Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

Modeling of land use effect on soil crust strength in southeastern Ahvaz

Banafshe Yasrebi[1]*, Heidar Ghafari Goosheh[2], Hamid Reza Abbasi[3], Kourosh Behnamfar[1]

[1]Assistant Professor, Natural Resources Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources, Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran
[2]Assistant Professor, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
[3]Assistant Professor, Desert Department, Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

Abstract

Introduction

Crusts are a hard layer on surface soil, that is formed by disaggregation– aggregation process in which particles of soil, air, water, and organic matter are connected to each other and classified into different types including physical, chemical, and biological. Chemical crusts like salt crusts are formed due to intense evaporation on the surface of extremely salty soils. Physical crusts are formed raining or through irrigation of agricultural lands and are divided into three categories including structural, erosional, and sedimentary, depending on the process of their formation. The biological crust which is formed by the function of algae, cyanobacteria, mosses, and lichens, and due to their positive protective roles and restoration ability received much attention so far. However, studies on the effects of non-biological crust and their protective role have been considered less. Various effective factors on crust strength have been investigated but land use has been left out. This research has focused on modeling land use effection crust strength, in dust emission sources in the southeast of Ahvaz.

Materials and Methods

In the south-eastern of Ahvaz in Khouzestan province, three land uses including agriculture, agroforestry, and barren land were selected. In order to measure the strength of the surface crust in selected land uses, a handheld penetrometer was used and crust strength was measured in random points in 30 points in each land use. To reduce the influence of other environmental conditions, measurements were done scattered on each land use. Then, to obtain the strength in one point, three measured points were averaged, and finally, 90 measured points were obtained for each. The surface soil moisture of land uses was done by taking soil samples and measuring in the laboratory, and then significant differences between land use groups were tested by analysis of variance. Normality and homogeneity of variances were tested by using the Kolmogrove-Sminov and Levene's tests on soil strength data set. Due to the fact that the soil texture is different in studied land uses and also the soil texture is one of the most important factors affecting the strength of crust in the measured points, the soil texture was extracted from the existing maps. In order to investigate the effect of these two independent factors on the crust strength as well as their interaction, General Linear Modeling (GLM) was chosen to exclude the soil texture effect on crust strength variation and model the land use effects.

Results and Discussion

Results showed that soil surface moisture does not have a significant difference in land use groups. By using the General linear model, crust strength was modeled. In the first stage, the effect of land use and soil texture were investigated as the most important factors affecting the hardness of the crust and the results showed that land use and soil texture as well as their interactions are effective in changing the hardness of the crust at the level of 95 % and 99 %, respectively. These factors have an effect on the variance of crust hardness, but the main source of variance is land use, and this factor alone explains about 78 % of the crust strength variance, and the model explains 96 % of the variance of the dependent variable and the presented model is significant at the level of 99 %. In order to check the existence of a significant difference in crust strength in studied land uses, Helmert's Contrast and Bonferroni tests were used. The result showed that there is a significant difference in the average

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

crust strength of barren lands with agriculture and agroforestry at the 99 % level, and no significant difference is observed between agriculture and agroforestry. Then, in order to investigate the single factor of land use, the soil texture was considered as covariance, and its effect on the hardness of the crust was removed. The results showed that there is a significant difference in the average hardness of barren land use with agriculture and agroforestry at the level of 99 %. The presented model explains 86 % of the variance of the hardness of the ridge, and among the factors with a significant level, 99 % of the hardness of the crust in a barren land with 70 % partial effect has the largest role in explaining the variance. With the change of land use from agroforestry to barren land, the hardness of the soil surface increases by 50 %, and with changing to agricultural land, it decreases by 14 %.

Conclusion

In agricultural and forestry land uses, with the increase in the traffic of people and heavy machinery, the crust is broken and does not return to its original strength. Based on these results, it can be said that in desert areas, vegetation conservation is not the only way to protect soil from wind erosion, but protecting the crust against traffic and breakage can be an efficient solution that has received less attention. Legal confrontation with land use change and land plowing can be a sustainable solution for these areas. It is suggested that with a general assessment of the surface strength of the crust on bare land, easily can be protected against the wind only with management practices.

Keywords: Crust, Penetrometer, Shear strength, Wind erosion

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail:b.yasrebi@areeo.ac.ir

Citation: Yasrebi, B., Ghafari Goosheh, H., Abbasi, H.R., & Behnamfar, K. (2023). Modeling of land use effect on soil crust strength in southeastern Ahvaz. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 286-296.
DOI:10.22098/mmws.2022.11838.1174
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.19.9

Received: 23 November 2022, Received in revised form: 24 December 2022, Accepted: 24 December 2022, Published online: 24 December 2022
Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 2, pp. 286-296

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵۴۶-۲۷۸۳

مدل‌سازی تأثیر کاربری اراضی بر سختی سله‌های فیزیکی در جنوب شرقی اهواز

بنفشه یثربی[۱*]، حیدر غفاری گوشه[۲]، حمیدرضا عباسی[۳]، کورش بهنام‌فر[۱]

[۱] استادیار، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران

[۲] استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

[۳] استادیار، بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

چکیده

سله، بخش سخت بالای سطح خاک است که در اراضی غیرکشاورزی در مناطق خشک و بیابانی به‌عنوان یک عامل حفاظت از خاک در مقابل تنش برشی باد شناخته می‌شود. در این پژوهش، هدف بررسی سختی سله‌های فیزیکی و مقایسهٔ نقش کاربری‌های مختلف در سختی سله است. به این‌منظور در کانون جنوب شرق اهواز و در منطقه‌ای با مساحت ۱۰۰ هزار هکتار سه کاربری کشاورزی، نهال‌کاری و زمین بایر انتخاب شدند. به‌منظور اندازه‌گیری سختی سله از پنترومتر قابل حمل استفاده شد و به‌طور غیرمتمرکز و تصادفی در هر کاربری اقدام به اندازه‌گیری سختی در ۹۰ نقطه شد. سپس سختی نهایی در هر نقطه با میانگین‌گیری از سه نقطه به‌دست آمد. میانگین سختی سله در نهال‌کاری‌ها ۳، در اراضی بایر ۴/۸۶ و در اراضی کشاورزی ۳/۴ مگاپاسکال است. سپس با استفاده از مدل خطی عمومی اقدام به مدل‌سازی سختی سله در کاربری‌های مورد مطالعه شد. در مرحلهٔ اول تأثیر کاربری و بافت خاک بر سختی سله مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که کاربری اراضی و بافت خاک و نیز تعامل آن‌ها به‌ترتیب در سطح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد در تغییر سختی سله تأثیرگذار هستند. هر دو عامل بافت خاک، کاربری اراضی و بر هم‌کنش این دو عامل بر واریانس سختی سله تأثیرگذار هستند، اما منشأ اصلی واریانس در سختی سله کاربری اراضی است و این عامل به‌تنهایی حدود ۷۸ درصد واریانس را تبیین می‌نماید. به‌طور مجموع این عوامل به میزان ۹۶ درصد واریانس متغیر وابسته را تبیین نموده و مدل ارائه شده در سطح ۹۹ درصد معنادار است. سپس به‌منظور بررسی تک عاملی کاربری اراضی، بافت خاک به‌عنوان کوواریانس در نظر گرفته شد و اثر آن بر سختی سله حذف شد. نتایج نشان داد که در میانگین سختی سله کاربری زمین بایر با کشاورزی و نهال‌کاری در سطح ۹۹ درصد تفاوت معنادار وجود دارد. مدل ارائه شده ۸۶ درصد از واریانس سختی سله را تبیین می‌نماید و در بین عوامل با سطح معناداری ۹۹ درصد سختی سله در زمین بایر با ۷۰ درصد تأثیر جزئی، بیش‌ترین نقش را در تبیین واریانس دارد. با تغییر کاربری از نهال‌کاری به زمین بایر سختی سطح خاک ۵۰ درصد رشد می‌کند و با تغییر کاربری به اراضی کشاورزی ۱۴ درصد افت می‌کند. در کاربری‌های کشاورزی و نهال‌کاری با افزایش تردد افراد و نیز ماشین‌آلات سنگین سله‌ها شکسته شده و به استقامت اولیه باز نمی‌گردند.

واژه‌های کلیدی: پنترومتر، سله، فرسایش بادی، مقاومت برشی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: b.yasrebi@areeo.ac.ir

استناد: یثربی، بنفشه، غفاری گوشه، حیدر، عباسی، حمیدرضا، و بهنام‌فر، کورش (۱۴۰۲). مدل‌سازی تأثیر کاربری اراضی بر سختی سله‌های فیزیکی در جنوب شرقی اهواز. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۲۸۶-۲۹۶.

DOI:10.22098/mmws.2022.11838.1174

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.19.9

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۲، صفحه ۲۸۶ تا ۲۹۶

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

به‌طور معمول برای کاهش فرسایش بادی و یا تثبیت لایهٔ سطحی خاک از روش‌های مکانیکی مختلفی مانند حصارها، بادشکن‌ها، افزایش پوشش گیاهی و یا از اقداماتی دیگر استفاده می‌شود که در آب و هوای خشک بی‌اثر هستند و یا تأثیر آن‌ها کوتاه مدت بوده و معمولاً از نظر اقتصادی نیز پرهزینه هستند. امروزه مفهومی که برای بازیابی و احیای اکوسیستم‌های تخریب شده مطرح می‌شود استفاده از روش‌های مبتنی بر طبیعت[1]در راستای افزایش پایداری حوضه‌های آبریز است و به‌عنوان راه‌حل‌های طولانی مدت و مقرون به‌صرفه شناخته می‌شوند (Keesstra et al., 2018). یکی از فرآیندهای شناخته شده در طبیعت، تشکیل سله بر سطح خاک مناطق نیمه‌خشک تا خشک است که مطالعات متعددی به اهمیت آن‌ها به‌عنوان یک عامل کلیدی در کاهش فرسایش بادی (Belnap, 2003; Pi et al., 2021)، افزایش سرعت آستانهٔ فرسایش بادی تا حدود دو برابر (Leys and Eldridge, 1998) و افزایش شدت خیزش گردوغبار در نتیجهٔ شکسته شدن سله‌ها و یا کاهش استقامت آن‌ها تأکید کرده‌اند (Belnap and Eldridge, 2001; Klose et al., 2019). تا جایی‌که فرسایش در خاک‌های بدون سله شش برابر خاک‌های دارای سلهٔ تخمین زده شده است (Chepil, 1955) و این میزان در مراتع استرالیا ۶/۷ برابر (Eldridge and Leys, 2003) و در شمال چین ۴۶ برابر (Zhang et al., 2006) برآورد شده است و در تپه های ماسه‌ای نیز با تشکیل سله‌ها میزان فرسایش ۸۵ تا ۹۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد (Zobeck, 1991). حتی سله‌هایی که حاصل بارش ۰/۵ میلی‌متری هستند در استپ‌های شمال چین به میزان قابل‌توجهی فرسایش بادی را کاهش داده‌اند (Yan et al., 2015). در مطالعات انجام گرفته در خوزستان عامل سلهٔ سطحی را جهت شناخت مناطق حساس به فرسایش بادی استفاده کرده است که با میزان رس و مادهٔ آلی نسبت عکس دارد (Enanani et al., 2017). هم‌چنین از سله‌های شیمیایی که محصول غلظت‌های بالای هالیت در خاک‌های ریزدانه استان فارس است عامل کاهش فرسایش بادی نام برده شده است (Sirjani et al., 2017).

سله‌ها قشر سخت در سطح خاک هستند که توسط فرآیند پراکنش– تجمع[2]که ذرات خاک، هوا، آب، مواد آلی به یک‌دیگر متصل می‌شود تشکیل می‌شوند و از نظر منشأ تشکیل به سه دستهٔ شیمیایی، فیزیکی و زیستی[3]دسته‌بندی می‌شوند (Thomas and Dougill, 2007). سله‌های شیمیایی، مانند پوسته‌های نمکی به‌دلیل تبخیر شدید در سطح خاک‌های به‌شدت شور و نمکی تشکیل می‌شوند (Grünberger et al., 2008). سله‌های فیزیکی بعد از بارش و یا آبیاری اراضی کشاورزی تشکیل می‌شوند و بسته به فرآیند تشکیل خود به سه دستهٔ ساختاری، فرسایشی و رسوبی تقسیم می‌شوند. در این سله‌ها هنگامی‌که آب به خاک اضافه می‌شود، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و بار منفی ذرات خاک فعال می‌شود و ذرات منفصل به یک‌دیگر می‌پیوند و قشر سختی در سطح خاک تشکیل می‌شود. سله‌های فیزیکی یکی از پدیده‌هایی هستند که به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک در سطح خاک تشکیل می‌شوند. سله‌های فیزیکی علاوه‌بر این‌که محدودیت عرضهٔ مواد سست و فرسایش‌پذیر در فرسایش بادی را موجب می‌شوند باعث کاهش تبخیر از سطح خاک نیز می‌شوند که در اراضی مرتعی بسیار حیاتی است (Yan et al., 2015). منشأ سله‌های زیستی نیروهای منسجم اگزوپلی ساکاریدها یا مواد حاصل از عملکرد جلبک‌ها، سیانوباکترها، خزه‌ها و گلسنگ‌ها است و ریزموجودات ذکر شده قادرند دماهای شدید، خشکسالی و تشعشعات خورشیدی را با وجود داشتن دورهٔ رطوبت نسبتاً کوتاه برای فعالیت متابولیک تحمل کنند (Belnap and Gillette, 1998). سله‌های زیستی در ایجاد و حفظ حاصل‌خیزی خاک‌های مناطق بیابانی حیاتی هستند. آن‌ها کربن و نیتروژن را تثبیت می‌کنند و هم‌چنین گردوغبار غنی از مواد مغذی را جذب کرده و می‌توانند محرک رشد گیاهان باشند (Belnap and Gillette, 1997).

به‌طورکلی سله‌ها نه تنها یک مانع فیزیکی در برابر فرسایش ایجاد می‌کنند، بلکه در برابر سایش، که منبع قابل توجهی از انتشار گردوغبار است نیز مقاومت نموده و عرضهٔ رسوبات سست و منفصل را محدود می‌کنند (Houser and Nickling, 2001). در مطالعات مختلف از عوامل متعددی بر میزان تأثیر سله‌ها بر کاهش فرسایش بادی و هم‌چنین سختی و استقامت آن‌ها نام برده شده است از آن جمله می‌توان به افزایش میزان رس و مادهٔ آلی (Hagen et al., 1992; Pi et al., 2020)، میزان رطوبت، کانی شناسی رس و آهک (Gillette et al., 1982) میزان ترکیبات شیمیایی نظیر هالیت، سولفات سدیم و کلرید کلسیم (Li et al., 2021) اشاره کرد و بافت خاک یکی از مهم‌ترین عواملی است که از جنبه‌های مختلف بر سختی سله‌های سطحی اثر می‌گذارد (Pi et al., 2021). افزایش فراوانی ذرات با قطر از ۵۳ میکرون به بیش از ۱۲ درصد (Rice and Mcewan, 2001)، مقدار سطحی از خاک که تحت پوشش سله قرار می‌گیرد (Pi et al., 2021; Pi and Sharratt, 2019; Rice et al., 1996)، ضخامت سله، سختی سله و ریزپستی و بلندی (Microrielif) (Zobeck, 1991; Gillette et al., 1982) اشاره کرد و پوشش ۱۵ درصدی سطح

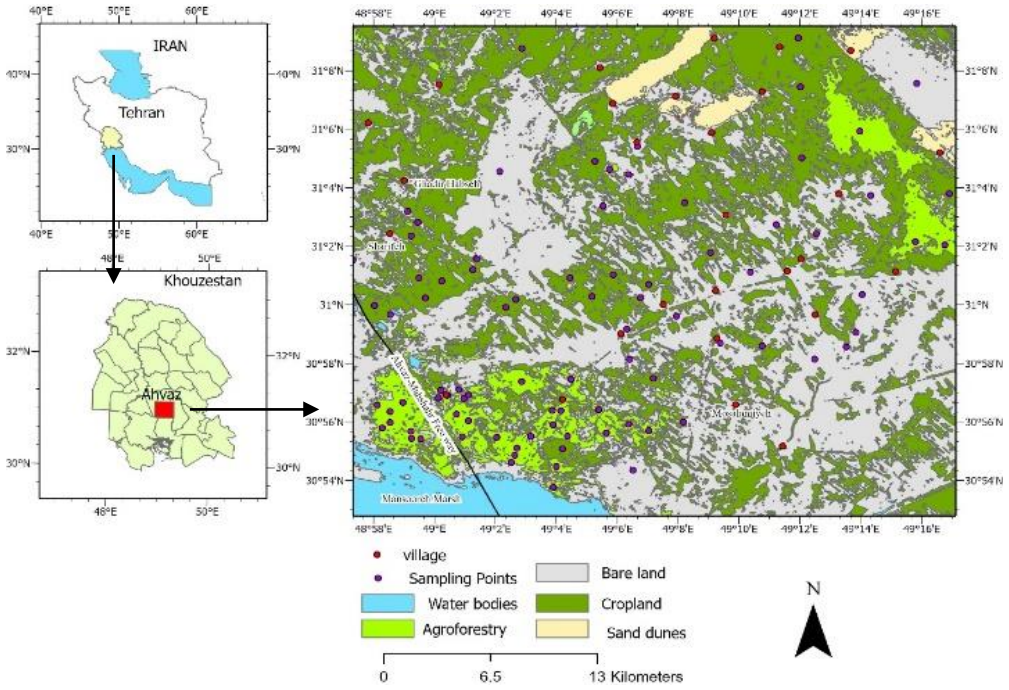
[1] Nature based solutions (NBSs)
[2] Disaggregation– aggregation
[3] Biologic crust

خاک توسط سله میزان برداشت مواد سست سطحی را تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد (Pi and Sharratt, 2019). در مطالعات انجام گرفته در دشت سگزی نیز درصد ذرات ریزدانه و یون‌های کلسیم و منیزیم از مهم‌ترین عوامل سختی سله و افزایش سرعت آستانهٔ فرسایش بادی عنوان شده است (Davari Dolt Abadi et al., 2020). همان‌طور که به‌طور مختصر اشاره شد عوامل مؤثر بر سختی سله از جنبه‌های متفاوت مانند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، خصوصیات فیزیکی سله و مقدار پوشش سله مورد پژوهش و بررسی قرار گرفته است. اما آن‌چه تاکنون به آن کم‌تر پرداخته شده است نقش کاربری اراضی و مدیریت آن بر سختی سله است. اندازه‌گیری مقاومت فشاری از این جهت در مناطق تحت تأثیر فرسایش بادی اهمیت دارد که سطح خاک چقدر در مقابل بمباران رسوبات حمل شده توسط باد و یا حرکت جهشی (Saltation) ذرات مقاومت می‌کند (Rice et al., 1999). حرکت ذرات با قطر ۰/۰۵ تا ۰/۵ میلی‌متر (ماسهٔ خیلی ریز تا متوسط) به‌صورت جهشی است که باعث افزایش قدرت ساینگی باد می‌شوند (Zobeck, 1991). نظر به اهمیت حفظ سله به‌عنوان یکی از عوامل مهم کاهندهٔ عرضهٔ مواد سست در فرسایش بادی و یکی از روش‌های مبتنی بر طبیعت جهت مبارزه با فرسایش بادی، پژوهش حاضر به بررسی نقش کاربری‌های متفاوت در میزان سختی سله‌های فیزیکی در کانون گردوغبار جنوب شرق شهرستان اهواز پرداخته است که هر دو مورد جزء نوآوری‌های این پژوهش است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه در عرض ۳۰ درجه و ۵۴ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۱۶ دقیقه و طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۶ دقیقه با مساحت حدود ۱۰۰ هزار هکتار بخشی از کانون چهارم گردوغبار در جنوب شرقی شهر اهواز در استان خوزستان قرار دارد (شکل ۱). منطقهٔ مورد مطالعه بخشی از حوضهٔ رودخانه مارون- جراحی و بزرگ حوضهٔ آبریز خلیج فارس است. یک جلگه رسی حاصل رسوب‌گذاری سرشاخه‌های رود جراحی است که رسوبات فرسایش یافتهٔ سازندهای گروه فارس بالادست را رسوب‌گذاری نموده‌اند. رودخانهٔ کوپال با ورود به کانون چهارم، یک مخروط افکنه تشکیل می‌دهد و رخسارهٔ آن در حال حاضر اراضی کشاورزی است، به نحوی‌که مسیل اصلی رودخانه نیز تغییر کاربری داده شده است. رودخانه با ادامهٔ مسیر به سمت دریاچهٔ کویری فصلی (هور منصوره) تشکیل یک هور جریانی به نام شریفه را داده که امروزه رخسارهٔ آن سبخا و اراضی کشاورزی است و به‌شدت دچار تغییر کاربری شده است (Yasrebi et al., 2022). میزان بارندگی در منطقه حدود ۲۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه، ۲۴ درجهٔ سانتی‌گراد است که بر اساس تقسیم‌بندی اقلیم‌نمای آمبرژه بیابانی معتدل است. از نظر پوشش گیاهی جزء نواحی استپی گرم به‌شمار می‌رود و گونهٔ غالب آن از نوع شورپسند است (Yasrebi et al., 2022).



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه و نقاط برداشت داده در استان خوزستان و ایران

Figure 1- Location of studied area and sampling points in Khouzestan Province, Iran

۲-۲- روش مطالعه

در پژوهش حاضر داده‌های مورد نیاز با اندازه‌گیری در عرصه جمع‌آوری شد و پس از تشکیل بانک داده، مدل‌سازی و تحلیل‌های آماری به شرح ذیل انجام پذیرفت.

۲-۲-۱- اندازه‌گیری سختی سطح خاک

اندازه‌گیری سختی سطح خاک با استفاده از یک دستگاه پنترومتر یا نفوذسنج دستی مستقیم در عرصه اندازه‌گیری شد (شکل ۲).

شکل ۲- اندازه‌گیری سختی سطح خاک با پنترومتر
Figure 2- Soil surface strength measured by a handheld penetrometer

اندازه‌گیری سختی سطح خاک را می‌توان با حمل نمونهٔ دست نخورده در آزمایشگاه نیز اندازه‌گیری کرد. ابزاری که مقاومت خاک را در برابر شکسته شدن اندازه‌گیری می‌کند پنترومتر است که شامل یک نوک مخروطی یا استوانه‌ای، یک محور فلزی و یک فشارسنج است که مقاومت را بر حسب پوند بر اینچ مربع اندازه‌گیری می‌کند، که در گزارشات به مگاپاسکال تبدیل می‌شود. پنترومتر به‌صورت عمودی در سطح خاک فرو برده می‌شود. فشار بر دستگاه تا زمان رخداد اولین شکست سله ادامه پیدا می‌کند و عدد دستگاه قرائت می‌شود. پنترومترها دارای نوک با اقطار متفاوت هستند، که بسته به میزان سختی خاک می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. میزان سختی با قطر سر انتخابی رابطهٔ عکس دارد. پنترومترهای قابل حمل که در سایزهای جیبی نیز وجود دارند بر اساس مطالعات، دقت مناسبی نیز دارند (Rolston et al., 1991; Mousavi et al., 2021). استفاده از دستگاه‌های قابل حمل بسیار ساده و کم هزینه است که می‌توان تعداد قرائت‌های انجام شده را تا به‌دست آوردن دقت مناسب بارها تکرار کرد (Mousavi et al., 2021). در این پژوهش برای هر نقطه سه تکرار در نظر گرفته شد و عدد نهایی از میانگین سه تکرار به‌دست آمد. به‌منظور مقایسهٔ تأثیر کاربری بر سختی سله‌های تشکیل شده سه کاربری کشاورزی دیم، زمین بایر و عرصه‌های نهال‌کاری شده انتخاب شدند. منظور از کاربری کشاورزی عرصه‌هایی است که شخم زده می‌شوند و زمین بایر مناطقی است که در آن‌ها هیچ پوششی در سطح خاک وجود ندارد. نهال‌کاری‌ها نیز مناطقی هستند که به‌منظور احیا و تثبیت کانون‌های گردوغبار اقدام به اجرای عملیات بیولوژیک و کاشت نهال با حفر فارو و کندن چاله در فارو نموده‌اند. کاربری‌ها با استفاده از نقشهٔ کاربری اراضی تهیه شده با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست در منطقه انتخاب شدند (Yasrebi et al., 2022). در هر کاربری به‌طور پراکنده و تصادفی در سطح منطقهٔ مورد مطالعه بیش از ۹۰ نقطه سختی سطح خاک اندازه‌گیری انجام شد و در نهایت پس از میانگین‌گیری در هر کاربری ۳۰ نقطه به‌عنوان سختی سطحی، نهایی شد. به‌منظور کم کردن اثر سایر شرایط محیطی که در مطالعه لحاظ نشده‌اند، منطقهٔ مورد مطالعه نسبتاً کوچک و نقاط اندازه‌گیری در هر کاربری غیرمتمرکز انتخاب شدند. اما به هرحال سختی سله‌ها تنها تحت تأثیر کاربری اراضی نیست، بافت و رطوبت خاک از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر سختی سله هستند (Pi et al., 2021). در هر کاربری به‌طور تصادفی ۱۰ نمونه خاک سطحی در محل‌های اندازه‌گیری سختی سله به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت در آزمایشگاه برداشت و با توجه به موجود بودن نقشهٔ خاک منطقه، بافت خاک نیز در مکان‌های مورد نظر استخراج شد. سپس با استفاده از تحلیل واریانس یک طرفه وجود تفاوت معنادار بین رطوبت خاک سطحی در کاربری‌ها مورد سنجش قرار گرفت.

۲-۲-۲- مدل خطی عمومی

در مدل خطی عمومی[1] یک متغیره، می‌توان از متغیرهای مستقل به‌عنوان متغیرهای کمکی در تحلیل استفاده کرد. در این صورت این‌گونه طرح‌ها، به‌عنوان تحلیل طرح کواریانس نامیده می‌شوند که به متغیر مستقل کمی، متغیر کمکی و به متغیر مستقل کیفی، عامل گفته می‌شود (Kalantari, 2003). متغیرهای کمکی به‌منظور حذف و از بین بردن اثرات خارجی بر متغیر وابسته و افزایش دقت، مورد استفاده قرار می‌گیرند. به کوواریانس، عامل مداخله‌گر یا نویز هم گفته می‌شود و در مدل‌سازی خطی عمومی تلاش می‌شود با ثابت نگه داشتن اثرات متغیر مزاحم، برابری مقدار میانگین متغیر وابسته در سطوح مختلف متغیر عامل شناسایی شود (Kéry and Royle, 2016). عامل مستقل اصلی می‌تواند در سطح اسمی اندازه‌گیری شود اما کوواریانس می‌بایست در سطح نسبی اندازه‌گیری شده باشد. مدل خطی عمومی به‌صورت رابطهٔ (۱) است:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + B(X_{ij} - X) + \epsilon_{ij} \qquad (۱)$$

[1] General linear model (GLM)

همان‌طور که دیده می‌شود، رابطهٔ (۱) بیان‌گر ارتباط خطی بین متغیرهای وابسته و مزاحم و هم‌چنین متغیرهای عامل است و در آن μ؛ میانگین کل، y_{ij}؛ مشاهدهٔ j از سطح i متغیر عامل یا است. τ_i؛ هم اثر متغیر عامل در سطح i، که البته هدف برآورد آن‌ها است. به‌همین ترتیب، ϵ_{ij} خطا، x_{ij} مقدار متغیر مزاحم را در سطح i برای مشاهده j نشان می‌دهد. x میانگین کل متغیر مزاحم و ضریب B هم شیب خط رگرسیونی است که بین متغیر وابسته و متغیر مزاحم وجود دارد و رابطهٔ خطی را بین آن دو مشخص می‌کند. شرط اولیهٔ کاربرد تحلیل خطی عمومی نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس گروه‌ها است که به‌ترتیب با آزمون‌های کلموگروف اسمیرنوف[1] و لون[2] بررسی می‌شوند. با توجه به پراکندگی نقاط اندازه‌گیری سختی سله در سطح کاربری‌ها، بافت خاک به‌عنوان کوواریت و به منظور حذف اثر آن بر سختی سله در مدل‌سازی وارد شد. در مطالعات مختلف، بافت خاک یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر سختی سله عنوان شده است (Pi et al., 2021; Stovall et al., 2022). مدل‌سازی در بستهٔ نرم‌افزاری SPSS نسخهٔ ۲۱ انجام شد.

۳- نتایج و بحث

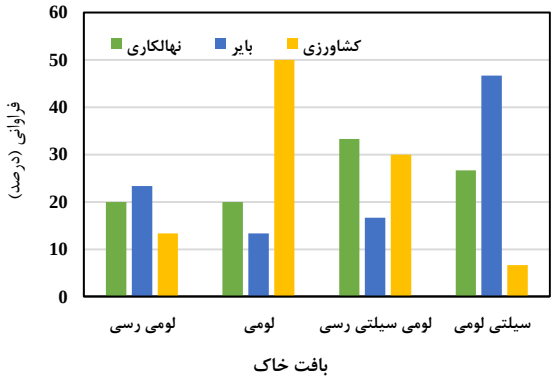
ابتدا به‌منظور بررسی رطوبت خاک سطحی اندازه‌گیری شده در کاربری‌ها و بررسی وجود تفاوت معنادار بین نمونه‌ها، از تحلیل واریانس استفاده شد که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- تحلیل واریانس رطوبت خاک سطحی در مکان‌های اندازه‌گیری سختی سله

Table 1-Analysis of variance in surface soil moisture

کاربری‌ها	میانگین رطوبت (درصد)	معناداری آزمون نرمالیتی	معناداری آماره لون	F	معناداری آمارهٔ F
نهال‌کاری	4.45	1			
بایر	4.27	0.85	0.68	1.75	0.19
کشاورزی	5.30	0.98			

هم‌چنان‌که در جدول ۱ نیز مشاهده می‌شود با واریانس درون گروهی ۷۴/۵ و بین گروهی ۹/۷ و سطح معناداری ۰/۱۹ بین کاربری‌ها از نظر رطوبت خاک سطحی تفاوت معناداری مشاهده نمی‌شود. توزیع نقاط اندازه‌گیری سختی سله در بافت‌های خاک مختلف در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳- سختی سله در کاربری‌های مختلف

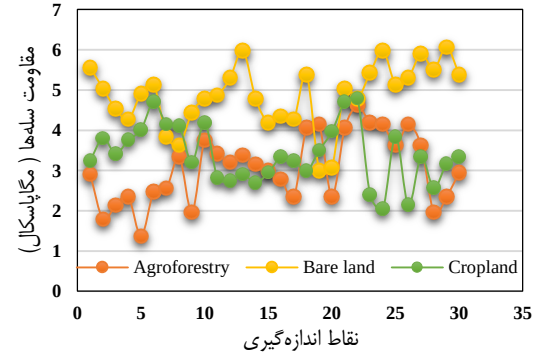
Figure 3- Crust strength in different land uses

نقاط اندازه‌گیری سختی سله‌ها در چهار بافت خاک سیلتی لومی، لومی سیلتی رسی، لومی و لومی رسی قرار دارند. آمار توصیفی سختی سله در سه کاربری اندازه‌گیری شده در جدول ۲ ارائه شده و مقایسهٔ مقاومت سله در کاربری‌های متفاوت در شکل ۴ نشان داده شده است.

جدول ۲- آماره‌های توصیفی داده‌های سختی سلهٔ سطحی در کاربری‌ها

Table 2- Descriptive statistics of crust strength

هاکاربری	حداقل (مگاپاسکال)	میانگین (مگاپاسکال)	حداکثر (مگاپاسکال)	انحراف معیار
نهال‌کاری	1.37	3.07	4.61	0.85
بایر	2.99	4.86	6.07	0.79
کشاورزی	2.05	3.4	4.78	0.72



شکل ۴- سختی سله در کاربری‌های مختلف

Figure 4- Crust strength in different Land uses

هم‌چنان‌که مشاهده می‌شود سختی سله‌ها در کاربری زمین بایر به نسبت سایر کاربری‌ها بیش‌تر است. به‌منظور مدل‌سازی اثر بافت خاک و کاربری اراضی بر سختی سله، ابتدا آزمون نرمالیته و سنجش همگنی واریانس‌ها در گروه‌های کاربری اجرا شد و نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است.

[1] Kolmogrov Smirnov
[2] Leven test

جدول ۳- معناداری آزمون نرمالیتی و برابری واریانس
Table 3- Normality test and Leven test significant

	Kolmogrov Smirnov P value	Levene Statistic P value
سختی سله در کاربری‌ها	0.655	0.465

با توجه به عدم معناداری هر دو آزمون فرض صفر مبنی بر نرمال بودن سختی سله در گروه‌های کاربری و هم‌چنین همگنی واریانس‌ها تایید می‌شود. به‌منظور حذف اثر عامل بافت خاک در مدل‌سازی و ارائهٔ مدل تک متغیره از تأثیر کاربری‌های اراضی عامل اخیر به‌عنوان کوواریت در مدل‌سازی وارد شد. در آزمون برابری یا عدم برابری بردارهای میانگین سختی سله در گروه‌های سه‌گانه کاربری نیز از مقایسه مقید هلمرت[1] استفاده شد (جدول۴).

جدول ۴- مقایسه مقید هلمرت
Table 4- Helmert contrast comparison

	میانگین مربعات	معناداری
مقید هلمرت	21.74	0.000
خطا	0.648	

با توجه به اعداد محاسبه شده، واریانس بین گروهی بیش از ۳۳ برابر واریانس خطا یا درون گروهی است پس منشأ واریانس تفاوت سختی سله در گروه‌های کاربری است و ضمن رد فرض صفر، می‌توان گفت به احتمال ۹۹ درصد میانگین سختی سله حداقل در یک گروه با بقیه متفاوت است. در جدول ۵ نتایج آزمون بنفرونی[2] که به‌منظور مقایسهٔ زوجی میانگین‌ها و انجام تحلیل‌های بیش‌تر استفاده شده، ارائه شده است.

جدول ۵- نتایج آزمون بنفرونی
Table 5- Bonferroni test results

میانگین سختی سله در کاربری‌ها		ارزش P
نهال‌کاری	زمین بایر	0.000
	کشاورزی	0.292
زمین بایر	نهال‌کاری	0.000
	کشاورزی	0.000

زمانی‌که تعداد گروه‌های مورد مطالعه کم است، آزمون بنفرونی قوی‌ترین آزمونی است که حداقل تفاوت معنادار را می‌واند بیابد. بر اساس نتایج ارائه شده، میانگین سختی سله در اراضی بایر در سطح ۹۹ درصد با میانگین در دو گروه دیگر اختلاف معنادار دارد. بین اراضی کشاورزی و نهال‌کاری تفاوت معناداری مشاهده نمی‌شود. برای مدل‌سازی و سنجش میزان وابستگی کاربری اراضی با سختی سله از مدل خطی عمومی استفاده شد و در ابتدا عوامل مستقل و هم‌چنین تعامل آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند (جدول ۶).

جدول ۶- ارزیابی عوامل مستقل و برهمکنش آن‌ها بر سختی سله
Table 6- Evaluation of factors and their interaction on crust strength affection

	معناداری	میانگین مربعات	مربع Eta
مدل	0.000	223.24	0.961
بافت خاک	0.041	24.35	0.15
کاربری اراضی	0.000	64.28	0.78
بافت خاک * کاربری اراضی	0.049	15.12	0.12
خطا		0.63	

اعداد ارائه شده در جدول ۶ نشان می‌دهد که هر دو عامل بافت خاک، کاربری اراضی و بر هم‌کنش آن‌ها بر واریانس سختی سله تأثیرگذار هستند. اما منشأ اصلی واریانس در سختی سله، کاربری اراضی است و این عامل به تنهایی حدود ۷۸ درصد واریانس را تبیین می‌نماید و به‌طور مجموع این عوامل به میزان ۹۶ درصد واریانس متغیر وابسته را تبیین نموده و مدل ارائه شده در سطح ۹۹ درصد معنادار است. حال با توجه به این‌که هدف بررسی اثر تک متغیر تغییرکاربری بر سختی سله است، بافت خاک به‌عنوان کوواریانس از مدل‌سازی حذف و تنها تأثیر کاربری اراضی بر سختی سله کمی‌سازی شد (جدول ۷).

مدل ارائه شده ۸۶ درصد از واریانس سختی سله را تبیین می‌نماید و در بین عوامل با سطح معناداری ۹۹ درصد، سختی سله در زمین بایر با ۷۰ درصد تأثیر جزئی، بیش‌ترین نقش را در تبیین واریانس دارد. با تغییر کاربری از نهال‌کاری به زمین بایر سختی سطح خاک ۵۰ درصد رشد می‌کند و با تغییر کاربری به اراضی کشاورزی ۱۴ درصد افت می‌کند. در بین کاربری‌های مطالعه شده تفاوت در میزان آشفتگی سطح خاک است که تردد ماشین آلات سنگین باعث شکستن سله‌ها می‌شود. در پژوهش Belnap and Eldridge (2001) از دلایل شکست سله به اختلالات مکانیکی مانند تردد انسان و دام در عرصه، رانندگی خارج از جاده و معدن‌کاوی اشاره شده است که تنش‌های فشاری و برشی بر سطح اعمال می‌کنند. آن‌چه بر آن تأکید شده است در نتیجهٔ شکست سله و آشفتگی سطح مناطق بیابانی افزایش فرسایش‌پذیری خاک در مقابل باد و افزایش شدت بیابان‌زایی است (Webb and Strong, 2011; Webb et al., 2009; Belnap and Eldridge, 2001). زمانی‌که سله‌های فیزیکی کوچک می‌شوند برای تشکیل نیاز به رطوبت دارند (Fang et al.,

[1] Helmert Contrast
[2] Bonferroni

2007). اتصالات اولیه پس از خشک شدن بسیار شکننده هستند و به راحتی کوچک می‌شوند و برای این‌که سله به مقاومت اولیه برسد نیاز است که حداقل ضخامت حدود یک سانتی‌متری داشته باشد (Pi et al., 2020, 2021). اما در کاربری، مانند نهال‌کاری که تردد مداوم ماشین‌آلات سنگین جهت آبیاری و رسیدگی به عرصه وجود دارد سله‌ها به ضخامت مناسب نمی‌رسند؛ بنابراین، کم ترین استقامت را در مقابل تنش فشاری دارند و در کاربری کشاورزی نیز با تردد ماشین‌آلات، سله‌های تشکیل شده نیز ضخامت لازم را نداشته و شکننده هستند. درکانون‌های گردوغبار استان خوزستان ساکنین به‌منظور تثبیت مالکیت عرفی بر مراتع اقدام به شخم می‌کنند و گاهی حتی بدون کشت رها می‌شوند و این مسأله باعث شده است که اراضی در مقابل فرسایش بادی آسیب‌پذیری بیش‌تری داشته باشند. با توسعهٔ اقتصادی کشاورزی محور، اشتیاق روستاییان برای توسعهٔ اراضی کشت دیم افزایش یافته است و تغییر کاربری وسیعی به اراضی کشاورزی دیده می شود (Khoshnood Motlagh et al., 2021; Yasrebi et al., 2022) هم‌چنین عملیات بیولوژیک که برای احیاء و تثبیت کانون های گرد و غبار اجرا می‌شوند خود می‌توانند از عواملی باشند که باعث تخریب بیش‌تر و منبعی برای خیزش گردوغبار باشند.

جدول ۷ – مدل‌سازی تأثیر کاربری اراضی بر سختی سله و حذف اثر کوواریانس
Table 7- Modelling the effect of land use on crust strength by removing covariance

	میانگین اولیهٔ سختی سله	میانگین پس از حذف اثر بافت خاک	میانگین کوواریانس	B	Eta	خطای استاندارد	ضریب تبیین	معناداری	میانگین کلی
نهال‌کاری	3.07	2.94		2.16	0.36	0.42		0.000	
زمین بایر	4.86	4.83	3.16	3.25	0.70	0.33	0.86	0.000	3.77
کشاورزی	3.40	3.15		2.85	0.51	0.35		0.000	

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه سختی سله‌های سطحی سطح خاک در سه کاربری نهال‌کاری، کشاورزی و زمین بایر با استفاده از پنترومتر دستی اندازه‌گیری شد و با حذف اثر بافت خاک به‌عنوان کوواریانس تغییرات سختی سله با استفاده از مدل خطی عمومی مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که بین سختی‌های سله اندازه‌گیری شده در سه کاربری تفاوت معنادار وجود دارد و زمین بایر با ۷۰ درصد تأثیر جزئی بیش‌ترین واریانس را تبیین می‌کند. بر این اساس می‌توان گفت سله‌های سطح خاک می‌توانند یک پتانسیل حفاظتی بسیار مؤثر در مقابل فرسایش بادی باشند. همواره نیاز نیست که با استفاده از روش‌های پرهزینه با ریسک بالا برای تثبیت مناطق بیابانی و جلوگیری از خیزش گردوغبار اقدام نمود. پیش از این تمرکز تنها بر نقش مثبت سله‌های زیستی بوده است درصورتی‌که این مطالعه به‌خوبی تأثیر مثبت سله‌های فیزیکی را در حفاظت خاک بیان می‌کند. پیشنهاد می‌شود مطالعات وسیعی در کانون‌ها اجرا شوند و سختی و ضخامت سله در سطح خاک بررسی شده و در گام بعدی با استفاده از تونل باد قابل حمل مقاومت آن‌ها به فرسایش بادی اندازه‌گیری شود. سپس در مناطقی که سله‌ها دارای مقاومت مناسبی هستند قرق و حفاظت از آن‌ها را در اولویت اول قرار داد.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر حاصل نتایج طرح تحقیقاتی مستقل با کد ۲۴۶۰۹۰۶۴۹۹۱۱۶۲ و حمایت مالی مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور است و بی‌شک بدون همکاری مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان اجرا نمی‌شد.

منابع

داوری دولت آبادی، عاطفه، قاضی فرد، اکبر، شیرانی، کوروش، و حیدری مورچه خورتی، فرزاد (۱۳۹۹). بررسی کاربردهای شورابه‌های دشت سگزی در کنترل فرسایش بادی. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۲(۲)، ۴۹۲-۵۰۴. doi:10.22092/ijwmse.2019.122154.1496

سیرجانی، الهام، ثامنی، عبدالمجید، موسوی، سید علی اکبر، و محمودآبادی، مجید (۱۳۹۶). ارتباط برخی ویژگی‌های خاک‌های استان فارس با شدت فرسایش بادی با استفاده از تونل باد صحرایی. پانزدهمین کنگره علوم خاک، اصفهان.

عنانانی، مائده، امیریان چکان، علیرضا، فرجی، محمد، یوسفی خانقاه، شهرام، و تقی‌زاده مهرجردی، روح‌الله (۱۳۹۶). استفاده از شاخص‌های فرسایش‌پذیری و سله سطحی در بررسی حساسیت خاک به فرسایش بادی. پانزدهمین کنگره علوم خاک ایران.

کلانتری، خلیل (۱۳۸۲). پردازش و تحلیل داده‌ها در تحقیقات اجتماعی– اقتصادی با استفاده از نرم‌افزار SPSS. نشر شریف، ۳۸۸ صفحه.

References

Belnap, J. (2003). The world at your feet: Desert biological soil crusts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(4), 181-189. doi:10.2307/3868062

Belnap, J., & Eldridge, D. (2001). Disturbance and recovery of biological soil crusts. In: *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*, Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-56475-8_27

Belnap, J., & Gillette, D.A. (1997). Disturbance of biological soil crusts: impacts on potential wind erodibility of sandy desert soils in southeastern Utah. *Land Degradation & Development*, 8(4), 355-362. doi:10.1002/(SICI)1099-145X(199712)8:4<355::AID-LDR266>3.0.CO;2-H

Belnap, J., & Gillette, D.A. (1998). Vulnerability of desert biological soil crusts to wind erosion: the influences of crust development, soil texture, and disturbance. *Journal of Arid Environments*, 39(2), 133-142. doi:10.1006/jare.1998.0388

Chepil, W.S. (1955). Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: 111. calcium carbonate and decomposed organic matter. *Soil Science*, 77(6), 4473-480.

Davari Dolat Abadi, A., GHaazi Fard, A., Shirani, K., & Heydari, F. (2020). Investigation the application of saline waters in Segzi Plain with emphasis on the wind erosion control. *Watershed Engineering and* Management, 12(2), 492-504. doi:10.22092/ijwmse.2019.122154.1496 [In Persian]

Eldridge, D.J., & Leys, J.F. (2003). Exploring some relationships between biological soil crusts, soil aggregation and wind erosion. *Journal of Arid Environments*, 53(4), 457-466. doi:10.1006/jare.2002.1068

Enanani, M., Amirian Chakan, A.R., Faraji, M., & Yosefi Khaneghah, Sh. (2017). Using erosivity indices and surface crusts in soil sensitivity to wind erosion. 15th National Soil Congress, Isfahan, Iran. [In Persian]

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

Gillette, D.A., Adams, J., Muhs, D., & Kihl, R. (1982). Threshold friction velocities and rupture moduli for crusted desert soils for the input of soil particles into the air. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 87(11), 9003-9016. doi:10.1029/JC087iC11p09003

Grünberger, O., Macaigne, P., Michelot, J.L., Hartmann, C., & Sukchan, S. (2008). Salt crust development in paddy fields owing to soil evaporation and drainage: Contribution of chloride and deuterium profile analysis. *Journal of Hydrology*, 348(1-2), 110-123. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.09.039

Hagen, L., Skidmore, E., & Saleh, A. (1992). Wind erosion: Prediction of aggregate abrasion coefficients. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers*, 35(6), 1847-1850. doi:10.13031/2013.28805

Houser, C.A., & Nickling, W.G. (2001). The factors influencing the abrasion efficiency of saltating grains on a clay-crusted playa. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(5), 491-505. doi:10.1002/esp.193

Kalantari Kh. (2003). *Data processing and analysis in socio-economic research*. Sharif Publication, 388 pages.

Keesstra, S., Nunes, J., Novara, A., Finger, D., Avelar, D., Kalantari, Z., & Cerdà, A. (2018). The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 610-611, 997-1009. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.08.077

Kéry, M., & Royle, J.A. (2016). linear models, generalized linear models (glms), and random effects models: The components of hierarchical models. In: KÉRY, M., & ROYLE, J.A. (eds.), *Applied Hierarchical Modeling in Ecology*, Boston, Academic Press.

Khoshnood Motlagh, S., Sadoddin, A., Haghnegahdar, A., Razavi, S., Salmanmahiny, A., & Ghorbani, K. (2021). Analysis and prediction of land cover changes using the land change modeler (LCM) in a semiarid river basin, Iran. *Land Degradation & Development*, 32(10), 3092-3105. doi:10.1002/ldr.3969

Klose, M., Gill, T.E., Etyemezian, V., Nikolich, G., Ghodsi Zadeh, Z., Webb, N.P., & Van Pelt, R.S. (2019). Dust emission from crusted surfaces: Insights from field measurements and modelling. *Aeolian Research*, 40, 1-14. doi:10.1016/j.aeolia.2019.05.001

Leys, J.F., & Eldridge, D.J. (1998). Influence of cryptogamic crust disturbance to wind erosion on sand and loam rangeland soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(11), 963-974. doi:10.1002/(SICI)1096-9837(1998110)23:11<963::AID-ESP914>3.0.CO;2-X

Li, S., Li, C., & Fu, X. (2021). Characteristics of soil salt crust formed by mixing calcium chloride with sodium sulfate and the possibility of inhibiting wind-sand flow. *Scientific Reports*, 11(1), 9746. doi:10.1038/s41598-021-89151-1

Mousavi, F., Abdi, E., Ghalandarayeshi, S., & Page-Dumroese, D.S. (2021). Modeling unconfined compressive strength of fine-grained soils: Application of pocket penetrometer for

predicting soil strength. *CATENA*, 196, 104890. doi:10.1016/j.catena.2020.104890

Pi, H., Huggins, D.R., & Sharratt, B. (2020). Influence of clay amendment on soil physical properties and threshold friction velocity within a disturbed crust cover in the inland pacific northwest. *Soil and Tillage Research*, 202, 104659. doi:10.1016/j.still.2020.104659

Pi, H., & Sharratt, B. (2019). Threshold friction velocity influenced by the crust cover of soils in the columbia plateau. *Soil Science Society of America Journal*, 83(1), 232-241. doi:10.2136/sssaj2018.06.0230

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

Rice, M.A., & Mcewan, I.K. (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(7), 721-733. doi:10.1002/esp.217

Rice, M.A., Mcewan, I.K., & Mullins, C.E. (1999). A conceptual model of wind erosion of soil surfaces by saltating particles. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(5), 383-392. doi:10.1002/(SICI)1096-9837(199905)24:5<383::AID-ESP995>3.0.CO;2-K

Rice, M.A., Willetts, B.B., & Mcewan, I.K. (1996). Wind erosion of crusted soil sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21(3), 279-293. doi:10.1002/(SICI)1096-9837(199603)21:3<279::AID-ESP633>3.0.CO;2-A

Rolston, D.E., Bedaiwy, M.N.A., & Louie, D.T. (1991). Micropenetrometer for in situ measurement of soil surface strength. *Soil Science Society of America Journal*, 55(2), 481. doi:10.2136/sssaj1991.03615995005500020031x

Sirjani, E., Sameni, A.M., Mousavi, S.A.A., & Mahmoudabadi, M. (2017). Relationship between soil features and wind erosion in Fars Province. 15th Natinal soil Congress, Isfahan Iran, Pp. 1-6. [In Persian]

Stovall, M.S., Ganguli, A.C., Schallner, J.W., Faist, A. M., Yu, Q., & Pietrasiak, N. (2022). Can biological soil crusts be prominent landscape components in rangelands? A case study from new mexico, USA. *Geoderma*, 410, 115658. doi:10.1016/j.geoderma.2021.115658

Thomas, A.D., & Dougill, A.J. (2007). Spatial and temporal distribution of cyanobacterial soil crusts in the Kalahari: Implications for soil surface properties. *Geomorphology*, 85(1-2), 17-29. doi:10.1016/j.geomorph.2006.03.029

Webb, N.P., Mcgowan, H.A., Phinn, S.R., Leys, J.F., & Mctainsh, G.H. (2009). A model to predict land susceptibility to wind erosion in western queensland, australia. *Environmental Modelling & Software*, 24(2), 214-227. doi:10.1016/j.envsoft.2008.06.006

Webb, N.P., & Strong, C.L. (2011). Soil erodibility dynamics and its representation for wind erosion and dust emission models. *Aeolian Research*, 3(2), 165-179. doi:10.1016/j.aeolia.2011.03.002

Yan, Y., Wu, L., Xin, X., Wang, X., & Yang, G. (2015). How rain-formed soil crust affects wind erosion in a semi-arid steppe in northern china. *Geoderma*, 249-250, 79-86. doi:10.1016/j.geoderma.2015.03.011

Yasrebi, B., Abbasi, H., Behnamfar, K., & Dinarvand, M. (2022). Land use/ land cover dynamic modeling using RS and GIS with emphasis on maximum likelihood rule and transition matrix. *ECOPERSIA*, 10(3), 191-202.

Zhang, Y.M., Wang, H.L., Wang, X.Q., Yang, W.K., & Zhang, D.Y. (2006). The microstructure of microbiotic crust and its influence on wind erosion for a sandy soil surface in the gurbantunggut desert of northwestern china. *Geoderma*, 132(3), 441-449. doi:10.1016/j.geoderma.2005.06.008

Zobeck, T.M. (1991). Abrasion of crusted soils: influence of abrader flux and soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 55(4), 1091-1097. doi:10.2136/sssaj1991.03615995005500040033x