

The Dry and Wet Aggregates Stability Indices of Soils Covered by Lichen Dominated Biocrusts

LEILA KASHI ZENOUI¹, SAYED HASAN KABOLI^{1*}, KAZEM KHAVAZI², MOHAMMAD SOHRABI³, MOHAMMAD KHOSROSHAHI⁴

1. Department of Arid Land Management, Faculty of Desert Studies, University of Semnan, Semnan, Iran.

2. Department of Soil Biology, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

3. Industrial Biotechnology and Environment Group, Iranian Research Organization for Science and Technology, Tehran, Iran.

4. Desert Research Division, Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

(Received: Oct. 14, 2020- Revised: May. 22, 2021- Accepted: May. 29, 2021)

ABSTRACT

Biological soil crusts play an important role to improve soil structure, aggregate formation and soil stability by increasing organic carbon. Aggregate stability determines its resistance to soil erosive agents. In this study, due to the severity of soil erosion of Sejzi plain of Isfahan province, the role of biological crusts as a soil erosion controller has been investigated in terms of stabilizing dry and wet aggregates. For this purpose, sampling was done from lichen dominated areas, both from the soil covered with biocrust also the soil without biological crusts. Soil physicochemical properties including pH, EC, Sodium Adsorption Ratio, bulk density, soil saturation percentage, soil texture, OC%, soil particles with $d < 0.84$ mm, MWD and WESS indexes were measured. Classification of soil parameters affected by biocrust and without biocrust was performed by PCA method. After determining the role of biocrusts in increasing aggregate stability in the soil covered by biocrusts, in two cases (wet and dry), the effect of each soil parameters on increasing aggregate stability was investigated based on multivariate linear regression model using stepwise method. The results of stepwise modeling showed that the dry aggregate stability depends on five influential factors including pH, OC%, clay%, sand% and MWD, with R square value of 0.68. Also, the regression model for wet aggregate stability was established using three effective factors including pH, $d < 0.84$ mm and TNV%, and R square was estimated 0.667. Aggregate stability in both cases, dry and wet conditions, are affected by each other and it is depended on the amount of OC%.

Keywords: Dry Aggregate, Sejzi, Soil Organic Carbon, Wet Aggregate.

* Corresponding author's Email: hkaboli@semnan.ac.ir

شاخص‌های پایداری خاکدانه تر و خشک در خاک‌های زیر پوشش پوسته‌های زیستی با غالبیت گل‌سنگ

لیلا کاشی زنوزی^۱، سیدحسن کابلی^{۱*}، کاظم خاوازی^۲، محمد سهرابی^۳، محمد خسروشاهی^۴

۱. گروه مدیریت مناطق خشک، دانشکده کویرشناسی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۲. بخش تحقیقات بیولوژی خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۳. گروه زیست فناوری صنعتی و محیط زیست، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.

۴. بخش تحقیقات بیابان، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۷/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۰۱ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۰۳/۰۸)

چکیده

پوسته‌های زیستی با افزایش کربن آلی نقش مهمی در بهبود ساختمان خاک، تشکیل و پایداری خاکدانه دارند. پایداری خاکدانه تعیین کننده میزان مقاومت آن در برابر عوامل فرساینده خاک است. در این تحقیق، با توجه به شدت فرسایش خاک در دشت سجزی اصفهان، نقش پوسته‌های زیستی به عنوان کنترل کننده فرسایش خاک، در پایداری خاکدانه خشک و تر بررسی شده است. بدین منظور نمونه برداری از خاک زیر پوشش پوسته‌های زیستی با غالبیت گل‌سنگ و همچنین خاک نقاط فاقد پوسته‌های زیستی انجام یافت. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شامل اسیدیته، هدایت الکتریکی، سدیم قابل جذب، وزن مخصوص ظاهری، درصد اشباع خاک، بافت خاک، درصد کربن آلی، درصد ذرات خاک با قطر کمتر از ۰/۸۴ میلی‌متر، میانگین وزنی قطر ذرات خاک و شاخص پایداری خاک در فرسایش بادی اندازه‌گیری شدند. طبقه‌بندی پارامترهای خاک‌های با تاثیر پوسته‌های زیستی و بدون اثر پوسته‌های زیستی به روش PCA انجام گرفت. پس از تعیین نقش پوسته‌های زیستی در افزایش پایداری خاکدانه تر و خشک، اثر هر یک از پارامترهای خاک در افزایش پایداری خاکدانه در خاک‌های زیر پوشش پوسته‌های زیستی بر اساس مدل رگرسیون چند متغیره خطی به روش گام به گام بررسی شدند. نتایج مدل‌سازی به روش گام به گام برای پایداری خاکدانه خشک با ۵ عامل تاثیرگذار شامل اسیدیته، درصد کربن آلی، درصد رس، درصد ماسه و MWD^۲ با میزان R square برابر با ۰/۶۸ تایید شد و مقدار R square برای مدل‌سازی پایداری خاکدانه تر با پارامترهای اسیدیته، $d < 0.084$ و درصد آهک خاک، ۰/۶۶۷ محاسبه شد. پایداری خاکدانه در هر دو حالت خشک و تر متاثر از یکدیگر بوده و وابسته به میزان ماده آلی خاک است.

واژه‌های کلیدی: خاکدانه تر، خاکدانه خشک، کربن آلی خاک، سجزی.

مقدمه

(Lal & Shukla, 2004): ۱- ارزیابی پایداری خاکدانه بر اساس

کدورت سنجی و سهولت پخشیدگی خاکدانه (Emerson, 1967)

۲- میزان شکسته شدن خاکدانه در اثر برخورد با انرژی قطرات

آب (Bruce-Okine & Lal, 1975) ۳- توزیع اندازه ذرات خاکدانه

الک استاندارد با غوطه‌وری خاک در آب (Yoder, 1936). شاخص

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در هر دو روش الک خشک

و الک تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص‌ها تنها برای

ارزیابی پایداری خاکدانه در نمونه‌های خاکدانه با اندازه یکسان

(معمولا کمتر از ۴/۷۵ میلی‌متر) انجام می‌شود. بنابراین استفاده

از این شاخص‌ها در نمونه‌های خاکدانه با توزیع اندازه مختلف

ممکن است سبب برخی از خطاها در ارزیابی حساسیت خاک به

فرسایش شود (Vaezi et al., 2018). البته امروزه روش‌های نوین

پایداری خاکدانه، توانایی خاک در حفظ ساختمان خاک و

نگهداری ترتیب فاز جامد و فضای خلل و فرج آن تحت اثر

نیروهای تخریبی و تنش‌های مکانیکی است (Diaz-Zorita, 2002; Mugnai et al., 2020).

تاکنون یک روش کاملا رضایت

بخش و جامع برای تعیین کیفیت فیزیکی خاک ارائه نشده است

و پایداری خاکدانه بعنوان شاخصی قابل قبول برای کیفیت

فیزیکی خاک قلمداد می‌شود (Saadat et al., 2019). روش‌های

مختلفی که برای اندازه‌گیری پایداری خاک وجود دارند براساس

میزان خردشدگی خاکدانه در اثر تنش‌های مکانیکی پایه‌گذاری

شده‌اند (Amezketta, 1999) و در سه گروه طبقه‌بندی شده‌اند

* نویسنده مسئول: hkaboli@semnan.ac.ir

1 Principal component analysis

2 Mean weight diameter

پوسته‌های زیستی خاک با افزایش نفوذپذیری، کاهش وزن مخصوص ظاهری و شور و سدیمی بودن خاک به ویژه در عمق صفر تا ده سانتی‌متری از سطح خاک، سبب اصلاح و حفاظت خاک در برابر عوامل فرساینده و افزایش مقاومت خاکدانه می‌شوند (Kakeh et al., 2020).

هدف از این تحقیق بررسی شاخص‌های پایداری خاکدانه در دو حالت خشک و تر به منظور تعیین اثر پوسته‌های زیستی در افزایش پایداری خاک می‌باشد. با توجه به روش اندازه‌گیری و با در نظر داشتن عوامل موثر در پایداری خاکدانه، تیمارهای متناسب با فرسایش آبی و بادی به طور جداگانه‌ای بر روی خاکدانه اعمال شده و پس از محاسبه پایداری خاکدانه، میزان تاثیر عوامل تاثیرگذار در پایداری خاکدانه در هر دو حالت خشک و تر مدلسازی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه بخشی از بیابان سجزی (بیابان‌های مرکزی ایران) است که در استان اصفهان واقع شده است. محدوده مورد مطالعه با مساحت ۱۹۹/۵ هکتار بین طول‌های شرقی $51^{\circ}52'32''$ تا $52^{\circ}27'41''$ و عرض‌های شمالی $32^{\circ}33'31''$ تا $32^{\circ}55'01''$ گسترده شده است (شکل ۱). شیب متوسط دشت سگری $1/0.8$ درصد و ارتفاع متوسط آن 1680 متر است. بر اساس آمار ایستگاه هواشناسی شرق اصفهان (ایستگاه شهید بهشتی) متوسط بارش سالیانه منطقه 106 میلی‌متر است. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم منطقه از نوع خشک و براساس طبقه‌بندی آمبرژه از نوع خشک سرد است. تیپ رویشی غالب منطقه *Artemisia Salsola* و *sieberi-Noaea mucronata-Scariola orientalis* و *Alhagi persarum-Tamarix tomentosa-Artemisia sieberi* و *Anabasis haussknechtii* sp. است.

نمونه‌برداری

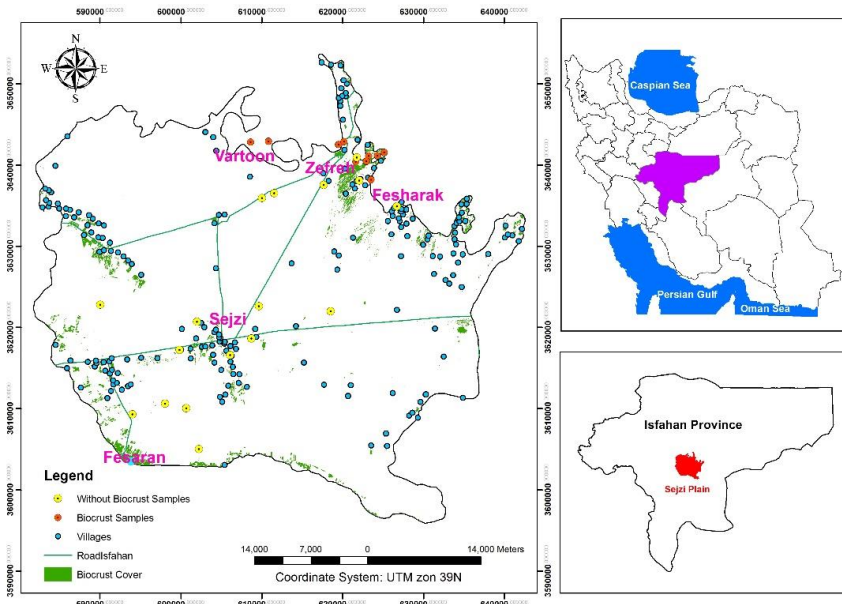
با توجه به شروع بارش باران از اواخر مهرماه در دشت سگری که همزمان با افزایش رطوبت خاک فعالیت پوسته‌های زیستی نیز آغاز می‌شود، اواسط آذرماه برای فصل نمونه‌برداری انتخاب شد. نمونه‌برداری از خاک زیر پوشش پوسته‌های زیستی با غالبیت گل‌سنگ انجام یافت و از نقاط با پراکنش جلبک (به ویژه در اطراف زمین‌های کشاورزی و داخل نهرهای آب یا نواحی کوچک و پراکنده با حالت ماندابی که جلبک‌ها در آنها رشد کرده بودند) صرف نظر شد. نمونه‌برداری در هر یک از نقاط از عمق صفر تا 15 سانتی‌متری خاک صورت گرفت. ضخامت پوسته‌های زیستی

و توسعه یافته و با استفاده از دستگاه‌های پیشرفته لیزری و امواج صوتی (Rawlins et al., 2013) نیز برای ارزیابی پایداری خاکدانه به کار گرفته می‌شوند.

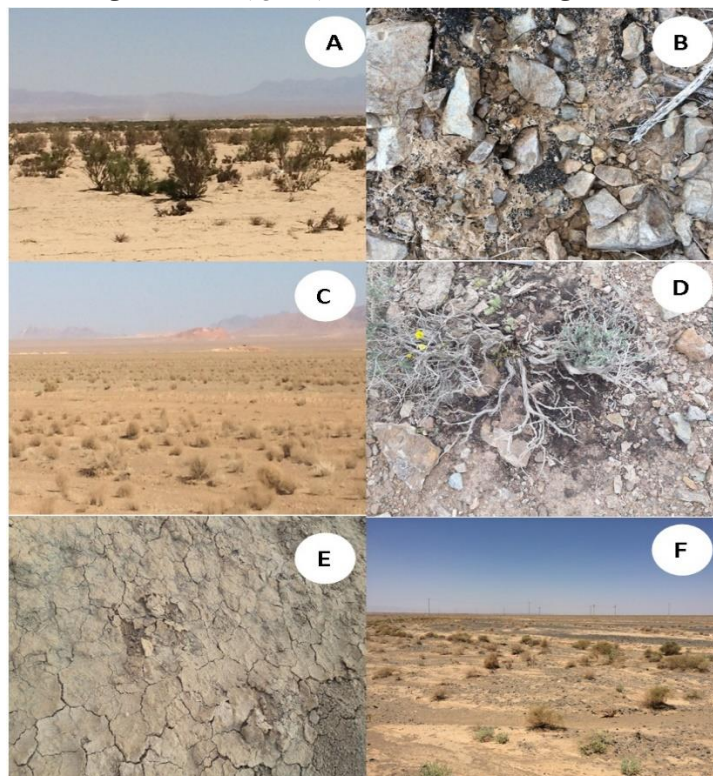
پایداری خاکدانه فقط متاثر از تنش‌های مکانیکی محیط خاکدانه نمی‌باشد و برخی خصوصیات خاک و عناصر موجود در آن بر مقاومت خاکدانه تاثیر دارند (Nikpour, 2011). همچنین بر طبق نظر کارکنان حفاظت منابع طبیعی (NRCS, 1996) پایداری خاکدانه‌ها به عواملی مانند بافت خاک، نوع رس، کاتیون‌ها، مقدار و نوع مواد آلی و همچنین نوع و اندازه جمعیت میکروبی خاک وابسته است. پوسته‌های زیستی از جمله عوامل بیولوژیکی خاک است که سبب تغییر در اندازه توزیع ذرات خاک‌ها می‌شوند (Kakeh & Gorji, 2014). این موضوع در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک اهمیت بسزایی دارد و حتی سبب تغییرات بافت خاک از شنی به لومی شده است (Wu et al., 2020). در بین پوسته‌های زیستی خاک، ابتدا قارچ‌ها و سپس اکتینومیست‌ها بیشترین تاثیر را در پایداری خاکدانه دارند (Duchicela et al., 2013). رشته‌های هیف بخش قارچی در بخش زیرین گل‌سنگ باعث اتصال ذرات خاک به یکدیگر و تشکیل خاکدانه‌های پایدار می‌شوند. (Belnap & Harper, 1995; Eldridge & Greene, 2020; Yang et al., 2020; Miralles et al., 1994). هر دو گروه قارچ‌ها و اکتینومیست‌ها، باعث اتصال مکانیکی محکم بین ذرات یک خاکدانه می‌شوند. بعضی باکتری‌های تولید کننده صمغ نیز اثری مشابه قارچ‌ها در خاک دارند. البته خاصیت استحکام دهنده قارچ‌ها و اکتینومیست‌ها در خاک موقتی است و با تجزیه رشته‌های به جا مانده به وسیله باکتری‌ها اثر آن از بین می‌رود (Duchicela et al., 2013). از طرفی پایداری خاکدانه تحت تاثیر جرم اندازه خاکدانه قرار دارد و هر چه بزرگتر باشد انرژی بیشتری برای متلاشی شدن خاکدانه مورد نیاز است (Mohmoodabadi, 2011). پوسته‌های زیستی با افزایش ماده آلی سبب افزایش چسبندگی ذرات و تشکیل خاکدانه‌های درشت‌تر، پایدارتر و مقاوم به فرسایش می‌شوند (Kavdir et al., 2004; Eldridge & Greene, 1994; Roncero-Ramos et al., 2020). چگونگی پایداری خاکدانه‌ها با مواد آلی نه تنها به مقدار و نوع (ماهیت شیمیایی) مواد آلی بستگی دارد، بلکه به آرایش و نحوه پیوندهای آن با اجزاء معدنی خاک وابسته است. به طور کلی، مهمترین اثر پوسته‌های زیستی در پایداری خاکدانه از طریق تولید مواد موکوس به ویژه پلی‌ساکاریدها است. پلی‌ساکاریدها حدود 5 تا 20 درصد از کل ماده آلی خاک را تشکیل می‌دهند که قابلیت استخراج از خاک را دارند، لیکن استخراج پلی‌ساکاریدها از خاک باعث کاهش ثبات خاکدانه‌ها می‌شود (Martin, 1971). همچنین

شد. به همین ترتیب از نقاط فاقد پوشش پوسته‌های زیستی نمونه‌برداری انجام یافت و مجموعاً ۴۰ نمونه خاک (۲۰ نمونه از خاک زیر پوشش پوسته‌های زیستی و ۲۰ نمونه از خاک فاقد پوشش پوسته‌های زیستی) تهیه و به آزمایشگاه منتقل شدند (شکل ۲).

بسته به نوع گونه‌ها از یک تا ۳ میلی‌متر متفاوت بود. به دلیل یکسان بودن گونه‌های پوسته‌های زیستی، تا شعاع تقریباً ۳۰ متری هر یک از نقاط، در هر نقطه سه نمونه خاک از هر کدام به میزان حدوداً یک کیلوگرم برداشت شدند و پس از مخلوط کردن هر سه نمونه، یک نمونه خاک همگن به میزان یک کیلوگرم تهیه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه به همراه پراکنش پوسته‌های زیستی و نقاط نمونه‌برداری



شکل ۲- نقاط A, C و E خاک فاقد پوسته‌های زیستی و نقاط B, D و F نقاط دارای پوشش پوسته‌های زیستی خاک دشت سگزی، استان اصفهان

الکتریکی (Rhoades, 1982)، سدیم، وزن مخصوص ظاهری (Evelt *et al.*, 2016)، درصد رطوبت اشباع (Zolfaghari *et al.*, 2016)، هدایت

اندازه‌گیری خصوصیات خاک و پایداری خاکدانه (McLean, 1982)، هدایت

پایداری خاکدانه و همچنین حذف عامل‌های دارای تاثیر منفی در پایداری خشک و تر خاکدانه، مدل آماری رگرسیون چند متغیره خطی با روش گام به گام (Step wise) در سطح اعتماد ۹۵ درصد ($P < 0.05$) به کار گرفته شد.

نتایج

خصوصیات خاک با حضور و عدم حضور پوسته‌های زیستی

به منظور بررسی اثر احتمالی سایر پارامترهای خاک در پایداری خاکدانه، خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک‌های زیر پوشش پوسته‌های زیستی و بدون پوسته‌های زیستی، با یکدیگر مقایسه شدند. همانطور که از اطلاعات جدول (۱) برمی‌آید بیشترین تفاوت‌ها مربوط به هدایت الکتریکی و متعاقب آن سدیم قابل جذب، سدیم تبادلی خاک و نسبت جذب سدیم است. کمترین میزان تفاوت‌ها در مقادیر درصد کربنات کلسیم مشاهده شد. نکته قابل توجه در مقایسه میانگین مقادیر MWD با WESS، در خاک‌های بدون پوشش پوسته‌های زیستی و خاک زیر پوشش پوسته‌های زیستی، مشاهده اختلاف حدود ۱۰ برابری در مقادیر WESS است. در حالیکه، این اختلاف در مورد مقادیر MWD در دو حالت، کمتر از دو برابر است. بعبارتی خاکدانه‌های خشک در داخل تیوپ‌های سانتریفیوژ در اثر برخورد با یکدیگر متلاشی شده و در اثر ساییدگی ریزتر شده‌اند و نسبت به تیمار غوطه‌ور شدن در آب مقاومت کمتری داشته‌اند. در حقیقت پایداری خشک خاکدانه کمتر از پایداری تر است. همچنین با توجه به درصد بالای مقادیر سیلت در خاک‌های نقاط فاقد پوسته‌های زیستی و از طرفی درصد بالای رس در خاک‌های زیر پوشش پوسته‌های زیستی، میانگین پارامتر $d < 0.075$ در هر دو طبقه نمونه خاک تقریباً مساوی شده است لیکن دامنه آن در خاک زیر پوشش پوسته‌های زیستی زیاد است. مقادیر ماده آلی، هدایت الکتریکی و اسیدیته خاک، در خاک‌های زیر پوشش پوسته‌های زیستی به طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از خاک‌های فاقد پوشش بیوکراست است در حالیکه مقادیر آهک در خاک‌های فاقد پوشش پوسته‌های زیستی بالاتر است. خاک‌های فاقد بیوکراست وزن مخصوص ظاهری بیشتری از خاک‌های بدون بیوکراست داشته و در نتیجه بافتی سبک‌تر دارند بنابراین تخلخل کل در آنها کمتر بوده و درصد اشباع خاک نیز کمتر است.

(2006)، منیزیم و کلسیم تبادلی (Rhoades, 1982)، بافت خاک (Folk & Ward, 1957)، درصد آهک (Clarck, 2013)، درصد کربن آلی (Walkley & Block, 1934) و MWD (Kemper & Rosenau, 1986) اندازه‌گیری شدند. منحنی دانه‌بندی ذرات خاک خشک طبق استاندارد ASTM C136 ترسیم و درصد وزنی ذرات زیر 0.075 میلی‌متر، بعنوان شاخص فرسایش پذیری بادی خاک (Zobeck & Scott, 2014) محاسبه شد. شاخص پایداری خاکدانه در فرسایش بادی (WESS: Wind Erosion Soil Stability) محاسبه گردید. بدین منظور 50 گرم نمونه خاک از سری الک‌های استاندارد عبور داده و ذرات خاک در محدوده ماسه متوسط در اندازه‌های $0.075 - 0.15$ میلی‌متر و ماسه ریز در اندازه‌های $0.105 - 0.075$ میلی‌متر جدا و در تیوپ‌های سانتریفیوژ ریخته شد. پس از بستن درب تیوپ‌ها، چند بار به صورت دستی هم زده شد تا مخلوط به صورت کاملاً یکنواخت و همگن درآید. سپس در دستگاه سانتریفیوژ 5000 دور در دقیقه به مدت 5 دقیقه سانتریفیوژ شد. با این روش ذرات ماسه ریز با ماسه درشت بمباران شده و در اثر نیروی اصطکاک و با سرعت زیاد، ساییده شده و ریزتر شدند. میزان مقاومت خاکدانه‌ها در اثر برخورد ذرات با سرعت زیاد مورد سنجش قرار گرفت. سپس خاک موجود در تیوپ‌های سانتریفیوژ مجدداً به همان مقدار اولیه اضافه و مجدداً برای 50 گرم خاک با روش Folk and Ward (1982) بافت خاک تعیین و درصد سیلت و رس نمونه محاسبه شدند. طبق فرمول ذیل بر اساس اختلاف مقادیر سیلت و رس مقدار پایداری خاکدانه به روش خشک محاسبه شد.

$$WESS = \left| \frac{(A - B)}{(A + B)} \right| + \left| \frac{(C - D)}{(C + D)} \right|$$

A: درصد سیلت نمونه قبل از سانتریفیوژ

B: درصد رس نمونه قبل از سانتریفیوژ

C: درصد سیلت نمونه بعد از سانتریفیوژ

D: درصد رس نمونه بعد از سانتریفیوژ

تحلیل آماری داده‌ها

برای مقایسه دو طبقه نمونه خاک (فاقد پوشش پوسته‌های زیستی و خاک زیر پوشش پوسته‌های زیستی) و رابطه خصوصیات خاک با یکدیگر در دو کلاس متفاوت، از آزمون آماری PCA^1 (Jolliffe, 2012) استفاده شد. برای مدلسازی عوامل تاثیرگذار در

جدول ۱- آمار توصیفی خصوصیات خاک در دو جامعه از منطقه مطالعاتی

خصوصیات خاک	خاک بدون پوشش پوسته‌های زیستی			خاک زیر پوشش پوسته‌های زیستی		
	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر	حداقل
pH	۸/۲	۸/۷	۸/۲	۸/۴	۸/۹	۷/۶
EC (dS/m)	۳۳/۸	۱۰۹/۳	۰/۶	۱/۲	۳	۰/۵
OC%	۰/۲۸	۰/۸۳	۰/۰۵	۰/۵۹	۰/۹۸	۰/۴۸
Absorbable Na (mg/kg)	۱۰۸	۱۵۷/۴	۵۰/۳	۶۷/۵	۹۵/۴	۳۹
Exchangeable Na (meq/lit)	۴۵۱	۱۶۲۵/۶	۹۷/۴	۱۱۰/۹۵	۳۸۵/۰۸	۲۰/۱۹
CaCO ₃ %	۲۲/۰۹	۴۵/۵	۵/۵	۱۶/۵۵	۳۲/۵	۳/۷۵
SAR (meq/lit) ^{0.5}	۳۹/۴	۱۷۵/۸	۰/۴	۲/۳	۹/۷	۰
sand%	۵۷/۴	۸۱/۱	۲۵/۷	۴۶/۲	۵۳/۷	۳۷/۷
silt%	۲۵/۸	۶۲	۲	۲۹/۹	۴۰	۲۰
clay%	۱۶/۸	۳۲/۳	۶/۳	۲۹/۹	۳۴/۳	۱۶/۳
MWD	۰/۸۷	۱/۳۲	۰/۵۱	۱/۱۹	۱/۳۳	۱/۰۲
d<0.84%	۶/۲۷	۷/۲۴	۵/۴۷	۶/۱۹	۸/۴۴	۲/۹۴
WESS	۰/۱۲۶	۰/۳۷۴	۰/۰۱۵	۰/۰۱۴	۰/۰۴۳	۰
Bulk Density (cm ³)	۱/۳	۱/۶	۱/۲	۱/۲	۱/۳	۱/۱
Saturation moisture rate%	۲۶/۹	۳۵/۳	۱۹/۱	۳۴/۴	۳۹/۸	۳۱/۴

آلی خاک، MWD، WESS، $d < 0.84$ ، درصد اشباع خاک، اسدیته و درصد ماسه خاک نشان داده‌اند و به طور کلی با خصوصیات فیزیکی خاک همبستگی قوی‌تری داشتند.

مدل‌سازی پارامترهای تاثیرگذار در پایداری خاکدانه خشک

پایداری خاکدانه خشک به عنوان عامل وابسته و سایر پارامترها به عنوان عامل مستقل وارد مدل شدند. بر اساس رگرسیون چند متغیره خطی و به صورت گام به گام مهمترین پارامترها برای مدلسازی انتخاب شدند. پارامترهایی که بیشترین و قوی‌ترین همبستگی‌ها را با پایداری خاکدانه خشک داشتند به شرط R square بالا در مدل مورد استفاده قرار گرفتند. مدل شماره ۵ با میزان R square برابر با ۰/۶۸ و با در نظر داشتن پارامترهای OC%، MWD، sand%، pH، clay%، EC به عنوان مناسب‌ترین مدل در خاک‌های دارای پوسته‌های زیستی انتخاب شد.

ضرایب مدل‌سازی به روش گام به گام تعیین شدند (جدول ۳). در مدل شماره ۵ که توسط مقدار R Square مورد تایید قرار گرفت به جز درصد ماسه که ضریب منفی داشت بقیه پارامترها ضرایب مثبت داشته و بیشترین ضرایب مربوط به میانگین وزنی قطر خاکدانه و اسیدیته خاک بود. طبق نتایج بدست آمده از مدلسازی گام به گام، پایداری خشک بستگی به پایداری تر خاکدانه دارد. به طوری که پایداری تر با ضریب ۰/۱۲۱ در مدل جایگاه دوم را به خود اختصاص داد. (رابطه ۱)

$$Y = 1.343 + 0.10\% + 0.007\text{Clay}\% + 0.158\text{pH} - 0.002\text{Sand}\% + 0.121\text{MWD} - 0.1\text{EC}$$

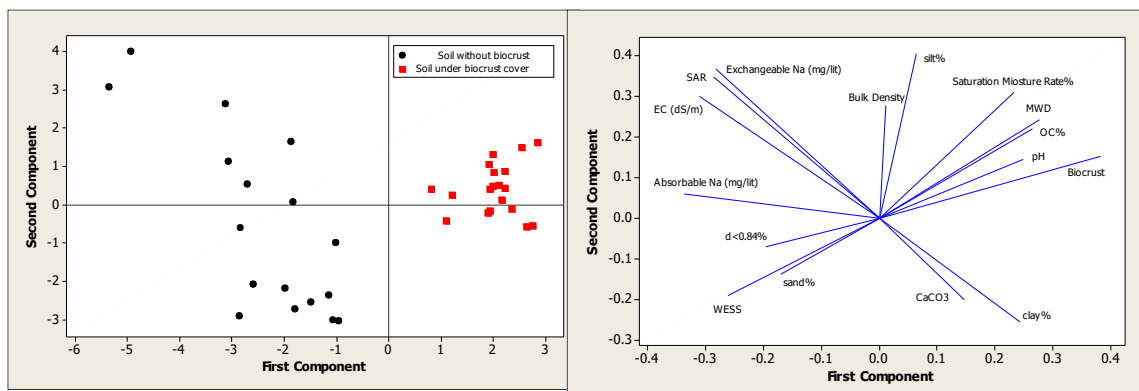
که در آن: Y-میزان پایداری خاکدانه خشک، OC%: درصد

طبقه‌بندی خصوصیات خاک تحت تاثیر پوسته‌های زیستی

پوسته‌های زیستی خاک بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک تاثیر بسزایی دارند (شکل ۳). طبق نتایج آزمون آماری تجربه مولفه‌های اصلی (PCA) پوسته‌های زیستی با خصوصیات فیزیکی خاک از جمله درصد اشباع خاک و میانگین وزنی قطر ذرات خاک (MWD) همبستگی مثبت داشته و با WESS، $d < 0.84$ ، درصد ماسه همبستگی منفی دارد. پوسته‌های زیستی باعث افزایش درصد اشباع خاک، میانگین وزنی قطر خاکدانه و کاهش درصد ذرات خاک با قطر کمتر از ۰/۸۴ و شاخص پایداری خشک خاکدانه (WESS) شده‌اند. بافت خاک نیز در خاک‌های دارای پوشش پوسته‌های زیستی، متفاوت بوده است. به طوری که درصد سیلت و رس همبستگی مثبت با پوسته‌های زیستی دارند لیکن مقدار همبستگی معنی‌دار نمی‌تواند باشد. در حالیکه درصد ماسه همبستگی منفی و معنی‌دار با پوسته‌های زیستی دارد و خاک‌های زیر پوشش پوسته‌های زیستی درصد ماسه کمتری دارند. وزن مخصوص ظاهری خاک نیز تحت تاثیر پوسته‌های زیستی خاک مقادیر متفاوت با خاک‌های بدون پوشش پوسته‌های زیستی داشتند لیکن این میزان تفاوت‌ها معنی‌دار نبود. در بین خصوصیات شیمیایی خاک، مقدار ماده آلی و اسیدیته خاک همبستگی مثبت با پوسته‌های زیستی دارند. لیکن SAR، EC و سدیم خاک (محلول و تبادل) همبستگی منفی و معنی‌دار با پوسته‌های زیستی دارند. حضور پوسته‌های زیستی باعث کاهش پارامترهای مذکور شده است. در حالیکه مقادیر آهک همبستگی معنی‌دار با پوسته‌های زیستی نداشتند. چنانکه از شکل (۳) برمی‌آید پوسته‌های زیستی بالاترین مقادیر همبستگی را با ماده

میانگین وزنی قطر خاکدانه می‌باشند.

کربن آلی خاک، Clay%: درصد رس خاک، pH: اسیدیته خاک، Sand%: درصد ماسه، EC: هدایت الکتریکی خاک و MWD:



۳- تجزیه رابطه خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک با پوسته‌های زیستی به مولفه‌های اصلی بر اساس روش PCA

جدول ۲- خلاصه مدل‌سازی پایداری خاکدانه خشک بر اساس رگرسیون چند متغیره خطی به روش گام به گام

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
۱	۰/۵۴۴ ^a	۰/۲۹۶	۰/۲۷۵	۰/۰۷۵۳۷۸
۲	۰/۶۶۲ ^b	۰/۴۳۹	۰/۴۰۵	۰/۰۶۸۳۰۷
۳	۰/۷۳۷ ^c	۰/۵۴۳	۰/۵	۰/۰۶۲۶۰۹
۴	۰/۷۹۶ ^d	۰/۶۳۳	۰/۵۸۶	۰/۰۵۶۹۵۹
۵	۰/۸۲۴ ^e	۰/۶۸۰	۰/۶۲۶	۰/۰۵۴۱۱۱

a. Predictors: (Constant), OC%

b. Predictors: (Constant), OC%, clay%

c. Predictors: (Constant), OC%, clay%, pH

d. Predictors: (Constant), OC%, clay%, pH, sand%

e. Predictors: (Constant), OC%, clay%, pH, sand%, MWD, EC

محاسبه شدند (جدول ۵). بیشترین ضریب مدل به ماده آلی خاک و کمترین ضریب به درصد ذرات خاک با قطر کمتر از ۰/۸۴ اختصاص یافته است. با افزایش درصد ذرات خاک با قطر کمتر از ۰/۸۴ میلیمتر میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD) کاهش یافته است. در حالیکه ماده آلی موجود در خاک سبب افزایش MWD شده است. مدل بسط یافته برای پایداری تر خاکدانه به شرح ذیل می‌باشد:

(رابطه ۲)

$$Y = -1.675 - 0.048(d < 0.84\%) + 0.384OC\% + 0.33pH + 0.007CaCO_3$$

که در این رابطه ۲:

Y-میزان پایداری خاکدانه تر، OC%: درصد کربن آلی خاک، d < 0.84%: درصد ذرات خاک با قطر کمتر از ۰/۸۴ میلی‌متر، pH: اسیدیته خاک، CaCO₃%: درصد آهک می‌باشند.

مدلسازی پارامترهای تاثیرگذار در پایداری خاکدانه تر

برای مدلسازی پایداری خاکدانه تر میانگین وزنی قطر خاکدانه که معمولاً به عنوان پارامتر پایداری خاکدانه تر به کار می‌رود، عامل وابسته و سایر ویژگی‌های خاک به صورت عوامل مستقل وارد مراحل مدلسازی رگرسیون چند متغیره خطی به روش گام به گام شدند. از بین چهار مدل پیش‌بینی شده، مدل چهارم با مقدار R Square برابر با ۰/۶۶۷ به عنوان مدل نهایی مورد تایید قرار گرفت (جدول ۴). طبق نتایج مدلسازی گام به گام مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در پایداری خاکدانه تر ۰/۸۴، d < ۰/۸۴، OC%، pH و آهک خاک بودند. میزان ذرات خاک با قطر کوچکتر از ۰/۸۴ (d < ۰/۸۴) و مقدار ماده آلی خاک از مهمترین عوامل اثرگذار در پایداری خاکدانه تر بودند.

ضرایب مدل‌سازی گام به گام رگرسیونی برای پایداری تر خاکدانه برای پارامترهای تایید کننده مدل شماره ۵ (جدول ۴)

جدول ۳- تعیین ضرایب مدلسازی پایداری خاکدانه خشک به روش گام به گام

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	T	Sig.	
	B	Std. Error	Beta			
۱	(Constant)	۰/۱۶۴	۰/۰۲۷		۶/۰۰۸	۰/۰
	OC%	۰/۲۱۷	۰/۰۵۷	۰/۵۴۴	۳/۷۹۹	۰/۰۰۱
۲	(Constant)	۰/۲۴۹	۰/۰۳۸		۶/۴۹۷	۰/۰
	OC%	۰/۱۸۱	۰/۰۵۴	۰/۴۵۳	۳/۳۷۳	۰/۰۰۲
	clay%	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۳۸۹	۲/۸۹۹	۰/۰۰۷
۳	(Constant)	۱/۰۸۴	۰/۳۱۲		۳/۴۷۹	۰/۰۰۱
	OC%	۰/۱۶۶	۰/۰۴۹	۰/۴۱۵	۳/۳۵۲	۰/۰۰۲
	clay%	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۴۹۲	۳/۸۲	۰/۰۰۱
	pH	۰/۰۹۸	۰/۰۳۶	۰/۳۳۸	۲/۶۹۸	۰/۰۱۱
۴	(Constant)	۰/۱	۰/۳۸۵		۳/۵۰۸	۰/۰۰۱
	OC%	۰/۱	۰/۰۵۱	۰/۲۵۱	۱/۹۷۷	۰/۰۰۷
	clay%	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	۰/۴۶۶	۳/۹۶۴	۰/۰
	pH	۰/۱۰۸	۰/۰۳۳	۰/۳۷۱	۳/۳۳۵	۰/۰۰۳
	sand%	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۳۴۸	۲/۷۶۸	۰/۰۰۹
۵	(Constant)	۱/۳۴۳	۰/۳۱۷		۴/۳۳۹	۰/۰
	OC%	۰/۰۵۴	۰/۰۵۴	۰/۳۷۵	۲/۷۸۶	۰/۰۰۹
	clay%	۰/۰۰۷	۰/۰۰۱	۰/۵۶۲	۴/۶۵۳	۰/۰
	pH	۰/۱۵۸	۰/۰۴۰	۰/۵۴۳	۳/۹۷۳	۰/۰
	sand%	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱	۰/۳۳۱	۲/۷۶۴	۰/۰۱
	MWD	۰/۱۲۱	۰/۰۵۸	۰/۳۱۱	۲/۰۸۵	۰/۰۴۶
EC	۰/۱۰	۰/۰۰۵	۰/۴۴۳	۲/۱۴۶	۰/۰۴۶	

a. Dependent Variable: WESS

جدول ۴- خلاصه مدل سازی پایداری خاکدانه تر بر اساس رگرسیون چند متغیره خطی به روش گام به گام

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
۱	۰/۵۳۹ ^a	۰/۲۹۱	۰/۲۷	۰/۱۹۴۱۹
۲	۰/۶۶۸ ^b	۰/۴۴۶	۰/۴۱۳	۰/۱۷۴۱۶
۳	۰/۷۶۴ ^c	۰/۵۸۴	۰/۵۴۵	۰/۱۵۳۳۶
۴	۰/۸۱۷ ^d	۰/۶۶۷	۰/۶۲۴	۰/۱۳۹۳۳

a. Predictors: (Constant), d<0.84%

b. Predictors: (Constant), d<0.84%, OC%

c. Predictors: (Constant), d<0.84%, OC%, pH

d. Predictors: (Constant), d<0.84%, OC%, pH, CaCO₃

جدول ۵- تعیین ضرایب مدلسازی پایداری خاکدانه تر به روش گام به گام

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	
	B	Std. Error	Beta			
۱	(Constant)	۱/۴۷۷	۰/۱۲۴		۱۱/۹۲۵	۰/۰
	d<0.84%	۰/۰۶۵	۰/۰۱۷	۰/۵۳۹	۳/۷۳۴	۰/۰۰۱
۲	(Constant)	۱/۲۵۹	۰/۱۳۲		۹/۵۳۷	۰/۰
	d<0.84%	۰/۰۵۹	۰/۰۱۶	۰/۴۸۴	۳/۷۰۴	۰/۰۰۱
۳	OC%	۰/۴۰۸	۰/۱۳۴	۰/۳۹۸	۳/۰۴۴	۰/۰۰۵
	(Constant)	۰/۱۷۱	۰/۷۵۷		۰/۵۴۷	۰/۱۳۲
	d<0.84%	۰/۰۴۸	۰/۰۱۴	۰/۳۹۷	۳/۳۵۶	۰/۰۰۲
۴	OC%	۰/۴۰۵	۰/۱۱۸	۰/۳۹۵	۳/۴۳۰	۰/۰۰۲
	pH	۰/۲۸۴	۰/۰۸۷	۰/۳۸۱	۳/۲۴۹	۰/۰۰۳
	(Constant)	۰/۶۷۵	۰/۷۱۱		۰/۳۵۶	۰/۰۲۵
	d<0.84%	۰/۰۴۸	۰/۰۱۳	۰/۳۹۳	۳/۶۶۲	۰/۰۰۱
۵	OC%	۰/۳۸۴	۰/۱۰۸	۰/۳۷۴	۳/۵۶۶	۰/۰۰۱
	pH	۰/۳۳	۰/۰۸۱	۰/۴۲۲	۴/۰۶۸	۰/۰
	CaCO ₃	۰/۰۰۷	۰/۰۰۲	۰/۲۹۶	۲/۷۸۸	۰/۰۰۹

a. Dependent Variable: MWD

بحث و نتیجه‌گیری

تاثیر پوسته‌های زیستی بر خصوصیات خاک

حضور یا عدم حضور پوسته‌های زیستی بر خصوصیات فیزیک‌وشیمیایی خاک تاثیر دارد (شکل ۳)؛ لیکن در نتایج تحقیقات محققان مختلف، تناقض زیادی مشاهده شد. برخی از محققان افزایش هدایت الکتریکی خاک (Miralles *et al.*, 2020)، درصد اشباع خاک (Kakeh & Gorji, 2014) و نفوذپذیری خاک (Kakeh & Gorji, 2014)، آهک (Miralles *et al.*, 2020) را در خاک گزارش کرده‌اند. در حالیکه یافته‌های برخی دیگر از محققان حاکی از کاهش هدایت الکتریکی (Hasanzadeh Bashtian *et al.*, 2018; Kakeh & Gorji, 2014)، سدیم قابل جذب (Kakeh & Gorji, 2014)، سدیم تبادلی، اسیدیته (Kakeh & Gorji, 2014) و درصد آهک خاک (Kakeh & Gorji, 2014) بوده است. همچنین تحقیقات انجام یافته در زمینه تاثیر پوسته‌های زیستی در کیفیت خاک بر افزایش کربن آلی، پایداری خاکدانه و تخلخل خاک تاکید داشته‌اند (Kakeh *et al.*, 2018). نتایج تحقیق نیز موید همان یافته‌هاست. نکته قابل توجه در نتایج تحقیق، تاثیر پوسته‌های زیستی در مقادیر MWD و WESS می‌باشد. از آنجا که تیمار به کار رفته در اندازه‌گیری MWD غوطه‌وری خاکدانه به روش دی‌لین‌هر و دی‌بوت در آب بوده است (De Leenheer & De Boedt, 1959) اغلب محققان در تحقیقات خود از آن بعنوان شاخص پایداری خاکدانه تر استفاده نموده‌اند (Armin *et al.*, 2016; Kelishadi *et al.*, 2018). بنابراین روشی مناسب برای استفاده در فرسایش آبی است. طبق یافته‌های (Kelishadi *et al.*, 2018) میزان فرسایش پاشمانی به طور عمده به توزیع اندازه ذرات و پایداری خاکدانه به روش الک تر به میزان ماده آلی خاک بستگی دارد و دلیل این امر را در مکانیسم‌های جداسازی ذرات دانسته‌اند. زیرا در فرسایش پاشمانی عامل جداکننده ذرات انرژی حاصل از برخورد قطرات باران بوده است لیکن در روش الک تر عامل اصلی جداسازی خاکدانه‌ها وارفتگی آنها در آب است. همچنین تعیین توزیع اندازه ذرات خاک به روش الک خشک، شاخصی برای ارزیابی حساسیت خاک به فرسایش بادی می‌باشد (Ekhtesasi & Azimzadeh, 2012). به منظور مقایسه اثر پوسته‌های زیستی بر خاکدانه‌سازی و توزیع ذرات خاک در حالت خشک و تر، هر سه شاخص MWD و $d < 0.075$ (درصد وزنی ذرات خاک با قطر کمتر از 0.075 میلی‌متر) و WESS (پایداری خاکدانه در فرسایش بادی) اندازه‌گیری شدند. لیکن همبستگی مثبت بین پوسته‌های زیستی و مقادیر MWD و همبستگی منفی بین مقادیر $d < 0.075$

و WESS (شکل ۳) نشان دادند که طبق نتایج تحقیق، پوسته‌های زیستی اثر مثبت بر افزایش پایداری خاکدانه تر و خشک داشته‌اند. عنصر سدیم سبب متلاشی شدن ساختمان خاک و خاکدانه می‌شود (Tajik Esmaeili, 2002) طبق یافته‌های تحقیق سدیم خاک همبستگی منفی با پوسته‌های زیستی، ماده آلی خاک، MWD و اسیدیته خاک داشته و بالعکس همبستگی مثبت با $d < 0.075$ و WESS (شکل ۳) نشان داده است و موید تاثیر پوسته‌های زیستی در افزایش ماده آلی و پایداری خاکدانه می‌باشد.

میانگین شاخص پایداری خاکدانه تر (MWD) در خاک‌های زیر پوشش پوسته‌های زیستی به میزان قابل توجهی ارتقاء یافته و مقدار آن از 0.087 میلی‌متر در خاک‌های بدون پوسته‌های زیستی به 0.119 میلی‌متر در خاک‌های زیر پوشش زیستی افزایش یافته است. همچنین میانگین شاخص پایداری خاکدانه خشک در خاک‌های بدون پوشش 0.126 و در خاک‌های زیر پوشش پوسته‌های زیستی 0.14 برآورد شد (جدول ۱). همچنین در مدلسازی انجام یافته شاخص‌های پایداری خاکدانه بیشترین برآزش را با ماده آلی داشته‌اند و در تمام مدل‌های پیش‌بینی شده ماده آلی از مهمترین عوامل موثر در شاخص‌های پایداری خاک بوده است (جدول ۲ و ۴). با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که دلیل اصلی این افزایش عمدتاً حضور مواد آلی بیشتر در خاک‌های پوشیده از پوسته‌های زیستی است. مواد آلی مترشحه از آنها موجب پیوند قوی‌تر بین ذرات خاک و ایجاد خاکدانه‌های پایدارتر شده است. پوسته‌های زیستی خاک مجموعه‌ای از گل‌سنگ‌ها، خزها، جلبک‌ها و سیانوباکتری‌های و ... هستند که هر کدام به روش‌های منحصر به فرد خود سبب افزایش پایداری خاکدانه می‌شوند. بعنوان مثال ترکیبات آلی پلی‌ساکاریدی مترشحه از سیانوباکتری‌ها همانند چسب موجب پیوند هر چه قویتر بین ذرات خاک و ایجاد خاکدانه‌های پایدار می‌شوند (Belnap *et al.*, 2001). از طرفی اتصال ذرات فیزیکی خاک توسط رشته‌های هیف بخش قارچ گل‌سنگ‌ها، عامل مهم دیگری در پیوند ذرات و تشکیل خاکدانه‌های پایدار می‌باشد (Eldridge & Leys, 2003). بنابراین پایداری خاکدانه‌ها و حفاظت خاک از یک سو به واسطه مکانیسم‌های فیزیک‌وشیمیایی خاصی است که پوشش پوسته‌های زیستی بر خاک اعمال می‌کنند و از سویی دیگر بر اساس اعمال مکانیسم‌های بیولوژیکی خاص ضمن خود ارتقاء پایداری خاکدانه‌ها می‌توانند نقش بسیار موثری در حفاظت و پیشگیری از تلفات خاک ایفا نمایند..

عوامل موثر در پایداری خاکدانه خشک

عوامل تاثیرگذار در پایداری خاکدانه خشک درصد کربن آلی،

درصد رس، درصد ماسه، میانگین وزنی قطر ذرات خاک، اسیدیتته و هدایت الکتریکی بودند. خاکدانه‌ها ذرات ثانویه‌ای هستند که در نتیجه هم‌آوری ذرات اولیه خاک (رس، سیلت و ماسه) با ماده آلی و سایر مواد اتصال دهنده یا سیمانی کننده از جمله کربنات‌ها، پل‌های یونی و ارگانیسیم‌ها تشکیل می‌شوند (Bronick & Lal, 2005). شاخص دکستر (Dexter *et al.*, 2008) یک نسبت مساوی با ۱۰ برابر میزان کربن آلی تقسیم بر میزان رس خاک (100C/Clay) تعریف شده است که نشان دهنده میزان کنش و واکنش میان ماده آلی خاک و میزان رس موجود در آن می‌باشد. عبارتی شاخص دکستر موید تاثیر کربن آلی خاک در تشکیل کمپلکس‌های آلی با رس خاک می‌باشد. با توجه به داده‌های جدول (۱) میانگین و حداکثر شاخص دکستر برای خاک زیر پوشش پوسته‌های زیستی به ترتیب برابر با ۰/۱۹ و ۰/۲۸ و برای خاک‌های بدون پوسته‌های زیستی به ترتیب مساوی با ۰/۱۶ و ۰/۲۵ بود. در هر دو حالت مقدار آن کمتر از ۱ بوده و بیانگر این مطلب است که تمام کربن آلی موجود در خاک در تشکیل کمپلکس‌های آلی با رس خاک شرکت نموده و مقدار اضافی یا کربن کمپلکس نشده (NCOC: Non-complexed organic carbon) در خاک‌های دشت سگری باقی نمانده است. بنابراین هرچه رس خاک بیشتر و درصد ماسه کمتر باشد کمپلکس‌های آلی بیشتری در خاک تشکیل شده و ساختمان خاک بهبود می‌یابد. درصد ماسه کمتر در خاک سبب تشکیل هسته‌های درشت‌تر در مرکز خاکدانه شده و پایداری خاک افزایش می‌یابد. Kelishadi *et al.* (2018) نیز در تحقیق خود برای ارزیابی همخوانی روش‌های مختلف تعیین پایداری ساختمان خاک برای برآورد فرسایش پاشمانی به نتایج مشابهی دست یافته‌اند.

شاخص پایداری خاکدانه خشک (WESS)^۱

در حقیقت پایداری خاکدانه تر و خشک متاثر از یکدیگرند، لیکن اهداف مطالعاتی، تعیین کننده نوع تیمار به کاررفته برای اندازه‌گیری هر یک از آنهاست. در جایی که فرسایش بادی مطرح است الزاما از تیمار خاکدانه به روش خشک، که اغلب بر سایدگی مکانیکی استوار هستند استفاده می‌شود و بالعکس در جایی که فرسایش آبی مورد مطالعه قرار دارد فرایند پراکندگی ذرات در آب بررسی می‌شود. برخی محققان شاخص $d < 0.084$ را بعنوان شاخص پایداری خاکدانه خشک در تحقیقات خود به کار برده‌اند (Zobeck & Scott, 2014). لیکن ذرات رس با قطر کمتر از ۶۲۵ میکرون تاثیر مثبت در افزایش چسبندگی ذرات خاک و تشکیل خاکدانه دارند. سرعت آستانه فرسایش بادی در خاک‌ها با درصد

ذرات با قطر ۰/۱ تا ۰/۲۵ میلی‌متر ۴ متر بر ثانیه گزارش شده است. ذرات درشت‌تر به دلیل وزن بیشتر دارای آستانه فرسایش بالاتر هستند و ذرات ریزتر در حد رس‌ها به علت چسبندگی زیاد مقاوم به فرسایش بادی هستند (Li *et al.*, 2003). نتایج تحقیق Mahmoodabadi و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد فرسایش بادی در خاک زراعی، با افزایش درصد ذرات خاک با قطر بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر شدت فرسایش بادی کمتر از خاک ماسه‌ای بوده است. بنابراین نمیتوان گفت پارامتر $d < 0.084$ شاخص قطعی و ملاک اصلی تشخیص مقاومت خاکدانه خشک در برابر عوامل فرسایش بادی است. لذا روش اندازه‌گیری شاخص پایداری خاکدانه در فرسایش بادی (WESS) به گونه‌ای است که با توجه به ماهیت مراحل اولیه خزش و جهش ذرات خاک و نحوه برخورد ذرات با یکدیگر و متعاقب آن احتمال شکنندگی و سایدگی ذرات در اثر نیروی اصطکاک را توجیه می‌کند. ذرات خاک در محدوده سیلت ریز و متوسط از آن جدا شده و پس از سانتریفیوژ به حالت خشک، با سرعت بالا با یکدیگر برخورد می‌کنند. در واقع ذرات سیلت ریز با ذرات سیلت متوسط در اثر سانتریفیوژ، بمباران شده و متلاشی می‌شوند و میزان تغییرات درصد سیلت و رس در هیدرومتری بعد از سانتریفیوژ نشان می‌دهد که چه مقدار از ذرات سیلت ریز به رس تبدیل شده و درصد رس خاک را افزایش داده‌اند. تغییرات میزان رس خاک در واقع میزان مقاومت خاکدانه خشک در اثر نیروهای مکانیکی نمایان می‌کند. لیکن طولانی بودن مراحل اندازه‌گیری آن از جمله هیدرومتری اولیه، الک خشک و تفکیک ذرات سیلت ریز و متوسط، سانتریفیوژ کردن و هیدرومتری خاک بعد از سانتریفیوژ از معایب بکارگیری شاخص WESS می‌باشد.

عوامل موثر در مرطوب خاکدانه تر

طبق نتایج مدلسازی رگرسیون چند متغیره مهمترین عوامل تاثیرگذار در پایداری خاکدانه تر درصد کربن آلی خاک، اسیدیتته، درصد آهک و میزان درصد ذرات خاک با قطر کوچک‌تر از ۰/۸۴ میلی‌متر می‌باشند. علاوه بر موارد ذکر شده در تاثیر ماده آلی خاک بر تشکیل کمپلکس‌های آلی، رابطه میزان ماده آلی در فراوانی ذرات خاک در دامنه ۰/۱۲۵ تا ۴/۷۵ میلی‌متر توسط برخی محققان بررسی شده است. مشاهده شده است که با افزایش کاه و کلش (افزایش سطح ماده آلی در خاک) بزرگترین کلاس اندازه‌ای ذرات خاک یعنی ذرات بین ۲ تا ۴/۷۵ میلی‌متر به طور معنی داری افزایش یافته است. این روند افزایش در کلاس‌های ۰/۵ تا ۱ و ۱ تا ۲ میلی‌متر نیز رخ داده است. لیکن در ریزترین

افزایش می‌دهد. در حالیکه آهک موجود در سیلت و رس خاک یا همان آهک ثانویه، نقش بسزایی در سیمانی شدن ذرات خاک و کاهش پراکندگی ذرات رس دارد (Moradi *et al.*, 2013; Bronick & Lal, 2005). بنابراین می‌توان گفت آهک موجود در خاک‌های دشت سگزی از نوع آهک ثانویه بوده و لذا نقش مثبتی در پایداری خاکدانه تر دارد لیکن همانطور که در شکل نشان داده شده همبستگی معنی دار نداشته و تاثیر آن کمتر از عوامل دیگر بوده است.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله از ارائه رهنمودها و مشاوره‌های سازنده دکتر محمدرضا اختصاصی، استاد محترم دانشکده کویرشناسی دانشگاه یزد و دکتر حسن روحی‌پور، دانشیار محترم موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور کمال تشکر و قدردانی را دارند. نویسندگان زحمات مسئول محترم آزمایشگاه خاکشناسی بخش تحقیقات بیابان در موسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، آقای مهندس فرهاد خاکساریان را به سبب همکاری‌های صمیمانه در انجام آزمایشات خاک، ارج نموده و از ایشان سپاس‌گزاری می‌نمایند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Amezketta E. (1999). Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14: 83-151.
- Armin, M., Ahmadi, H., Rouhipour, H., Salajegheh, A., Mahdian, M. H. and Ghorban nia Kheybari, V. (2016). Assessment of aggregate stability and determination of instability mechanism of marly soils in Taleghan watershed. *Journal of Rangeland and Watershed Management*, 68(4): 691-710.
- Belnap, J. and Harper, K. T. (1995). Influence of cryptobiotic soil crusts on elemental content of tissue of two desert plants. *Arid Soils Research and Rehabilitation*, 9: 107-115.
- Belnap, J., Kaltenecker, J. H., Rosentreter, R., Williams, J., Leonard, S. Eldridge, D. (2001). Biological soil crusts: ecology and management. United States Department of Interior, Bureau of Land Management, Printed Materials Distribution Center, BC-650-B, P. O. Box 25047 Denver, Colorado 80225-0047.
- Bronick C. J. and Lal R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124: 3-22.
- Bruce-Okine E. and Lal R. (1975). Soil erodibility as determined by the raindrop technique. *Soil Science* 119: 149-157.
- De Leenheer L. and de Boodt, M. (1959). Determination of aggregate stability by the change in mean weight diameter. *Mededelingen van landbouwhogescholen en de opzoekings stations van de staat te Gent* 24: 290-300.
- Dexter, A.R., Richard, G., Arrouays, D., Czyż, E. A., Jolivet, C. and Duval, O. (2008). Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144, 620-627.
- Diaz-Zorita M., Perfect E. and Grove J. H. (2002). Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil and Tillage Research* 64: 3-22.
- Duchicela, J., Sullivan, T. S., Bontti, E., Bever, J. D. (2013). Soil aggregate stability increase is strongly related to fungal community succession along an abandoned agricultural field chronosequence in the Bolivian Altipano. *Journal of Applied Ecology*, 50: 1266-1273.
- Ekhtesasi, M. R. and Azimzadeh, H. R. (2012). Investigation on the dry and wet sieving soil granulometry indices and its application in water and wind erosion studies (Case study: Yazd plain). *Arid Biome Scientific and Research Journal*, 2(2): 1-9 (In Farsi)
- Eldridge, D.J. and Greene, R. S. B. (1994). Microbiotic soil crusts: a review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. *Austr.J. Soil Res.* 32: 389-415.
- Eldridge, D. and Leys, J. F. (2003). Exploring some relationships between biological soil crust, soil aggregation and wind erosion. *Journal of Arid Environments*, 53:457-466.
- Emerson W.W. (1967). A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Australian Journal of Soil Research* 5: 47-57.
- Evetts, S., Tolk, J. and Howell, T. (2006). Soil Profile

کلاس اندازه‌ای یعنی صفر تا ۰/۱۲۵ میلی‌متر سطح معنی‌داری کاهش یافته است (Mahmoodabadi, 2011). در مدلسازی انجام یافته (فرمول ۲) اثر ماده آلی با توجه به توزیع اندازه ذرات به روش الک خشک نیز دیده شده است. بنابراین پوسته‌های زیستی باعث افزایش ماده آلی خاک شده و بالطبع درصد اندازه ذرات درشت‌تر نیز در خاک‌های زیر پوشش آنها افزایش می‌یابد. طبق داده‌های جدول (۱) میانگین $d < 0.084$ در خاک زیر پوشش پوسته‌های زیستی ۶/۱۹ و در خاک‌های بدون پوسته‌های زیستی ۶/۲۷ میلی‌متر است. یافته‌های تحقیق نیز نشان داد که درصد ذرات خاک با قطر کمتر از ۰/۸۴ میلی‌متر با ضریب منفی (فرمول ۲) در مدلسازی پایداری خاکدانه تر وارد شده است. عبارتی هر چه ذرات خاک با قطر کمتر از ۰/۸۴ میلی‌متر بیشتر شوند میانگین وزنی قطر ذرات خاک و پایداری خاکدانه تر کاهش می‌یابد.

اگر چه محققان بسیاری در تحقیقات خود بر رابطه مثبت بین پایداری خاکدانه و درصد آهک دست یافته‌اند (Levy *et al.*, 2003; Keren & Ben-Hur, 2003)، لیکن باید توجه نمود که نوع و منشاء آهک موجود در خاک در میزان پایداری آن نقش مهم‌تری دارد. آهک اولیه که جزء تشکیل دهنده ساختار شن خاک است همچون شن، پایداری خاکدانه را کاهش داده و پراکندگی رس را

- Water Content Determination: Sensor Accuracy, Axial Response, Calibration, Temperature Dependence, and Precision. *Vadose Zone Journal*, 894-907.
- Hasanzadeh Bashtian, M., Sepehr, A., Farzam, M. and Bahreini, M. (2018). Distribution of biological soil crust along surface evolution of an arid alluvial fan. *Journal of Researches in Earth Sciences*, 9(33):1-13 (In Farsi).
- Kakeh, J. and Gorji, M. (2014). Studying The Effects of Biological Soil Crusts on Soil Saline-Sodic Properties (Rangeland of Qare Qir, Golestan Province). *Journal of Water and Soil*, 28(1):230-238 (In Farsi).
- Kakeh, J., Gorji, M., Sohrabi, M., Tavili, A. and Pourbabaee, A. A. (2018). Effects of biological soil crusts on some physicochemical characteristics of rangeland soils of Alagol, Turkmen Sahra, NE Iran. *Soil & Tillage Research*, 181: 152-159.
- Kakeh, J., Gorji, M., Mohammadi, M. H., Asadi, H., Khormali, F., Sohrabi, M. and Cerda, A. (2020). Biological soil crusts determine soil properties and salt dynamics under arid climatic condition in Qara Qir, Iran. *Science of the Total Environment*, 732: 1-16.
- Kavdir, Y., Ozcan, H., Kinci, H., and Yigini, Y. (2004). The influence of clay content, organic carbon and land use types on soil aggregate stability and tensile strength. *Turk. J. Agron.* 28: 155-162.
- Kelishadi, H., Mosaddeghi, M., Ayobi, Sh. and Asadi, H. (2018). Evaluation of different methods of soil structural stability determination for predicting splash erosion. *Journal of Agricultural Engineering*, 41(4): 1-15 (IN Farsi).
- Keren, R. and Ben-Hur, M. (2003). Interaction effects of clay swelling and dispersion and CaCO₃ content on saturated hydraulic conductivity. *Australian Journal of Soil Research*, 41: 989-979.
- Jim Clark. (2013). Acid-Base Indicators. [ONLINE] Available at: <https://www.chemguide.co.uk/physical/acidbaseeqia/indicators.html>
- Lal R. and Shukla M. K. (2004). *Principles of Soil Physics*. Marcel Dekker, New York. ISBN 0-8247-5324-0.
- Levy, G. J., Mamedov, A. I. and Goldstein, D. (2003). Sodicy and water quality effects on slaking of aggregates from semiarid soils. *Soil Science*, 168: 562-552.
- Li, F. R., Zhang, H., Zhang, T. H. and Shirato, Y. (2003). Variation of Sand Transportation Rates in Sandy Grasslands along a Desertification Gradient in Northern China. *Catena*, 53, 255-272.
- Mahmoodabadi, M. (2011). Consecutive application of organic matter and sodicity on secondary particle size distribution. *Environmental Erosion Researchs*. Nnumber 2. (In Farsi)
- Mahmoodabadi, M., Dehghani, F. and Azimzadeh, H. (2011). Effect of soil particle size distribution on wind erosion rate. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 1(1):82-97 (In Farsi).
- Martin, J. P. (1971). Decomposition and binding action of polysaccharides in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 3(1):33-41.
- Miralles, I., Soria, R., Lucas-Borja, M. E., Soriano, M. and Ortega, R. (2020). Effect of biocrusts on bacterial community composition at different soil depths in Mediterranean semi-arid ecosystems. *Science of the Total Environment*, 733:1-15.
- Moradi, F., Khalilmoghdam, B., Hadian, H. A. and Ghorbani Dashtaki, S. (2013). Aggregates Stability Evaluation Indices and the Most Effective Soil Characteristics: Case Study in Sugarcane Agro-Industry of Khozestan. *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)*, 105:43-53 (In Farsi).
- Mugnai, G., Rossi, F. and De Philippis, R. (2020). The role of grain size and inoculum amount on biocrust formation by *Leptolyngbya* ohadii. *Catena*, 184: 1-14
- Natural Resources Conservation Service (NRCS), USDA. (1996). *Soil Quality Information Sheet. Indicators for Soil Quality Evaluation*.
- Nikpour, M., Mahboubi, A. A., Mesdaghi, M. and Safadoust, A. (2011). Investigating the effect of intrinsic soil properties on the structural stability of some soils in Hamadan province. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 15(58): 85-96 (In Farsi).
- Rawlins B.G., Wragg J., and Lark R. M. (2013). Application of a novel method for soil aggregate stability measurement by laser granulometry with sonication. *European Journal of Soil Science* 64: 92-103.
- Roncero-Ramos, B., Munoz-Martin, M. A., Canton, Y., Chamizo, S., Rodriguez-Caballero, E. and Mateo, P. (2020). Land degradation effects on composition of pioneering soil communities: An alternative successional sequence for dryland cyanobacterial biocrusts. *Soil Biology and Biochemistry*, 146: 1-15.
- Saadat, S., Esmaelnejad, L., Rezaei, H., Mirkhani, R. and Seyedmohammadi, J. (2019). Comparing Aggregate Stability Tests as One of the Soil Physical Quality Indicators. *Journal of Water and Soil*, 33(2): 289-303 (In Farsi).
- Tajik Esmaeili, A. (2002). Effect of Organic Matter, Electrical Conductivity and Sodium Absorption Ratio on Aggregate Stability. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 4(14): 69-84 (In Farsi).
- Vaezi, A. R., Rahmati, S. and Bayat, H. (2018). Evaluating the susceptibility of aggregate sizes to interrill erosion based on aggregate stability indices. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(2): 169-185 (In Farsi).
- Wu, G. L., Zhang, Q. M., Liu, Y. and Vincente, M. L. (2020). Litter cover promotes biocrust decomposition and surface soil functions in sandy ecosystem. *Geoderma*, 374: 1-12.
- Yang, X., Xu, M., Zhao, Y., Bago, T., Ren, W. and Shi, Y. (2020). Trampling disturbance of biocrust enhances soil Carbon emission. *Rangeland*

Ecology and Management, 73(4): 501-510.

Yoder, R. E. (1936). A direct method of aggregate analysis and a study of the physical nature of erosion losses. Journal of the American Society of Agronomy 28: 337-351.

Zobeck, T. M. and Scott, V. P. R. (2014). Wind erosion. Publications from USDA-ARS / UNL

Faculty, 1409, 208-227.

Zolfaghari Z, Mosaddeghi M, Ayoubi S. (2016). Relationships of soil shrinkage parameters and indices with intrinsic soil properties and environmental variables in calcareous soils. Geoderma. 277: 23-34 (In Farsi).