مواد سیمانی وجود دارد که موجب چسبندگی و اتصال میان ذرات خاک می‌شود و سله‌ها را در برابر فرسایش بادی مقاوم می‌کند (شکل‌های ۳، ۴ و ۵).

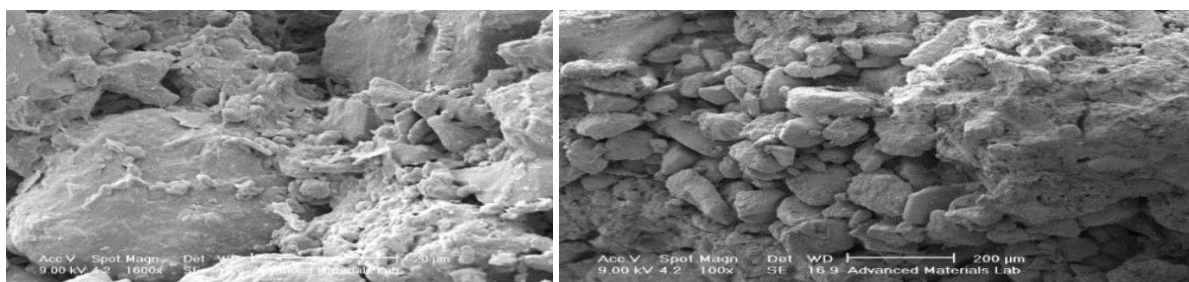
خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک و Wi وزن خاک باقی‌مانده روی هر الک برحسب گرم می‌باشد.

تأثیر سله بر هدر رفت خاک

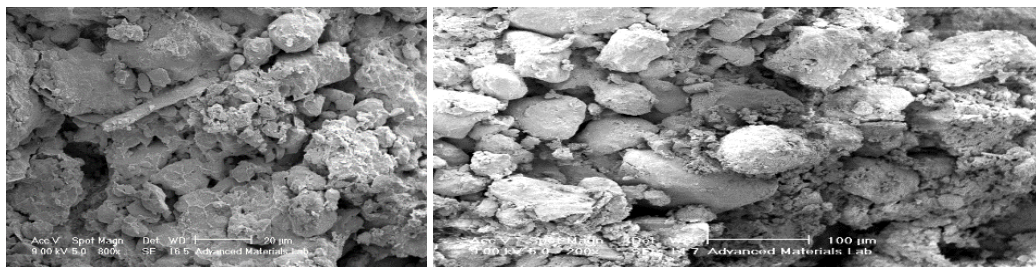
برای تعیین تأثیر بر سرعت آستانه فرسایش بادی و نیز میزان هدر رفت خاک سله‌های موجود در کانون‌های گردوغبار خوزستان، نمونه‌های حاوی سله برداشت و به آزمایشگاه فرسایش بادی انتقال داده شد. در مطالعه حاضر با توجه به اینکه سله‌های سطحی هنگام نمونه‌برداری و نیز بر اثر جابه‌جایی دچار دست‌خوردگی و تخریب شده بودند، شرایط تشکیل مجدد این سله‌ها مدنظر قرار داده شد. سازوکارهای گوناگونی جهت تشکیل سله سطحی موجود می‌باشد؛ از جمله استفاده از آب مقطر، خیساندن خاک با محلول نمکی و استفاده از شیشه‌ساز باران (۱۷). بدین منظور با اسپری کردن آب بر روی سله‌ها در سینی‌های به ابعاد $35 \times 60 \text{ cm}$ و خشک کردن سله‌ها به مدت یک هفته برای انجام آزمایش تونل باد مورداستفاده قرار گرفتند. به‌منظور بررسی اثر سله‌های مقاوم سطحی بر کنترل فرسایش بادی از دستگاه تونل باد مدارباز موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور بهره گرفته شد (شکل ۲). سرعت آستانه و مقدار فرسایش بادی به کمک تونل بادی ثابت و در شرایط آزمایشگاهی برآورد شد. بدین ترتیب که



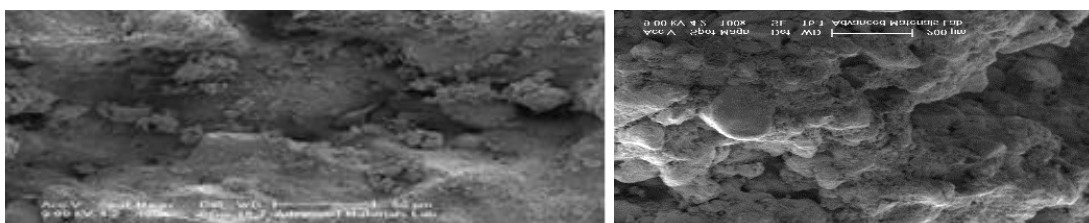
شکل ۲. تونل باد مورداستفاده در آزمایش



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سله‌های کانون گردوغبار شرق اهواز



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سله‌های کانون گردوغبار جنوب شرق اهواز



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سله‌های کانون گردوغبار شماره ۵، ۶، ۷ یا کانون گردوغبار شماره ۵

غالباً دارای بافت‌رسی و شوری زیاد به مقدار متوسط $57/0 \text{ ds/m}$ و میانگین میزان $7/52 \text{ pH}$ می‌باشند. مقدار زیاد CaCO_3 در سله‌های کانون‌های مطالعه حاضر می‌تواند زیاد بودن مقدار pH در آن‌ها را توجیه کند و شوری زیاد خاک، محدودیت‌هایی برای کشت گونه‌های کشاورزی به همراه دارد (جدول ۲). بطور کلی سله‌های موجود در کانون‌های گردوغبار مطالعه حاضر به دلیل مقدار OM بسیار اندک به شدت در معرض تخریب ساختمان و فرسایش‌پذیری قرار دارند.

تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سله‌ها سله‌ها در کانون گردوغبار شرق اهواز دارای بافت سنگین یا رسی، شوری زیاد معادل 18 ds/m و $7/78 \text{ pH}$ و فاقد انباشت‌های بادی هستند و برای کشت گونه‌های کشاورزی دارای محدودیت زیادی می‌باشند (جدول ۲). سله‌های کانون گردوغبار جنوب شرق اهواز نیز دارای بافت رسی، شوری متوسط به مقدار $6/22 \text{ ds/m}$ و $7/75 \text{ pH}$ کاربری رایج دیم‌کاری و اراضی بدون محدودیت شوری زیاد برای کشت گونه‌های کشاورزی است. سله‌های کانون گردوغبار شماره ۵، ۶، ۷ نیز

جدول ۲. مشخصات متغیرهای فیزیکوشیمیایی سله‌های کانون گردوغبار شرق اهواز

نام کانون گردوغبار	متغیر	واحد	میانگین	بیشینه	کمینه
شرق اهواز			۴۹/۹۸	۵۶/۳۲	۴۴/۳۲
جنوب شرق اهواز	رس	%	۶۱/۳۲	۶۸/۳۲	۴۶/۳۲
شماره ۵، ۶، ۷			۴۵/۹۸	۷۴/۳۲	۲۸/۳۲
شرق اهواز			۲۳/۲۸	۲۵/۲۸	۲۱/۲۸
جنوب شرق اهواز	سیلت ریز	%	۲۳/۲۸	۴۵/۲۸	۵/۲۸
شماره ۵، ۶، ۷			۱۷/۲۸	۴۱/۲۸	۷/۲۸
شرق اهواز			۱۲/۳۳	۱۶	۱۰
جنوب شرق اهواز	سیلت درشت	%	۷/۶۶	۱۴	۲
شماره ۵، ۶، ۷			۱۴/۳۳	۳۰	۸
شرق اهواز			۳۵/۶۱	۳۹/۲۸	۳۳/۲۸
جنوب شرق اهواز	سیلت کل	%	۳۰/۹۴	۴۷/۲۸	۱۹/۲۸
شماره ۵، ۶، ۷			۳۱/۶۱	۵۳/۲۸	۱۷/۲۸
شرق اهواز			۱۴/۴۰	۱۸/۴۰	۸/۴۰
جنوب شرق اهواز	ماسه	%	۷/۷۳	۱۴/۴۰	۲/۴۰
شماره ۵، ۶، ۷			۲۲/۴	۵۴/۴	۶/۴۰
شرق اهواز			۵/۶۶	۸/۰۸	۳
جنوب شرق اهواز	رطوبت اولیه	%	۸/۲۱	۱۴/۴۵	۵/۳۸
شماره ۵، ۶، ۷			۵/۲۵	۵/۹۱	۴/۵۷

ادامه جدول ۲. مشخصات متغیرهای فیزیکوشیمیایی سله‌های کانون گردوغبار شرق اهواز

نام کانون گردوغبار	متغیر	واحد	میانگین	بیشینه	کمینه
شرق اهواز			۱/۸۶	۱/۸۹	۱/۴۷
جنوب شرق اهواز	چگالی ظاهری	gr/cm ³	۱/۷۴	۱/۹۵	۱/۵۶
شماره ۵، ۶، ۷			۱/۶۷	۱/۷۵	۱/۵۴
شرق اهواز			۷/۷۸	۷/۹۲	۷/۵۰
جنوب شرق اهواز	pH	-	۷/۷۵	۷/۹۴	۷/۴۹
شماره ۵، ۶، ۷			۷/۵۲	۷/۵۷	۷/۴۸
شرق اهواز			۱۸/۸۴	۴۲/۲۳	۱/۴۵
جنوب شرق اهواز	EC	ds/m	۶/۲۲	۷/۵۴	۴/۷۴
شماره ۵، ۶، ۷			۵۷/۰۸	۹۴/۱۰	۳۲
شرق اهواز			۴۹/۵	۵۲/۵	۴۱/۵
جنوب شرق اهواز	CaCO ₃	%	۵۲/۰۴	۵۴	۴۸/۷۵
شماره ۵، ۶، ۷			۴۵/۵۰	۴۹/۵۰	۳۸/۷۵
شرق اهواز			۳۲/۴۶	۵۰/۴۸	۱۶/۷۲
جنوب شرق اهواز	Ca	Meq/lit	۳۰	۳۷/۲۰	۲۳/۶۰
شماره ۵، ۶، ۷			۱۷۹/۱۰	۲۸۹	۸۴/۸۱
شرق اهواز			۳۴/۸۶	۱۰۰/۴	۳/۶
جنوب شرق اهواز	Mg	Meq/lit	۸/۹۳	۱۵/۶۰	۴
شماره ۵، ۶، ۷			۴۱/۵۳	۷۹/۶۰	۱۳/۶۰
شرق اهواز			۲۳/۷۹	۳۰/۵۸	۱۴/۳۹
جنوب شرق اهواز	CEC	C ⁺ mol/kg	۲۷/۶۳	۳۲/۱۵	۲۲/۴۸
شماره ۵، ۶، ۷			۳۰/۷۲	۳۴/۲۸	۲۶/۲۴
شرق اهواز			۳۲/۹۵	۵۰/۴۵	۱۱/۴۹
جنوب شرق اهواز	ESP	%	۲۰/۱۹	۲۶/۱۴	۱۶/۱۵
شماره ۵، ۶، ۷			۵۰/۶۵	۵۶/۱۱	۴۵/۱
شرق اهواز			۱/۱۳	۱/۳۲	۰/۹۸
جنوب شرق اهواز	Po ₄ ³⁻	Meq/lit	۰/۶۰	۰/۷۰	۰/۵۴
شماره ۵، ۶، ۷			۰/۷۰	۰/۸۱	۰/۶۱
شرق اهواز			۰/۸۰	۰/۹۲	۰/۶۳
جنوب شرق اهواز	K	Meq/lit	۰/۷۴	۰/۸۴	۰/۶۷
شماره ۵، ۶، ۷			۰/۹۴	۱/۰۴	۰/۸۱
شرق اهواز			۰/۲۰	۰/۳۵	۰/۰۳
جنوب شرق اهواز	OM	%	۰/۳۷	۰/۶۲	۰/۱۴
شماره ۵، ۶، ۷			۰/۵۶	۰/۸۸	۰/۰۲
شرق اهواز			۰/۲۴	۰/۵۰	۰/۰۴
جنوب شرق اهواز	STI	%	۰/۴۰	۰/۷۰	۰/۱۴
شماره ۵، ۶، ۷			۰/۸۵	۱/۹۲	۰/۰۲
شرق اهواز			۰/۸۵	۱	۰/۷۸
جنوب شرق اهواز	CI	%	۰/۶۷	۰/۳۹	۰/۲۴
شماره ۵، ۶، ۷			۰/۸۹	۱/۸۵	۰/۲۶
شرق اهواز			۴/۰۸	۴/۵	۳/۵
جنوب شرق اهواز	مقاومت فشاری	Kg/cm ²	۳/۸۳	۴/۵	۳
شماره ۵، ۶، ۷			۴/۲۵	۵	۳/۵
شرق اهواز			۲/۸۶	۶	۰/۵۰
جنوب شرق اهواز	مقاومت برشی	Kg/cm ²	۴/۹۱	۹	۱/۳۴
شماره ۵، ۶، ۷			۱/۷۲	۲/۶۵	۱

ادامه جدول ۲. مشخصات متغیرهای فیزیکوشیمیایی سله‌های کانون گردوغبار شرق اهواز

نام کانون گردوغبار	متغیر	واحد	میانگین	بیشینه	کمینه
شرق اهواز			۱/۱۴	۱/۵۲	۰/۸۸
جنوب شرق اهواز	MWD	mm	۱/۱۱	۱/۵۲	۰/۸۸
شماره ۵، ۶، ۷			۱/۰۳	۱/۲۸	۰/۶۶
شرق اهواز			۰/۸۵	۰/۹۹	۰/۷۴
جنوب شرق اهواز	GMD	mm	۰/۸۳	۰/۹۹	۰/۷۳
شماره ۵، ۶، ۷			۰/۸۰	۰/۹۲	۰/۶۶

ارزیابی پایداری سله

ضریب تشخیص می‌باشد؛ بنابراین نمایه مذکور بعنوان بهترین شاخص برای ارزیابی سله‌های خاک در کانون گردوغبار شرق اهواز شناخته می‌شود. نمایه میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها دارای کمترین مقدار خطای مجموع مربعات خطا، کمترین مقدار خطای نسبی استاندارد، حداقل میزان خطای نسبی مطلق و نیز بیشترین مقدار ضریب تشخیص می‌باشد که به‌عنوان شاخصی کارآمد برای تبیین پایداری خاکدانه‌ها در منطقه مذکور مشخص گردید. بنا بر توضیحات ذکرشده، برای کانون گردوغبار جنوب شرق اهواز نمایه پایداری ساختمان خاک و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (جدول ۴) و نیز برای کانون گردوغبار امیدیه، ماهشهر و هندیجان، شاخص مقاومت برشی و برای ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها نیز شاخص میانگین هندسی خاکدانه‌ها بعنوان کارآمدترین شاخص‌ها معرفی شدند (جدول ۵).

برای بررسی ارتباط میان نمایه‌های ارزیابی سله، پایداری خاکدانه و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سله‌های خاک و مقایسه این نمایه‌ها در کانون‌ها گردوغبار استان خوزستان، تحلیل رگرسیون گام‌به‌گام بین هرکدام از شاخص‌ها و خصوصیات سله‌ها به‌صورت مجزا در هرکدام از کانون‌ها گردوغبار صورت گرفت که نتایج مربوط به این آنالیزها در ادامه ارائه شده است. مدل‌های رگرسیونی به‌کاررفته شده برای کانون گردوغبار شرق اهواز نشان می‌دهند که برای نمایه‌های ارزیابی سله بستن خاک در کانون مذکور کمترین مقدار آماره ریشه مربعات خطا که نمایانگر دقت زیاد مدل‌ها می‌باشد متعلق به شاخص مقاومت فشاری سله می‌باشد (جدول ۳). همچنین این نمایه دارای کمترین مقدار خطای نسبی استاندارد، کمترین خطای مطلق و نیز بیشترین مقدار

جدول ۳. رابطه‌های رگرسیونی مربوط به کانون گردوغبار شرق اهواز

رابطه رگرسیونی	RMSE	RSE	MAE	R ²
STI = $0.54 + 1.22OM + 0.03sand$	۰/۴۸	۲۰۰۲	۰/۴۸	۰/۹۹
CI = $0.67 + 0.05ESP$	۰/۴	۰۰۰۵	۰/۳۶	۰/۶۶
PR = $-2.64 + 0.09CaCo_3 + 31.25BD$	۰/۲	۰/۵	۰/۱۸	۰/۹۹
SR = $-20.07 + 0.45Clay$	۰/۷	۰/۱	۰/۹۰	۰/۹۹
MWD = $3.24 - 0.42CaCo_3$	۰/۳۸	۰/۳۶	۰/۹۶	۰/۶۰
GMD = $2.5 - 0.2CaCO_3 - 0.32BD$	۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۷۷

جدول ۴. معادلات رگرسیونی مربوط به کانون گردوغبار جنوب شرق اهواز

رابطه رگرسیونی	RMSE	RSE	MAE	R ²
STI = $-0.06 + 1.16OM + 0.04Mg^1$	۰/۱	۰/۴	۰/۱۲	۰/۹۹
CI = $-1.05 + 0.04Coarse\ Silt + 0.77EC$	۱/۰۶	۱/۵۷	۰/۴۵	۰/۴۷
PR = $-7.5 + 0.20CaCO_3 + 0.3Ca$	۸/۱۸	۲/۱۳	۸/۰۴	۰/۵۸
Sqrt (SR) = $-0.63 + 0.13ESP - 1.19OM$	۰/۱۸	۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۹۸
MWD = $4.8 - 1.6YBD - 1.28Po^-$	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۲۴	۰/۹۷
GMD = $2.54 + 0.21mg - 1.09D$	۰/۶۸	۰/۸۱	۰/۶	۰/۹۹

¹Magnesium

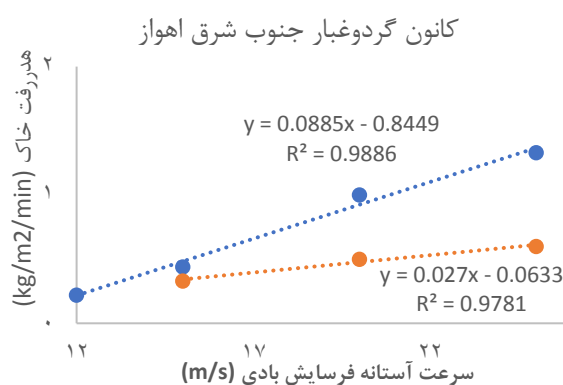
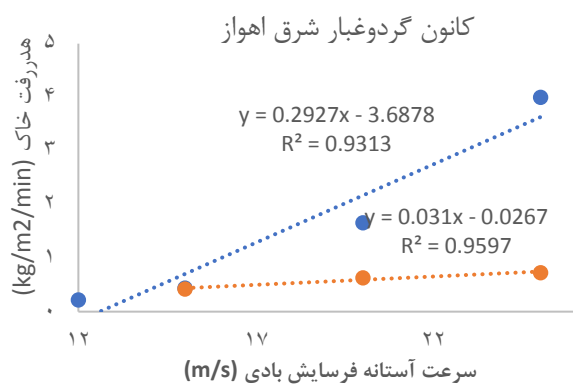
جدول ۵. معادلات رگرسیونی مربوط به کانون ها گردوغبار شماره ۷، ۶، ۵ اهواز

رابطه رگرسیونی	RMSE	RSE	MAE	R ²
STI= ۱۴/۹۳-۸/۴۱ BD	۰/۱	۰/۱۲	۰/۸	/۹۶
CI= -۱/۲۷ +۰/۲۰ Total Silt +۰/۲۱ Sm +۰/۰۴ Fine Silt	۷/۲۹	۹/۵۲	۵/۴	۰/۷۶
PR= ۲/۶۶ +۰/۰۰۹ Ca	۰/۴	۰/۰۰۹	۰/۱۸	۰/۸۹
SR= -۵۰۹/۱۴۵ + ۶۷/۸۳PH +۰/۰۲Ca	۰/۷	۰/۱	۰/۱۸	۰/۹۹
MWD= ۳/۳۲ -۰/۳۲CaCO ₃ - ۰/۰۲sqrt (Coarse Silt) -۰/۱۱ ESP	۰/۳۸	۰/۳۶	۰/۱۹	۰/۶۰
GMD= ۰/۷۸ -۰/۲ CaCO ₃	۰/۲۹	۰/۲۴	۰/۴	۰/۷۷

کانون جنوب شرق اهواز ۸ و کانون شماره ماهشهر، امیدیه و هنديجان، ۸m/s و مقدار هدر رفت خاک در سله های تخریب شده در کانون شرق اهواز ۶/۳۲، کانون جنوب شرق اهواز ۲/۹۹ و کانون ماهشهر، امیدیه و هنديجان ۲/۴۹ Kg/m²/min می باشد (شکل ۶). مقایسه سرعت آستانه فرسایش بادی و مقدار هدررفت خاک در سله های سطحی و نیز نمونه های تخریب شده آن نشان می دهد میزان سرعت آستانه در سله های سطحی هر کانون نسبت به حالت تخریب شده آن بیشتر و میزان فرسایش بادی آن کمتر می باشد.

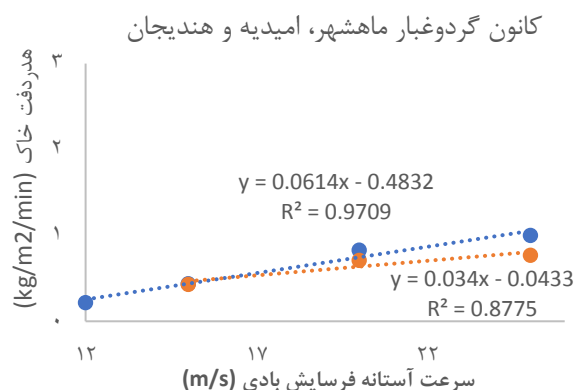
نتایج آزمایش تونل باد

نتایج حاصل از اندازه گیری سرعت آستانه فرسایش بادی در کانون های مورد مطالعه نشان داد که سرعت آستانه فرسایش بادی در سطح خاک سطحی سله دار مربوط به کانون گردوغبار شرق اهواز ۱۳، کانون جنوب شرق اهواز ۱۷ و کانون گردوغبار ماهشهر، امیدیه و هنديجان ۱۲m/s می باشد. هم چنین میزان هدر رفت خاک در سله های سطحی به کانون شرق اهواز ۱/۷۸ کانون جنوب شرق اهواز، ۱/۴۳ و کانون ماهشهر، امیدیه و هنديجان ۱/۹۱ Kg/m²/min می باشد. سرعت آستانه فرسایش بادی در سله های تخریب شده کانون گردوغبار شرق اهواز ۹،



راهنمای نمودارها

- خط برازش معادله سله
- خط برازش معادله سله تخریب شده
- سله
- سله تخریب شده



شکل ۶. مقایسه میزان هدررفت خاک در خاک سله تخریب شده و دست نخورده

■ بحث و نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در کانون گردوغبار شرق اهواز مقدار OM و درصد ماسه بیشترین تأثیر را بر شاخص پایداری خاکدانه داشتند. در نمونه سله‌های برداشت‌شده از کانون گردوغبار شرق اهواز بدلیل کمبود OM، پایداری خاکدانه‌ها اندک است. همچنین رابطه ماسه با نمایه پایداری ساختمان خاک مثبت بود. در این رابطه بررسی دیگری نتیجه گرفت که بین پایداری خاکدانه‌ها، رطوبت اشباع و آهک رابطه منفی وجود دارد درحالی‌که این رابطه میان درصد ماسه ریز و خیلی ریز با پایداری خاکدانه‌ها کاملاً مثبت می‌باشد (۴). همچنین درصد سدیم تبادلی بر نمایه سله بستن خاک بیشترین تأثیر را داشت. در خاک‌های با شوری زیاد کریستاله شدن نمک در دوره خیس و خشک شدن موجب ناپایداری خاکدانه‌ها می‌شود (۸). بعلاوه ویژگی‌های آهک و چگالی ظاهری بیشترین تأثیر را بر مقاومت برشی سله‌ها داشتند. در تحقیقی نشان داده شد که کربنات Ca نقش مهمی به‌عنوان عامل سیمانی خاک ایفا می‌کند و مشخص شد که افزایش محتوای کربنات Ca باعث افزایش استحکام خاک شد و کاهش مقاومت خاک به کاهش محتوای Ca کربنات نسبت داده شد (۱۵). مقدار رس بیشتر از دیگر متغیرها تغییرات مقاومت برشی سله‌ها در کانون گردوغبار شرق اهواز را توجیه کرده است؛ بطورکلی مقدار رس در خاک هنگامی می‌تواند موجب پایداری خاکدانه‌ها شود که مقدار سدیم در خاک اندک باشد. در حضور مقدار سدیم زیاد، اگر مقدار رس در منطقه زیاد باشد می‌تواند تأثیرات منفی بر پایداری خاکدانه‌ها داشته باشد (۲۹). در کانون‌های گردوغبار خوزستان نیز احتمالاً به همین دلیل مقدار رس تأثیر چندانی بر پایداری خاکدانه‌ها نداشته و حتی تأثیر منفی بر جای گذاشته است. میزان آهک بیشترین تغییرات میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها را توجیه کرده است. در خاک‌های آهکی، افزایش آهک فقط تا چهار درصد موجب پایداری خاکدانه‌ها می‌شود و بیشتر از این مقدار سرعت جذب ویژه را افزایش می‌دهد و بدین ترتیب پایداری خاکدانه‌ها را کاهش داده (۴۱) و از آنجا که هر عاملی که بر سله بستن خاک تأثیر مثبت دارد بر پایداری خاکدانه‌ها تأثیر منفی می‌گذارد، آهک سبب افزایش سله بستن خاک در

منطقه گردیده است. همچنین نتایج مشخص کرد که میانگین هندسی قطر خاکدانه تحت تأثیر میزان آهک و مقدار چگالی ظاهری واقع شده و این دو ویژگی توانسته‌اند بیشترین اثر منفی را بر این شاخص داشته باشند. همان‌طور که از نتایج برمی‌آید، ویژگی‌های OM و Mg تغییرات پایداری خاک در کانون گردوغبار جنوب شرق اهواز را توجیه کرده و بیشترین تأثیر را بر این شاخص داشتند. Mg جزو کاتیون‌های دو ظرفیتی می‌باشد و در اکثر مواقع موجب بهبود خاکدانه سازی می‌شود. درواقع این کاتیون میان مواد آلی و ذرات اولیه پل‌های اتصالی ایجاد می‌نمایند (۷). نتایج نشان داد که متغیرهای سیلت درشت و هدایت الکتریکی تغییرات سله بستن را در کانون گردوغبار جنوب شرق اهواز توجیه کرده و بیشترین تأثیر را بر آن داشته‌اند. رابطه سله بستن خاک و محتویات سیلت مثبت گزارش شده است (۹). شوری خاک یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر سله بستن خاک شناخته شده است (۲۱). مقدار مقاومت فشاری سله‌ها در کانون گردوغبار جنوب شرق اهواز بیشتر تحت تأثیر دو خصوصیت آهک و Ca واقع گردیده و این دو پارامتر تغییرات این نمایه را توجیه کردند. مدت‌هاست که اضافه نمودن آهک به خاک‌های ریزدانه جهت بالا بردن خصوصیات مقاومتی آن‌ها، برای دستیابی به اهداف گوناگون صورت پذیرفته است (۵). نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری و رابطه رگرسیونی نشان داد که متغیرهای درصد سدیم تبادلی و OM بر مقاومت برشی سله‌ها در کانون گردوغبار جنوب شرق اهواز دارای بیشترین تأثیر بوده‌اند؛ بطوری‌که تأثیر OM بر این نمایه منفی و درصد سدیم تبادلی به‌صورت مثبت ارزیابی گردیده است. با بررسی میزان اثرگذاری کاربرد OM نتیجه گرفته شد که OM سبب کاهش مقاومت برشی خاک می‌گردد (۴۱). مطابق با یافته‌های حاصل، شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه بیشتر متأثر از دو پارامتر چگالی ظاهری و مقدار فسفات بوده است. افزایش بار منفی خاک بر اثر جذب فسفات توسط برخی مواد سبب تخریب خاکدانه‌ها خواهد شد (۳۱). هم‌چنین میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها در سله‌های کانون گردوغبار جنوب شرق اهواز بیشترین تأثیرپذیری را از دو پارامتر چگالی ظاهری و Mg خاک داشته‌اند. نتایج تحلیل آماری نشان داد که پارامتر

ارزیابی سله‌های خاک در کانون گردوغبار شماره ۵، ۶، ۷ شناخته می‌شود. برای این نمایه متغیرهای pH خاک و مقدار Ca خاک سبب ایجاد حساسیت در خاک‌های این کانون نسبت به تشکیل سله شده‌است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به سله‌ها نشان داد که در هر سه منطقه، منافذ خاک مواد سیمان کننده را در خود جای می‌دهند. همه تصاویر ویژگی‌های سله رسوبی را نشان می‌دهند، مواد سیمان کننده در ساختار سله، فرآیندهای مختلف شسته شدگی در ذرات خاک را منعکس می‌کنند که موجب چسبندگی و اتصال میان ذرات خاک گردیده و سله‌ها را در برابر فرسایش بادی مقاوم می‌کند؛ بنابراین با اطمینان زیاد، سله‌های موجود در کانون‌های گردوغبار خوزستان بیشتر از نوع سله‌های رسوبی می‌باشند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقایسه سرعت آستانه فرسایش بادی و میزان هدر رفت خاک در سله‌های سطحی و نیز نمونه‌های تخریب‌شده آن نشان داد که مقدار سرعت آستانه در سله‌های سطحی هر کانون نسبت به حالت تخریب‌شده آن بیشتر و مقدار بادبردگی آن کمتر می‌باشد. بررسی‌های زیادی تاکنون تأثیر انواع سله را بر کنترل فرسایش بادی گزارش کرده‌اند (۱۷، ۳). با توجه به نتایج تحقیق اگر سله‌های موجود در کانون‌های گردوغبار خود عامل بسیار مهمی در جهت کنترل فرسایش بادی به حساب می‌آیند شکسته شوند منبع تولید گردوغبار می‌باشند لذا پیشنهاد می‌شود با اقدامات مدیریتی مناسب مانند جلوگیری از ورود دام و وسایل نقلیه سنگین و نیمه سنگین به کانون‌های گردوغبار تا حد امکان از تخریب سله‌ها جلوگیری بعمل آورده شود.

■ سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های معاونت سابق آموزشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده کویرشناسی دانشگاه سمنان و مسئولین موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور کمال تقدیر و تشکر را به‌جا آورند.

■ References

1. Abbasi, H. R., Khaksarian, F., Kashi Zenuzi, L., Gohardost, A., & Yathrebi. B. (2018). Determining the sensitivity of soil to wind erosion in fine dust centers of Khuzestan, Research project by research Institute of forests and rangelands. [In Persian]

چگالی ظاهری سله توانست بیشترین تأثیرگذاری را بر نمایه شاخص پایداری خاک در کانون امیدیه، ماهشهر و هندیجان داشته باشد. سله بستن خاک کانون امیدیه، ماهشهر و هندیجان بیشتر تحت تأثیر سه پارامتر سیلت کل، رطوبت و سیلت ریز قرار گرفته است. محققان زیادی با بررسی تأثیر رطوبت بر ناپایداری خاکدانه‌ها و تشکیل سله، گزارش کردند که باوجود خشک بودن خاک، وجود کمی رطوبت، میزان شکل‌گیری سله در خاک را افزایش می‌دهد (۲۲). پارامتر Ca بیشترین اثرگذاری را بر مقاومت فشاری سله‌ها در کانون امیدیه، ماهشهر و هندیجان داشته است. از میان پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در سله‌های کانون گردوغبار امیدیه، ماهشهر و هندیجان، دو پارامتر pH و Ca تغییرات مقاومت برشی سله‌ها را توجیه کرده و به‌عنوان تأثیرگذارترین مؤلفه‌ها بر این شاخص شناخته شدند. رابطه pH و مقاومت برشی خاک آهکی مثبت گزارش شده است (۱۸). سه متغیر آهک، سیلت درشت و درصد سدیم تبدالی به‌خوبی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها را توجیه نمودند. رابطه میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها و مقدار آهک کاملاً منفی ارزیابی شد. به‌طور کلی در کانون گردوغبار شرق اهواز کمترین میزان آماره ریشه مربعات خطا، کمترین مقدار خطای نسبی استاندارد، کمترین خطای مطلق و نیز بیشترین مقدار ضریب متعلق به شاخص مقاومت فشاری سله‌ها بود؛ بنابراین نمایه مذکور به‌عنوان بهترین شاخص جهت ارزیابی سله‌های خاک در کانون گردوغبار شرق اهواز شناخته شد. متغیرهای چگالی ظاهری و آهک بیشترین تأثیر را بر این شاخص داشتند. در کانون گردوغبار جنوب شرق اهواز بهترین شاخص ارزیابی سله بستن خاک متعلق به شاخص پایداری خاک بود که این نمایه بیشترین توجیه‌پذیری را توسط پارامترهای میزان OM و Mg داشت و کمبود این دو عامل را می‌توان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر حساسیت خاک به سله بستن در کانون مذکور معرفی نمود. شاخص مقاومت برشی به‌عنوان بهترین شاخص جهت

2. Afzali, S. F., & Gholami Nobandegani, Z. (2018). *The resistance of surface sediments and soil of Bakhtegan wetland to wind erosion and creation of fine dust under the influence of crust*, 4th International Congress of Agricultural Development, Natural Resources, Environment and Tourism of Iran, Tabriz. [In Persian]
3. Argaman, E., Singer, A., & Tsoar, H. (2006). Erodibility of some crust forming soils sediments from the Southern Aral Sea Basin as determined in a wind tunnel. *Earth Surface Processes and Landforms* 31 (1), 47-63. DOI: 10. 1002/esp. 1230
4. Armin, M., Rouhipour, H., Ahmadi, H., Salajegheh, A., Mahdian, M. H., & Ghorban Nia Kheybari, V. (2016). Relationship between aggregate stability and selected soil properties in Taleghan watershed. *Range and Watershed Management*, 69 (2), 275-295. DOI: 10. 22059/jrwm. 2016. 61683. [In Persian]
5. Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42 (4), 223-237. DOI: 10. 1016/0013-7952 (96) 00028-2
6. Belnap, J., Phillips, S. L., & Troxler, T. (2006). Soil lichen and moss cover and species richness can be highly dynamic: the effects of invasion by the annual exotic grass *Bromus tectorum*, precipitation, and temperature on biological soil crusts in SE Utah. *Applied Soil Ecology*, 32 (1), 63-76. DOI: 10. 1016/j. apsoil. 2004. 12. 010
7. Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124 (1), 3-22. DOI: 10. 1016/j. geoderma. 2004. 03. 005
8. Canton, Y., Roman, J. R., Chamizo, S., Rodriguez-Caballero, E., & Moro, M. J. (2014), Dynamics of organic carbon losses by water erosion after biocrust removal, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62 (4), 258-268. DOI: 10. 2478/johh-2014-0033
9. Chen, Y., Tarchitzky, J., Brouwer, J., Morin, J., & Banin, A. (1980). Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. *Soil Science*, 130 (1), 49-55. DOI: 10. 2136/sssaj1984. 03615995004800050
10. Chong-Feng, B. U., Gale, W. J., Qiang-Guo, C. A. I., & Shu-Fang, W. U. (2013). Process and mechanism for the development of physical crusts in three typical Chinese soils. *Pedosphere*, 23 (3), 321-332. DOI: 10. 1016/S1002-0160 (13) 60023-5
11. Dinarvand, M., Keneshloo, H., & Fayyaz, M. (2018). Vegetation of dust sources in Khuzestan Province. *Iran Nature*, 3 (3), 32-42. DOI: 10. 22092/irn. 2018. 116781. [In Persian]
12. Dojani, S., Budel, B., Deutschewitz, K., & Weber, B. (2011). Rapid succession of biological soil crusts after experimental disturbance in the Succulent Karoo, South Africa, *Applied Soil Ecology*, 48, 263-269. DOI: 10. 1016/j. apsoil. 2011. 04. 013
13. Evans, D. D., & Buol, S. W. (1968). Micromorphological study of soil crusts. *Soil Science Society of America Journal*, 32 (1), 19-22. DOI: [https://doi.org/10. 2136/sssaj1968. 03615995003200010005x](https://doi.org/10.2136/sssaj1968.03615995003200010005x)
14. Fang, H. Y., Cai, Q. G., Chen, H., & Li, Q. Y. (2007). Mechanism of formation of physical soil crust in desert soils treated with straw checkerboards. *Soil and Tillage Research*, 93 (1), 222-230. DOI: 10. 1016/j. still. 2006. 04. 006
15. Fukue, M., Nakamura, T., & Kato, Y. (1999). Cementation of soils due to calcium carbonate. *Soils and*

Foundations, 39 (6), 55-64. DOI: 10. 3208/sandf. 39. 6_55

16. Gee, G. W., & Or, D. (2002). *Particle-size analysis*. In: Dane, J. H. & Topp, G. C., (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 4, physical methods*. Madison: Soils Science Society of America. DOI: 10. 2136/sssabookser5. 1. 2ed. c15
17. Ghafari, H. (2021). The effect of physical crust development and disturbance on erodibility and dust emission in laboratory conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52 (4), 1059-1069. DOI: 10. 22059/IJSWR. 2021. 316173. 668853 [In Persian]
18. Ghobadi, M. H., Babazadeh, R., & Abdilor, Y. (2014). Utilization of lime for stabilizing marly soils and investigating the effect of pH variations on shear strength parameters. *Engineering Geology*, 8 (1), 1939-1962.
19. Hadas, A. & Frenkel, H. (1982). Infiltration as affected by long-term use of sodicsaline water for irrigation. *Soil Science Society of America Journal*, 46 (3), 524-530. DOI: 10. 2136/sssaj1982. 03615995004600030016x
20. Huang, L. (2017). Spatial distribution of *Agriophyllum squarrosum* Moq. Chenopodiaceae in the straw checkerboards at a revegetated land of the Tengger Desert, northern China. *Arid Land*, 9, 176-187. DOI: 10. 1007/s40333-017-0010-x
21. Irankhah Poshtmokhi, H., Asadi, H., Shabanpour, A., Shahrestani, M., & Ghorbanzadeh, N. (2015). *Relationship between the stability of soil Aggregates and some characteristics of soil and climate*, the first international conference and the second national conference on agriculture, environment and food security, Jiroft, Iran. [In Persian]
22. Ishizuka, M., Mikami, M., Leys, J., Yamada, Y., Heidenreich, S., Shao, Y., & McTainsh, G. H. (2008). Effects of soil moisture and dried raindrop crust on saltation and dust emission. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113 (D24212), 1-15. DOI: 10. 1029/2008JD009955
23. Katra, I. (2020). Soil erosion by wind and dust emission in semi-arid soils due to agricultural activities. *Agronomy*, 10 (1), 89. DOI: 10. 3390/agronomy10010089
24. Khalil Moghadam, B., Afyuni, M., Jalalian, A., Abbaspour, K., & Dehghani, A. A. (2011). Estimation of soil shear strength using transfer functions and soil spatial prediction functions. *Water and soil*, 25 (1), 187-195. DOI: 10. 22067/JSW. V0I0. 8520. [In Persian].
25. McLean, E. O. (1982). *Soil pH and lime requirement*. In: Page, A. L., (Ed.), *Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and microbiological properties*, Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
26. Moncada, M. P., Gabriels, D., Lobo, D., De Beuf, K., Figueroa, R., & Cornelis, W. M. (2014). A comparison of methods to assess susceptibility to soil sealing. *Geoderma*, 226, 397-404. DOI: 10. 1016/j. geoderma. 2014. 03. 014
27. Munkholm, L. J., Schjonning, P., Deboz, K., Jensen, H. E., & Christensen, B. T. (2002). Aggregate strength and mechanical behaviour of a sandy loam soil under long-term fertilization treatments. *European Journal of Soil Science*, 53 (1), 129-137. DOI: 10. 1046/j. 1365-2389. 2002. 00424. x
28. Mussa, S. A. B., Elferjani, H. S., Haroun, F. A., & Abdelnabi, F. F. (2009). Determination of available nitrate, phosphate and sulfate in soil samples. *International Journal of PharmTech Research*, 1 (3), 598-

604. DOI: 10. 23977/pnssi. 2022. 010101
29. Neaman, A., & Singer, A. (2011). *The effects of palygorskite on chemical and physicochemical properties of soils*. In: Galan, E., & Singer, A. (Eds.), *Developments in palygorskite-sepiolite research*, Oxford, Elsevier.
30. Neave, M. A. & 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. DOI: 10. 1016/j. geomorph. 2006. 10. 007
31. Nguetnkam, J. P., & Dultz, S. (2011). Soil degradation in Central North Cameroon Water-dispersible clay in relation to surface charge in Oxisol A and B horizons. *Soil and Tillage Research*, 113 (1), 38-47. DOI:10. 1016/j. still. 2011. 01. 006
32. Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (1982). *Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and microbiological properties*, Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
33. Pi, H., Webb, N. P., Huggins, D. R., & Sharratt, B. (2021). Influence of physical crust cover on the wind erodibility of soils in the inland Pacific Northwest, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46 (8), 1445-1457. DOI:10. 1002/esp. 5113
34. Schinner, F., & Von Mersi, W. (1990). Xylanase-, CM-cellulase-and invertase activity in soil: an improved method. *Soil Biology and Biochemistry*, 22 (4), 511-515. DOI: 10. 1016/0038-0717 (90) 90187-5
35. Scott, F., Reed, S. C. & Jayne, B. (2015). *Climate change and physical disturbance cause similar community shifts in biological soil crusts*. Proceedings of the National Academy of Science, USA.
36. Singer, M. J., & Shainberg, I. (2004). Mineral soil surface crusts and wind and water erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29 (9), 1065-1075. DOI: 10. 1002/esp. 1102
37. Souza-Egipsy, V., Wierchos, J., Sancho, C., Belmonte, A., & Ascaso, C. (2004). Role of biological soil crust cover in bioweathering and protection of sandstones in a semi-arid landscape (Torrollones de Gabarda, Huesca, Spain). *Earth Surface Processes and Landforms*, 29 (13), 1651-1661. DOI: 10. 1002/esp. 1118
38. Spark, D. (1996). *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods*, Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
39. Sun, Z. Q., Kang, Y. H. & Jiang, S. F.) 2010 (. Effect of sprinkler and border irrigation on topsoil structure in winter wheat field. *Pedosphere*. 20, 419–426. DOI: 10. 1016/S1002-0160 (10) 60031-8
40. Tayel, M. Y., Abdel-Hady, M., & Eldardiry, E. I. (2010). Soil structure affected by some soil characteristics, *American-Eurasian Journal of Agriculture and Environment Sciences*, 7 (6), 705-712.
41. Valentin, C., & Bresson, L. M. (1997). *Soil crusting*, In: Lal, R., Winfried, E., Blum, H., Valentin, C., & Stewart, B. A., (Eds.), *Methods for assessment of soil degradation*, Boca Raton: CRC Press.
42. Walkley, A. J., & Black, I. A. (1934). Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method, *Soil Science*, 37, 29-38.
43. Zejun, T., Tingwu, L., Qingwen, Z., & Jun, Z. (2002). *The sealing process and formation at soil surface under the impacts of raindrops and polyacrylamid*, Twelfth International Soil Conservation Organization

Conference, Beijing, China.

44. Zhou, X., Zhao, Y., Belnap, J., Zhang, B., Bu, C., & Zhang, Y. (2020). Practices of biological soil crust rehabilitation in China experiences and challenges. *Restoration Ecology*, 28, 45-55. DOI: 10. 1111/rec. 13148
45. Zhu, X., Liang, Y., Cao, L., Tian, Z., & Li, M. (2022). Pore characteristics of physical crust samples from two typical erodible soils in southern China. *European Journal of Soil Science*, 73 (2), e13234. DOI: 10. 1111/ejss. 13234