Investigating the distribution of organic carbon and some physical properties related to soil stability in Ivriq region of Ardabil

Morteza Khanzadeh Ivrig[a], Esmaiel Goli Kalanpa[*b] , Hossein Shahab Arkhazlo[b] , Mahnaz Alizadeh[c]

[a] *M. Sc. in Soil Fertility Management and Biotechnology, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
[b] *Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
[c] *M. Sc. in Soil Fertility Management and Biotechnology, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*

Research Full Paper
Article History (Received: 2024/11/21 Accepted: 2024/12/4)

Extended abstract

1- Introduction

Evaluating soil stability indices are vital for understanding soil health and managing erosion risks. Soil stability is influenced mostly by soil organic carbon (SOC), water dispersible clay (WDC) and water dispersible silt (WDSi) content and can be estimated by some indices such as dispersion ratio (DR), clay dispersion ratio (CDR), clay flocculation index (CFI), structural stability index (SSI) and soil erodibility factor (K). Soil organic carbon is considered as a very valuable and key resource for estimation of soil erosion. Organic carbon plays a key role in soil resistance to erosive factors and soil structure stability. Studying the factors affecting soil erosion and identifying areas prone to erosion is essential for proper soil management and use, optimal allocation of soil and water resources, pollution prevention and loss of these two very valuable resources. Therefore, this research was conducted to investigate the distribution of organic carbon and some physical properties related to soil stability in the Ivrig region of Ardabil.

2- Methodology

This research was conducted on agricultural lands of Ivrig village of Hir in Ardabil (with a geographical location of 38º 10' north latitude and 48º 31' east). Wheat, barley, potatoes, beans, alfalfa, and chickpeas were the dominant cultivated crops. The average, minimum and maximum annual temperature is 9.8, 3.4 and 15.7 C^0, respectively, and its annual rainfall is 287.1 mm. 100 soil samples (0-30 cm) were collected from agricultural lands in a nearly regular and undisturbed grid pattern. After air drying and passing through a sieve, moisture (ɵm), organic carbon and soil texture were measured by weighting, walkely-black and hydrometer methods. Also, water dispersible clay and silt were measured by hydrometer method without hexametaphosphate. Soil stability indices (DR, CDR, CFI, SSI) and soil erodibility factor (K) were calculated using related equations. Pearson correlation was also established between output data using SPSS and a parameter classification map was drawn using Arc GIS software.

3- Results

Results showed that average values of OC, WDC and WDSi content were 0.79, 12 and 45 %. The organic carbon content in 76 % of studied soils was lower than 1 %. Soil stability indices calculated as 0.93, 0.47, 0.53 and 2.23 percentage for DR, CDR, CFI and SSI, respectively. The average content of soil erodibility content (K) was calculated 0.310. The lower values of DR, CDR, WDC, WDSi and K indices and, in contrast, the higher values of SSI, CFI and OC indices refers to high soil stability and high resistance to erosion. The results of

[*] **Corresponding Author: goli@uma.ac.ir**

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

Pearson's correlation showed that there is a negative and significant correlation between soil organic carbon and sand and the dispersion ratio (DR). In contrast, there was a positive and significant correlation between soil organic carbon and total silt and soil structural stability index (SSI) at the probability level of 1 %. In our research, a negative and significant correlation was found between the soil erodibility factor (K) and DR index and total sand at the probability level of 1%. Soil erodibility factor (K) significantly correlated with total and water dispersible (WDSi) silt at the probability level of 1%.

4- Discussion & Conclusions

Organic carbon is depleted in Ivrig agricultural soils over time (OC<1 in 76 % of soils). Therefore, it is expected that the soil aggregation process is weak in this area and even according to the results of the experiments, it is possible to assume that some soil aggregates have disintegrated. For these reasons, the amount of water dispersible clay and silt was high in the studied samples. The stability and strength of the soil enhances by increasing the amount of SSI, CFI, and OC indices and decreasing the amount of DR, CDR, WDC, WDSi, and K indices. Therefore, soils with high structural stability are resistant to erosion. According to our data (lower values for SSI, CFI and OC), it can be concluded that the soil structure was weak in Ivrig region soils and these lands are highly vulnerable to erosion factors because of higher values for DR, CDR, WDC, WDSi and soil erodibility factor (K). It seems that organic carbon affects all the studied parameters and indicators and increases the soil's resistance to erosion by increasing the stability of the soil. Increasing soil organic carbon and adopting appropriate agricultural management, including the use of cultivation methods without tillage and minimal tillage, are suitable solutions to protect these lands.

Key Words: Water dispersible clay and silt, soil organic carbon, soil stability, soil erosion.

Cite this article: Kazzadeh Ivrig, M., Goli Kalanpa, E., Shahab Arkhazlo, H., & Alizadeh, M. (2025). Investigating the distribution of organic carbon and some physical properties related to soil stability in Ivriq region of Ardabil. *Journal of Environmental Erosion Research. 2025; 14 (4):146-167*. http//doi.org/

© The Author(s).
DOI: http//doi.org/
Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

بررسی توزیع کربن‌آلی و برخی خصوصیات فیزیکی مرتبط با پایداری خاک در منطقه ایوریق اردبیل

مرتضی خان‌زاده ایوریق: *دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل*

اسماعیل گلی کلانپا*: *دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل*

حسین شهاب آرخازلو: *دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل*

مهناز علی‌زاده: *دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل*

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴)

DOI: http//doi.org/

چکیده

مطالعه شاخص‌های پایداری برای سلامت خاک و مدیریت خطرات فرسایش حیاتی است. پایداری خاک و تخمین استعداد فرسایش اراضی از کربن آلی، رس و سیلت قابل انتشار در آب (WDC و WDSi) متاثر شده و از روی برخی شاخص‌ها مانند شاخص‌های نسبت پراکندگی(DR)، نسبت پراکندگی رس (CDR)، شاخص انعقاد رس (CFI) و شاخص پایداری ساختمان (SSI) و فرسایش پذیری خاک (K) تخمین زده می‌شود. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی توزیع کربن آلی و برخی خصوصیات فیزیکی مرتبط با پایداری خاک در منطقه ایوریق اردبیل انجام شد. لذا، تعداد ۱۰۰ نمونه (صفر تا ۳۰ سانتی متر) از زمین‌های کشاورزی منطقه ایوریق تهیه و مختصات جغرافیایی توسط GPS ثبت گردید. پس از هوا خشک کردن و عبور دادن از الک، رطوبت جرمی، کربن آلی، بافت خاک، رس و سیلت قابل انتشار در آب در بخش ریز اندازه‌گیری و سپس شاخص‌های DR و CDR و CFI و SSI و K محاسبه گردید. در نهایت، همبستگی پیرسون بین داده‌های خروجی توسط SPSS برقرار و نقشه کلاس‌بندی پارامترها با استفاده از نرم افزار ARC GIS رسم شد. نتایج نشان داد که میانگین مقادیر OC، WDC، WDSi، DR، CDR، CFI، SSI و K در ۱۰۰ نمونه از منطقه به ترتیب برابر ۰/۷۹، ۱۲، ۴۵، ۰/۹۳، ۰/۴۷، ۰/۵۳، ۲/۲۳ درصد و ۰/۳۱۰ مگاگرم ساعت در هکتار بر مگاژول میلی متر در هکتارمی‌باشد. حداقل مقادیر به دست آمده برای پارامترهای DR و CDR و WDC و WDSi و K به ترتیب برابر ۰/۷۳، ۰/۰۶، ۲، ۲۷ و ۰/۴۷ بود و حداکثر مقادیربه دست آمده برای پارامترهای SSI و CFI و OCبه ترتیب برابر ۴/۴۵، ۰/۹۴ و ۱/۵۶ بود، لازم به ذکر است هر چه میزان شاخص‌های DR و CDR و WDC و WDSi و K کمتر باشد و در مقابل، هر چه میزان شاخص‌های SSI و CFI و OC بیشتر باشد، پایداری خاک بالا بوده و در برابر فرسایش مقاومت بیشتری دارد. با توجه به داده‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که پایداری خاک در این منطقه ضعیف بوده و این اراضی در برابر عوامل فرسایشی به شدت آسیب‌پذیر می‌باشند.کربن آلی تمامی پارامترها و شاخص‌های مورد مطالعه را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد و با بالا بردن مقاومت خاک در برابر عوامل فرسایشی ، پایداری خاک را افزایش می‌دهد.

واژگان کلیدی: رس و سیلت قابل انتشار در آب، کربن آلی خاک، پایداری خاک، فرسایش خاک

* **نویسندهٔ مسئول:** goli@uma.ac.ir

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

۱ـ مقدمه

افزایش روزافزون جمعیت و در نتیجه افزایش تقاضا برای مواد غذایی در سطح جهانی، شناسایی مشکلات و استعدادهای موجود در اراضی زراعی را ضروری می‌نماید. فرسایش خاک یک مسئله زیست محیطی مهم است که با حذف لایه بالایی خاک، بر بهره‌وری کشاورزی، کیفیت منابع خاک و آب و سلامت اکوسیستم تأثیر می‌گذارد. مواد آلی خاک در فرآیندهای مختلف خاک نظیر هماوری و چسبندگی ذرات خاک و در نتیجه تشکیل خاکدانه‌ها، کلات شدن عناصر غذایی، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی در خاک و تأمین بخشی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان نقش دارد (Lipiec et al, 2021). کمبود کربن آلی در اکثر خاک‌های کشور مشکلاتی نظیر تراکم، ناپایداری ساختمان خاک و فرسایش خاک به وجود می‌آورد.

مطالعه شاخص‌های فرسایش و پایداری خاک برای درک سلامت خاک و مدیریت خطرات فرسایش حیاتی هستند. پایداری خاکدانه ها (AS[1]) شاخص مهمی است که نشان دهنده توانایی خاک برای مقاومت در برابر فرسایش است. مطالعات مختلف عوامل موثر برAS، از جمله بافت خاک، محتوای رطوبت و شیوه‌های استفاده از زمین را بیان می‌کنند. از جمله پارامترها و شاخص‌های مهم تأثیرگذار در سنجش پایداری خاک و تخمین فرسایش‌پذیری خاک، می‌توان به کربن‌آلی خاک، بافت خاک، رس و سیلت قابل انتشار در آب و شاخص‌های DR[2] و CDR[3] و CFI[4] وSSI[5] و K[6] اشاره کرد که هر کدام از این موارد تأثیر خاصی بر پایداری و فرسایش‌پذیری خاک دارند (Deborah et al, 2024). خاکدانه‌ها ذرات ثانویه خاک می‌باشند و از هماوری و به هم چسبیدن ذرات خاک به وسیله مواد آلی و غیرآلی به وجود می‌آیند، که این عمل از برهمکنش‌های مختلفی تأثیر می‌پذیرد. پایداری و استحکام خاکدانه‌ها از نظر ترسیب کربن و حفظ کربن آلی در خاک بسیار مهم می‌باشد (Abrar et al, 2020). پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌های لومی و رسی، ارتباط مستقیمی با مقدار و نوع موادآلی خاک دارد (Sayara et al, 2020).

پراکنش و انتشار رس و سیلت موجب فروپاشی ساختمان خاک و در پی آن انسداد منافذ ریز و درشت، رقابت با ریشه گیاهان برای عناصر غذایی به علت سطح ویژه بالای رس‌ها، ایجاد سله و سفتی در خاک، کاهش نفوذپذیری خاک، فرسایش خاک و اختلال در فرآیند تهیه بستر بذر می‌گردد (Rengasmy, 1982)

ارزیابی شاخص‌های پایداری خاک شامل پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی مختلفی است که کیفیت خاک و ظرفیت آن برای مقاومت در برابر فرسایش و تخریب را منعکس می‌کند. مطالعات اخیر اهمیت پایداری خاک را به عنوان یک شاخص کلیدی، با روش‌های نوآورانه‌ای که برای ارزیابی مؤثر آن در حال ظهور هستند، برجسته می‌کنند.

Rosta و همکاران (2012) در بررسی تأثیر مواد آلی و ترکیبات معدنی کلسیم دار بر توزیع اندازه‌ای خاکدانه‌ها و میزان رس قابل پراکنش در یک خاک سدیمی نشان دادند که استفاده توأم از موادآلی همراه با گچ در افزایش پایداری و همچنین تشکیل خاکدانه‌ها از طریق هماوری ذرات رس تأثیر دارد. در پژوهشی دیگر که توسط Ahukaemere و

1- Aggregate Stability
2- Dispersion ratio
3- Clay dispersion ratio
4- Clay flocculation index
5- Structural stability
6- Soil erodibility

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

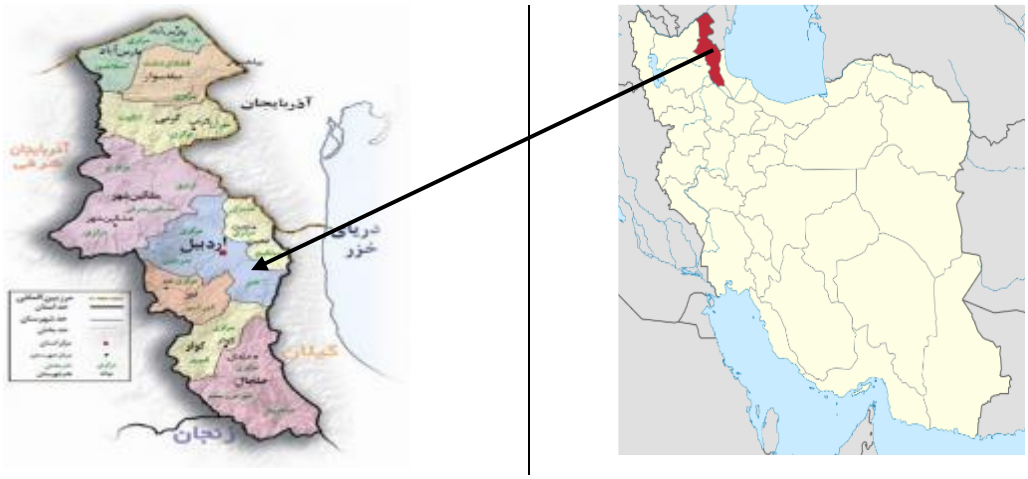
همکاران (2020) با هدف ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها در مناطق جنوب شـــرقی نیجریه انجام شـــد، نتایج نشـــان داد که ترکیب خاک، از جمله مقدار رس و کربن آلی خاک، نقش مهمی در تعیین پایداری خاکدانه‌ها و ویژگی‌های ژئوتکنیکی در مکان‌های مختلف دارد. در مطالعه‌ای که توســـط Handayani & Widiastuti (2022) با هدف ارزیابی شاخص‌های پایداری خاک در زمین‌های جنگل‌زدایی شده در کشور اندونزی انجام شد، نتایج نشان دهنده همبستگی بسیار بالا بین کربن آلی خاک و پایداری خاکدانه‌ها بود به گونه‌ای که محتوای کربن آلی بالاتر، ساختار و پایداری خاک را افزایش می‌داد و منجر به افزایش مقاومت خاک در برابر عوامل فرسایش دهنده می‌شد.

شناخت و مطالعه عوامل تأثیرگذار بر فرسایش خاک و شناسایی مناطق مستعد فرسایش برای اتخاذ مدیریت و کاربری مناسب و استفاده بهینه از منابع خاکی و آبی و جلوگیری از آلودگی و از بین رفتن این دو منبع بسیار ارزشمند امری ضروری است، بنابراین این پژوهش با هدف بررسی توزیع ماده‌آلی و برخی خصوصیات فیزیکی مرتبط با پایداری خاک از جمله شاخص‌های WDC، WDSi، DR، CDR، CFI، SSI و K در اراضی زراعی روستای ایوریق شهرستان هیراردبیل انجام گرفت.

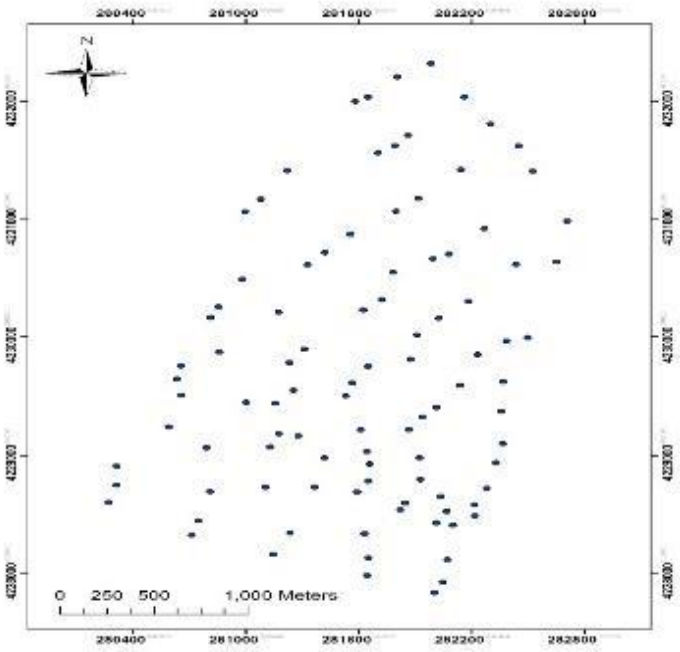
۲- مواد و روش

۲-۱- منطقهٔ مورد مطالعه

در این مطالعه اراضی زراعی روستای ایوریق شهر هیر (با موقعیت جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۳۱ دقیقه شـــرقی) از توابع اســـتان اردبیل به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شـــد. این منطقه دارای کاربری کشاورزی بوده و از جمله گیاهان زراعی غالب مورد کشت در این منطقه می‌توان به، گندم و جو، سیب‌زمینی، لوبیا، یونجه و نخود اشاره نمود. طبق داده‌های نزدیکترین ایستگاه هواشناسی (ایستگاه هواشناسی سه راه کورئیم استان اردبیل و داده‌های سال ۱۴۰۲) به منطقه مطالعاتی، میانگین، کمینه و بیشینه دمای سالانه در این منطقه به ترتیب برابر ۹/۸، ۳/۴ و ۱۵/۷سانتی‌گراد و میزان بارندگی سالانه آن، ۲۸۷/۱ میلی‌متر در سال می‌باشد.



[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و نحوه توزیع نقاط نمونه‌برداری

۲-۲- نمونه برداری خاک

در این پژوهش تعداد ۱۰۰ نمونه خاک سطحی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر به وسیله بیل و به صورت شبکه‌بندی تقریبا منظم با فاصله متوسط ۵۰۰ متر از اراضی مورد مطالعه تهیه شد و مختصات جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری شده با استفاده از دستگاه GPS ثبت گردید. مساحت منطقه مطالعاتی با استفاده از نرم افزار گلوبال مپر در حدود ۷کیلومتر مربع تعیین گردید.

۲-۳- اندازه‌گیری خصوصیات خاک

رطوبت جرمی به روش وزنی، کربن آلی خاک به روش والکلی و بلک (Nelson & Samers, 1982)، بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee et al, 1986)، تعیین گردید. اندازه‌گیری رس و سلیت قابل انتشار در آب مشابه بافت خاک انجام گرفت. با این تفاوت که در این آزمایش از هگزا متافسفات سدیم استفاده نشد و همه مراحل در حضور آب مقطر انجام گردید. پس از محاسبه میزان رس و سیلت قابل انتشار در آب، درصد رس قابل انتشار از رابطه زیر محاسبه شد (Jafare et al, 2019).

$$\text{Water Dispersible Clay (WDC, \%)} = \frac{\text{Clay in Water (\%)}}{\text{Clay in HMP (\%)}} * 100$$ **رابطهٔ ۱**

که در این رابطه: WDC: درصد رس قابل انتشار، Clay in Water: درصد رس قابل انتشار در آب و Clay in HMP: درصد رس اندازه‌گیری شده در حضور هگزا متا فسفات سدیم می‌باشد.

شاخص‌های پایداری ساختمان خاک (DR، CDR، CFI، SSI و K) با استفاده از روابط جدول ۱ محاسبه گردید.

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

جدول۱- روابط مربوط به محاسبه شاخص‌های پایداری ساختمان خاک

رابطه	نام شاخص	رابطه مربوطه	منبع
1	Dispersion ratio (DR)	$\frac{WDSi + WDC}{Silt + Clay}$	Moradi et al, (2014).
2	Clay dispersion ratio (CDR)	$\frac{WDC}{Clay}$	Igwe and odegbunam, (2008).
3	Clay flocculation index (CFI)	$\frac{TC - WDC}{Clay}$	Igwe and odegbunam, (2008).
4	Structural stability (SSI)	$\frac{1.72 * OC}{Silt + Clay} \times 100$	Asadi Fard et al, 2024).
5	Soil erodibility (K)	$K= 7.594\{0.0034+0.0405\exp-[0.5\times(\frac{LogDg+1.659}{0.7101})^2]\}$ $Dg= \exp(0.01\sum fiLnmi)$	Ahmadi et al, (2019).

که در این روابط: WDSi : سیلت قابل انتشار در آب، WDC: رس قابل انتشار در خاک، Silt: سیلت کل خاک، Clay: رس کل خاک، Tc: رس کل خاک و OC: کربن آلی خاک می‌باشد. همچنین در رابطه مربوط به محاسبه K، Fi درصد فراوانی هریک از اجزای بافت خاک (شن، سیلت و رس) و mi میانگین عددی قطر هر ذره خاک است که این مقدار برای شن برابر با ۱/۰۲۵ میلی‌متر، برای سیلت برابر با ۰/۰۲۶ میلی‌متر و برای رس برابر با ۰/۰۰۱ میلی‌متر می‌باشد.

۴-۲- نحوه آنالیز داده‌ها و تهیه نقشه پراکنش پارامترها

داده‌های حاصل از اندازه‌گیری و برآورد پارامترها با استفاده از نرم‌افزار اکسل مورد آنالیز قرار گرفت و در نهایت نمودار توزیع فراوانی هر پارامتر ترسیم گردید. ضرایب همبستگی با بهره بردن از نرم افزار SPSS بر روی داده‌های موجود تعیین گردید و در نهایت نقشه پراکنش پارامترهای اندازه‌گیری شده با استفاده از درونیابی به روش کربجینگ نقطه‌ای در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) ترسیم شد.

۳-یافته‌ها

آمار توصیفی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک در جدول ۲ ارائه شده است.

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

جدول ۲- آمار توصیفی پارامترهای اندازه‌گیری شده در اراضی مورد مطالعه

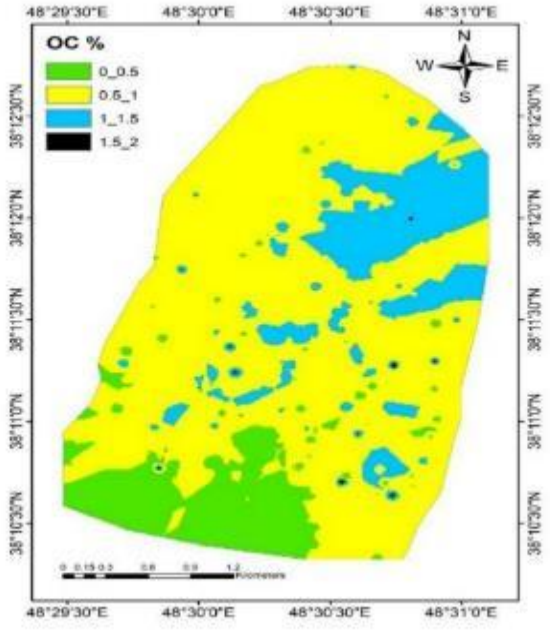
parameters	Unit	Average	mode	maximum	minimum
θm	%	۵/۳۳	۶/۰۴	۶/۸۷	۳/۳۷
OC	%	۰/۷۹	۰/۵۹	۱/۵۶	۰/۰۴
Clay	%	۲۶	۲۹	۳۶	۱۵
Silt	%	۳۵	–	۵۳	۲۰
Sand	%	۳۸	۳۴	۶۴	۲۳
WDC	%	۱۲	–	۲۴	۲
WDSI	%	۴۵	–	۶۲	۲۷
DR	-	۰/۹۳	۰/۹۳	۱/۲۲	۰/۷۳
CDR	-	۰/۴۷	۰/۵۰	۰/۹۴	۰/۰۶
CFI	-	۰/۵۳	۰/۵۰	۰/۹۴	۰/۰۶
SSI	%	۲/۲۳	۲/۶۷	۴/۴۵	۰/۱۳
K	Mg ha h ha^{-1}mj^{-1}mm^{-1}	۰/۳۱۰	–	۰/۳۳۳	۰/۰۴۷

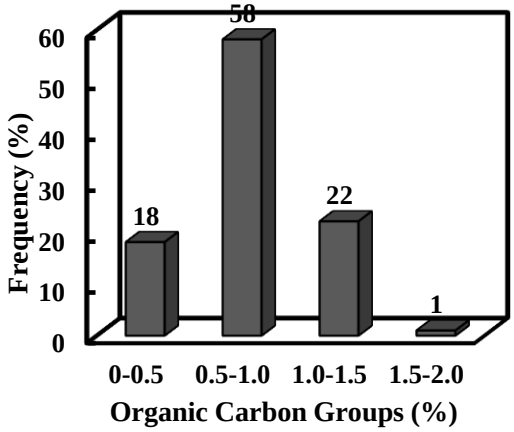
۱-۳- کربن آلی خاک

کربن آلی در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۱/۵۶-۰/۰۴ درصد قرار داشت. میانگین و مد داده‌ها به ترتیب برابر ۰/۷۹ و ۰/۵۳ درصد بود. میزان کربن آلی در ۴ گروه شامل ۰/۵-۰، ۱-۰/۵، ۱/۵-۱ و ۲-۱/۵ درصد طبقه‌بندی شد (شکل۲). میزان فراوانی در این گروه‌ها به ترتیب برابر ۱۸، ۵۸، ۲۲ و ۱ درصد بود.

با توجه به مقادیر بدست آمده برای کربن‌آلی در خاک‌های مورد مطالعه و طبق طبقه بندی Kohong (1986) که خاک‌هایی با میزان کربن‌آلی ۱-۰ در گروه خیلی کم هوموسی و بین ۲-۱ در گروه کم هوموسی قرار می‌دهد، ۷۶ درصد از اراضی مورد مطالعه در گروه خیلی کم هوموسی و ۲۳ درصد از این منطقه در گروه کم هوموسی قرار می‌گیرند. کربن‌آلی در محدوده بین ۴-۰ درصد بر پایداری ساختمان خاک تأثیر می‌گذارد و در مقادیر بالاتر از این محدوده در افزایش پایداری ساختمان خاک تأثیر آنچنانی ندارد (Wishmeier et al, 1971). خاک‌هایی که میزان کربن‌آلی آن‌ها زیر ۲ درصد است به عنوان خاک‌های قابل فرسایش شناخته می‌شوند و با در نظر گرفتن داده‌های کربن‌آلی در منطقه مطالعاتی تمامی این منطقه کربن‌آلی زیر۲ درصد داشته و از نظر مقدار ماده آلی جزو اراضی قابل فرسایش محسوب می‌شوند.

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]





شکل ۲- توزیع فراوانی و نقشه کلاس‌بندی کربن آلی در خاک های مورد مطالعه

Soane (1990) در پژوهشی نشان داد که افزایش میزان کربن‌آلی خاک در افزایش میزان پایداری خاکدانه‌ها بیشترین تأثیر را دارد. همچنین Goldberg و همکاران (1990) نتیجه گرفتند که در تشکیل یا تخریب خاکدانه‌ها کربن‌آلی بیشترین تأثیر را دارد. در پژوهشی که توسط Basharti & Shahbazi (2012) در استان‌های مختلف کشور انجام شد، کمبود کربن آلی در ۶۳/۲ درصد از کل کشور و ۳۱/۸ درصد از کل استان اردبیل مشاهده شد. با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که سهم کربن‌آلی در منطقه مطالعاتی کمتر از میانگین کشوری و بسیار کمتر از میانگین استانی قرار دارد و در این زمینه بایستی در این منطقه دقت بیشتری به عمل آید. کشت گیاهان پر توقع نظیر سیب‌زمینی و لوبیا، برگشت پایین بقایای گیاهی به خاک، عدم استفاده از کودهای آلی و تجزیه و تخریب بیشتر بقایای گیاهی منجر به کاهش کربن‌آلی خاک در این منطقه شده است.

Molina و همکاران (2001) در پژوهشی تأثیر رس و کربن‌آلی خاک در پایدارای خاکدانه‌ها را مثبت ارزیابی کردند، این پژوهشگران تأثیرگذاری کربن‌آلی خاک بر مقدار MWD را ۱۸ برابر رس ارزیابی کردند و رس را در درجه دوم تأثیر گذاری بر پایداری خاکدانه معرفی کردند.

نقشه پراکنش جغرافیایی کربن آلی در شکل ۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که کمبود کربن آلی به غیر از بخش محدودی از شمال‌شرقی منطقه مورد مطالعه (نقاط آبی) در سایر مناطق وجود دارد.

۲-۳- بافت خاک

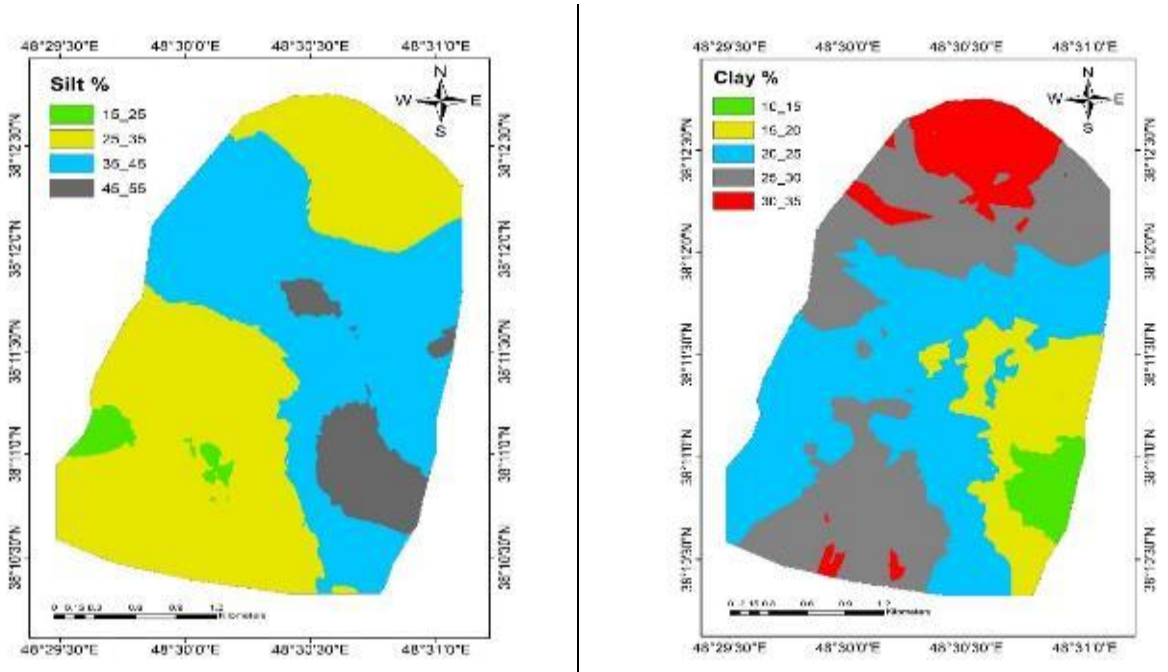
۶ نوع بافت خاک clay loam، clay، silty clay loam، silt loam، silty clay و loam در منطقه مورد مطالعه مشاهده شد، میزان فراوانی در این گروه‌ها به ترتیب برابر ۵۸، ۲۶، ۶، ۶، ۳ و ۱ درصد بود. گروه‌های بافتی Clay Loam با فراوانی ۵۸ درصد و Clay با فروانی ۲۶ درصد، اکثریت بافت خاک‌های این منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. ذرات سیلت به

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

عنوان فرسایش‌پذیرترین ذرات شناخته می‌شوند و اگر مقدار سیلت یک خاک از ۴۰درصد بیشتر باشد، استعداد آن برای فرسایش بیشتر است (Richter and Negendank, 1977)؛ چیزی که در ۲۳درصد اراضی مورد مطالعه مشاهده می‌شود.

بافت خاک بر میزان کربن آلی خاک نیز اثر می‌گذارد. در حالت کلی ارتباط بین فرسایش پذیری یک خاک و میزان سیلت آن، تحت تأثیر میزان کربن آلی و رس خاک قرار دارد. در خاک‌های رسی یا لومی، پویایی و میزان کربن‌آلی در تشکیل خاکدانه‌های پایدار نقش فراوانی دارد؛ علت این امر را می‌توان به کمبود عوامل تثبیت کننده مواد معدنی در این نوع خاک‌ها نسبت داد (Sayara et al., 2020).

میزان رس و سیلت خاک در فرآیندهای پایداری خاکدانه و فرسایش بسیار تأثیرگذار می‌باشد و قادرند این دو فرآیند را تشدید یا کاهش دهند. میزان رس کل در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۳۵/۴۰-۱۳/۸۶درصد قرار داشت. میانگین و مد داده‌ها به ترتیب برابر۲۵/۴۰ و ۲۸/۹۲ درصد به دست آمد. میزان رس کل در ۵ گروه شامل ۱۵-۱۰، ۲۰-۱۵، ۲۰-۲۵، ۲۵-۳۰ و ۳۵-۳۰ طبقه‌بندی شد (شکل۳). میزان فراوانی در این گروه‌ها به ترتیب برابر ۴/۳، ۱۲/۰، ۳۲/۶، ۳۲/۶ و ۱۸/۵ درصد بود. میزان سیلت کل در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۵۳/۷۲-۲۰/۹۹ درصد قرار داشت. میانگین داده‌ها برابر ۳۶/۰۰ درصد به دست آمد. میزان سیلت کل در ۴ گروه شامل ۲۵-۱۵، ۳۵-۲۵، ۴۵-۳۵و ۵۵-۴۵ طبقه‌بندی شد (شکل۳). میزان فراوانی در این گروه‌ها به ترتیب برابر۴/۲، ۴۱/۸، ۴۶/۳ و۸/۴ درصد بود.



شکل ۳- توزیع فراوانی و نقشه کلاس‌بندی رس و سیلت کل در خاک های مورد مطالعه

مقدار بالای رس خاک در حالت کلی به دلیل داشتن خاصیت چسبندگی، سبب افزایش استحکام خاکدانه‌ها و کاهش فرسایش می‌شود. در پژوهش‌های انجام شده محتوای بالای رس در خاک به علت بهبود و پایداری ساختمان خاک منجر به کاهش فرسایش در خاک شده است (Ayobi et al, 2022). با این حال رس و سیلت بیش از حد بدون حضور مواد آلی کافی می‌تواند پایداری خاک را کاهش دهد و حساسیت خاک به فرسایش تحت بارندگی‌های شدید را افزایش دهد (Wuddivira et al, 2009). رس خاک می‌تواند موجب پایداری ساختمان خاک و کاهش فرسایش شود اما اثرگذاری

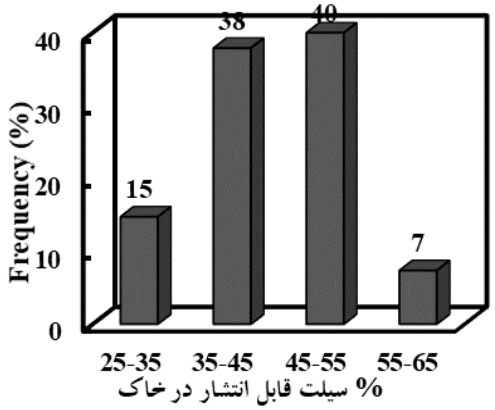
[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

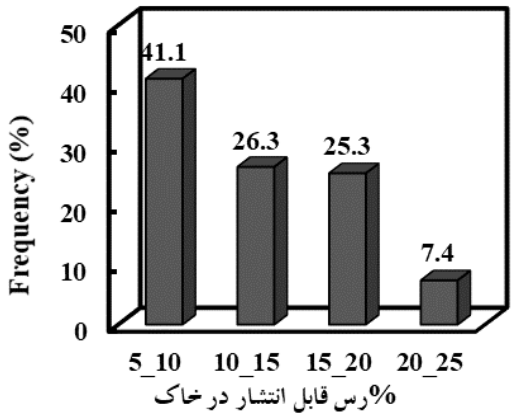
آن به نوع رس، تعادل مناسب نوع رس و مدیریت مناسب بستگی دارد؛ در مقابل در چنین خاک‌هایی مدیریت نامناسب خطر فرسایش را به شدت افزایش می‌دهد.

محتوای سیلت خاک بر پایداری خاک و حساسیت خاک به فرسایش تأثیر می‌گذارد همچنین بر ساختمان خاک و نگهداری آب نیز تأثیرگذار می‌باشد. خاک‌های با محتوای بالای سیلت به دلیل سستی و پایداری پایین به شدت مستعد فرسایش می‌باشند (McManis, 2003). این موضوع به ویژه در اراضی زراعی به علت عملیات خاکورزی و به هم خوردگی خاک بیشتر احساس می‌شود (Yang et al, 2024). مطالعات نشان داده است استفاده از روش‌هایی مانند پلی آکریل آمید (PAM) و ترکیب سیلت و پیت[1] به طور موثر فرسایش را کاهش می دهد و نفوذ آب را در خاک های غنی از سیلت افزایش می دهد (Masnang et al, 2022). نقشه پراکنش جغرافیایی رس و سیلت کل در شکل ۳ ارائه شده است. با تطابق دو نقشه رس و سیلت کل می‌توان استنباط کرد که مناطق شرقی و قسمت‌هایی از مناطق مرکزی منطقه مطالعاتی به دلیل دارا بودن مقادیر سیلت بالا و رس پایین پایداری خاک پایینی دارند و در برابر عوامل فرسایشی آسیب پذیر می‌باشند.

۳-۳- رس و سیلت قابل انتشار در آب

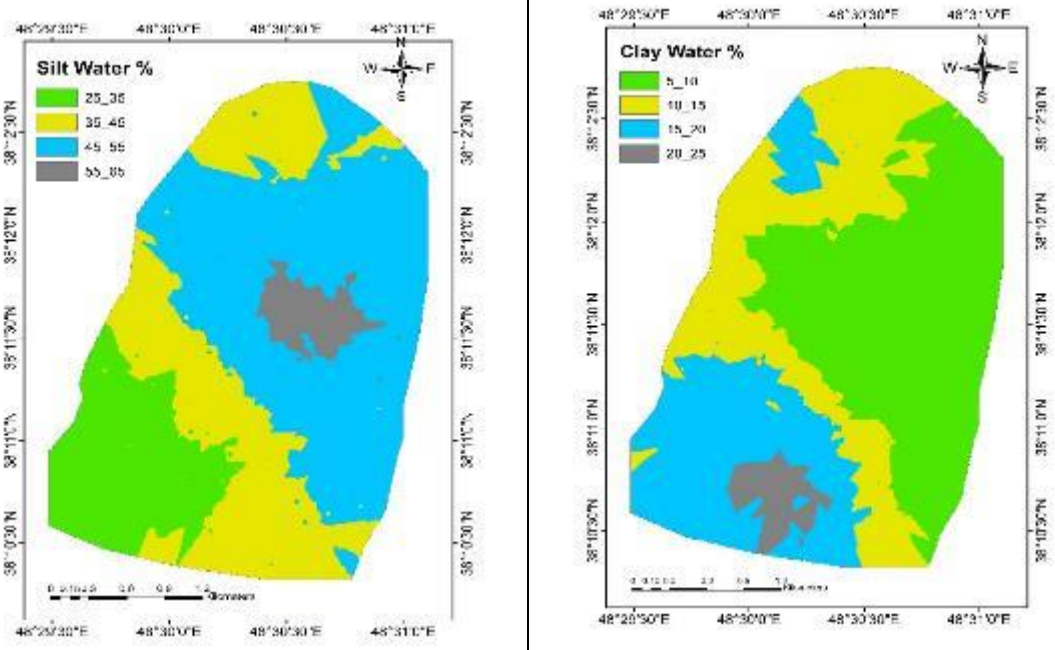
بخشی از رس و سیلت که در آب پخش می‌شود، رس و سیلت قابل پراکنش در آب نامیده می‌شود. پراکنش ذرات رس و سیلت نماینده ناپایداری ساختمان خاک است. رس و سیلت قابل پراکنش از جمله خصوصیات مهم تأثیرگذار در فرسایش‌پذیری و پایداری ساختمان خاک محسوب می‌شود (Korten et al, 1994). میزان رس قابل انتشار در آب در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۲۳/۹۲-۱/۹۱ درصد قرار داشت. میانگین داده‌ها برابر ۱۱/۹به دست آمد. میزان رس قابل انتشار در آب در ۴ گروه شامل ۱۰-۵، ۱۵-۱۰، ۲۰-۱۵و ۲۵-۲۰ طبقه‌بندی شد (شکل۴). میزان فراوانی در این گروه‌ها به ترتیب برابر ۴۱/۱، ۲۶/۳، ۲۵/۳ و ۷/۴ درصد بود. میزان سیلت قابل انتشار در آب در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۲۶/۶۱-۱/۶ درصد قرار داشت. میانگین داده‌ها برابر ۴۴/۷ به دست آمد. میزان سیلت قابل انتشار در آب در ۴ گروه شامل ۳۵-۲۵، ۴۵-۳۵، ۵۵_۴۵و ۶۵-۵۵ طبقه‌بندی شد (شکل۴). میزان فراوانی در این گروه‌ها به ترتیب برابر۱۵، ۳۸، ۴۰و ۷ درصد بود.





1-silt pit

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]



شکل۴- توزیع فراوانی و نقشه کلاس‌بندی رس وسیلت قابل انتشار در خاک‌های مورد مطالعه

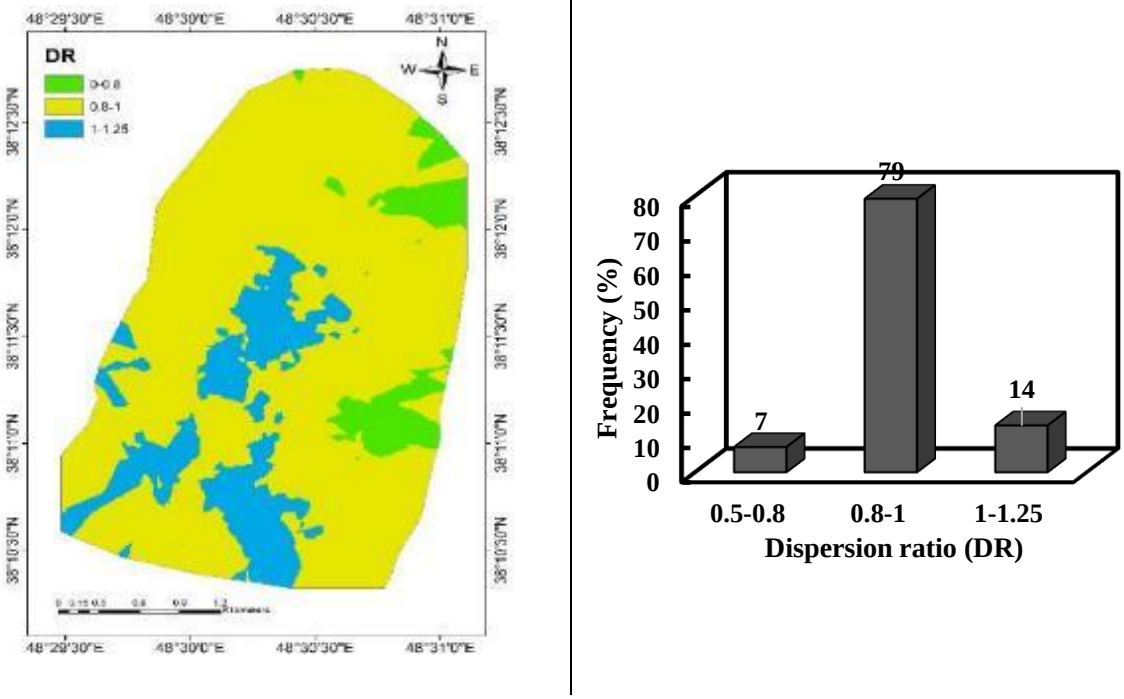
رس و سیلت قابل پخش در آب بر پایداری خاک تأثیر منفی می گذارد و منجر به افزایش فرسایش می شود. محتوای بالای رس و سیلت قابل پراکنش در آب، منجر به تخریب خاکدانه‌ها، کاهش نفوذپذیری و انتقال رسوب می شود که باعث ایجاد مسائل زیست محیطی مانند فرسایش، از بین رفتن منابع خاک و کاهش بهره وری کشاورزی می‌گردد (Igwe & Udegbunam, 2008).

با افزایش مقدار رس و سیلت قابل انتشار در خاک استعداد اراضی برای فرسایش بیشتر شده و با توجه به این که عناصر غذایی در سطح کلوئیدها ذخیره می‌شوند بنابراین در صورت فرسایش علاوه بر ذرات خاک، عناصر غذایی نیز به همراه آن‌ها از دست خواهد رفت. با توجه به شکل ۴ از نظر رس و سیلت قابل پراکنش در آب به ترتیب ۳۲/۷ و۴۷ درصد اراضی مورد مطالعه در معرض فرسایش قرار دارند که می‌توان مهمترین عامل این پدیده را کمبود کربن‌آلی دانست. با تطابق نقشه‌های پراکنش رس و سیلت قابل انتشار با نقشه پراکنش کربن آلی خاک می‌توان نتیجه گرفت که در مناطقی که کمبود کربن آلی شدیدتر می‌باشد، میزان رس و سیلت قابل انتشار بالا است، علت این امر را می‌توان به نقش کربن‌آلی در تشکیل خاکدانه و استحکام خاکدانه‌ها نسبت داد به گونه‌ای که با کاهش کربن آلی فرآیند خاکدانه سازی کمتر شده و استحکام خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد.

۴-۳- شاخص پراکنش میدلتون (DR)

شاخص پراکنش میدلتون (DR) نمایانگر پایداری خاکدانه‌ها تحت تنش رطوبتی می‌باشد. این شاخص نشان دهنده مقاومت و استحکام خاکدانه‌ها در برابر شکسته شدن و پراکنش می‌باشد. شاخص پراکندگی (DR) در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۱/۲۱-۰/۷۳ قرار داشت. میانگین و مد داده‌ها به ترتیب برابر ۰/۹۲ و ۰/۹۳ به دست آمد. میزان شاخص پراکندگی در ۳ گروه شامل ۰/۸-۰/۵، ۱-۰/۸ و ۱/۲۵-۱ طبقه‌بندی شد (شکل۵). میزان فراوانی در این گروه‌ها به ترتیب برابر ۷، ۷۹ و ۱۴ درصد بود.

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]



شکل ۵- توزیع فراوانی و نقشه کلاس‌بندی DR در خاک های مورد مطالعه

شاخص DR و WDC و WDSi به عنوان سه شاخص ارزیابی ناپایداری خاکدانه‌ها شناخته می‌شوند و سهولت پراکنش ذرات سیلت و رس را مشخص می‌نمایند. هر چه مقادیر DR ، WDC و WDSi پایین‌تر باشد خاکدانه‌ها دارای استحکام و پایداری بیشتری هستند و خاک‌های دارای DR بیشتر از ۰/۱۵ مستعد فرسایش بوده و خاکدانه‌هایی ناپایدار دارند (Balce, 1996).

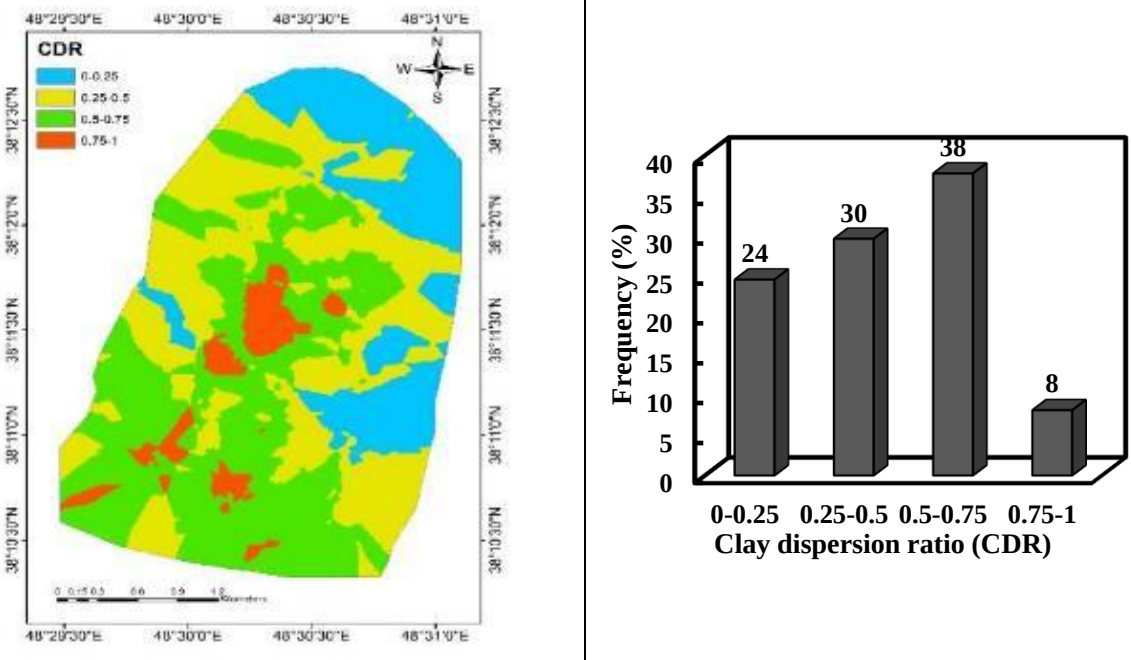
با توجه به مطالب فوق و مقادیر شاخص پراکنش میدلتون (جدول ۱) می‌توان نتیجه گرفت که تمامی منطقه مورد مطالعه مستعد فرسایش بوده و خاکدانه‌های ناپایداری دارند این بدان معناست که در صورت مدیریت و کشت و کار نامناسب، این اراضی مستعد فرسایش خواهند شد. بنابراین برای زراعت در چنین مناطقی بایستی نهایت دقت به عمل آید؛ علت این امر را می‌توان به کمبود کربن آلی در این منطقه نسبت داد که یکی از مهمترین عوامل بالا بودن میزان رس و سیلت قابل انتشار در این منطقه می‌باشد زیرا در صورت کمبود کربن‌آلی، ناپایداری خاک و تخریب خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به نقشه پراکنش شاخص DR و در نظر گرفتن مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت که نواحی جنوبی منطقه مورد مطالعه بیشترین استعداد را برای فرسایش داشته و این استعداد با نزدیک‌تر شدن به نواحی شمالی منطقه مطالعاتی اندکی کاهش پیدا می‌کند. در مطالعه‌ای که توسط Alberts & Ghidey (1997) انجام شد نتایج نشان داد که افزایش شاخص DR، موجب افزایش حساسیت اراضی به فرسایش می‌شود وی علت این امر را به کاهش استحکام و پایداری خاکدانه‌ها نسبت داد.

۵-۳- نسبت پراکندگی رس (CDR)

این شاخص برای اندازه‌گیری میزان پراکندگی ذرات رس خاک استفاده می‌شود و رفتار ذرات رس، پایداری ساختمان خاک و مقاومت آن در برابر فرسایش را نشان می‌دهد. نسبت پراکندگی رس (CDR) در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۰/۹۴-۰/۰۶ قرار داشت. میانگین و مد داده‌ها به ترتیب برابر ۰/۴۶ و ۰/۴۹ به دست آمد. میزان شاخص CDR خاک

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

در ۴ گروه شامل ۰/۲۵-۰، ۰/۵-۰/۲۵، ۰/۷۵-۰/۵ و ۱-۰/۷۵ طبقه‌بندی شد (شکل۶). میزان فراوانی در این گروه‌ها به ترتیب برابر ۲۴، ۳۰، ۳۸ و ۸ درصد بود.



شکل ۶- توزیع فراوانی و نقشه کلاس‌بندی CDR در خاک های مورد مطالعه

CDR بالا می تواند منجر به فشردگی خاک شود و بر نفوذ ریشه و حفظ آب تأثیر بگذارد که برای رشد گیاه بسیار مهم است. در مطالعه‌ای که توسط Rasheed & Saman (2016) در منطقه سلیمانیه عراق انجام شد نتایج نشان داد بالاترین مقدار CDR ۸۳/۳۳ در کشت خیارو پایین‌ترین مقدار ۱۱/۲۹ خاک جنگلی ثبت شد، بنابراین کاربری کشاورزی به طور قابل توجهی باعث کاهش مواد آلی و افزایش CDR می‌شود.

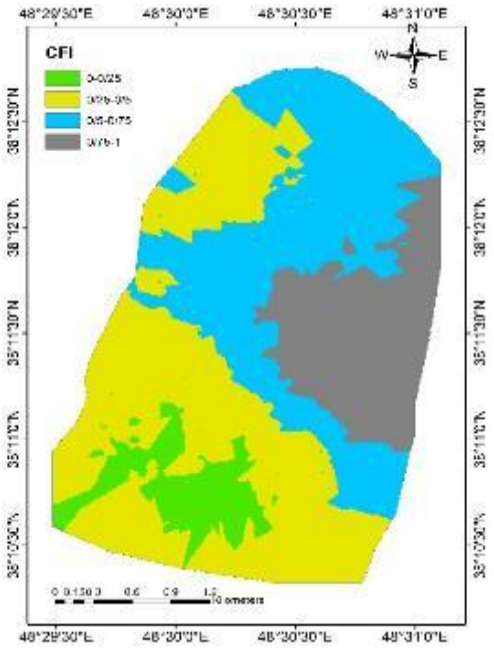
به نسبت‌های پراکندگی رس بیشتر از ۰/۵ بسیار پراکنده، بین ۰/۳ تا ۰/۵ پراکندگی متوسط، بین ۰/۱۵ تا ۰/۳ کمی پراکنده و کمتر از ۰/۱۵ غیر پراکنده اطلاق می‌شود. با توجه به داده‌های مربوط به CDR منطقه مطالعاتی، می‌توان نتیجه گرفت که رس‌ها در ۴۶ درصد از منطقه مطالعاتی بسیار پراکنده، در ۳۰ درصد پراکندگی متوسط و در ۲۴ درصد دارای پراکندگی کم یا غیر پراکنده هستند. همانطور که در نقشه کلاس‌بندی (شکل ۶) مشاهده می‌شود، ۴۶ درصد (مناطق قرمز و سبز) این منطقه که اکثرا در موقیت‌های جنوبی و مرکزی منطقه مشاهده می‌شوند در وضعیت بسیار پراکنده قرار دارند و ۳۰ درصد این منطقه (مناطق زرد) که بیشتر در مناطق مرکزی و غربی مشاهده می‌شوند در وضعیت پراکندگی متوسط قرار دارند و تنها ۲۴درصد از این منطقه (مناطق آبی) که بیشتر در مناطق شمالی و شمال شرقی این منطقه مشاهده می‌شوند در وضعیت کمی پراکنده و غیر پراکنده قرار دارند که علت اصلی این امر را می‌توان به کمبود شدید کربن آلی در منطقه مورد مطالعه و مدیریت زراعی نامناسب در این منطقه نسبت داد.

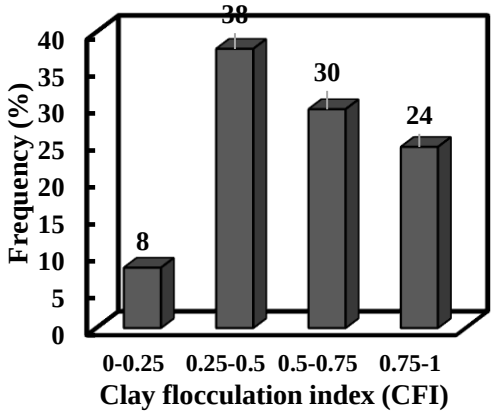
۶-۳- شاخص هماوری رس (CFI)

این شاخص برای اندازه‌گیری میزان هماوری ذرات رس خاک استفاده می‌شود و به میزان تجمع و ترکیب رس‌ها در خاک اشاره دارد. شاخص هماوری رس(CFI) در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۰/۹۳-۰/۰۶ قرار داشت. میانگین و

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

مد داده‌ها به ترتیب برابر ۰/۵۳ و ۰/۵۰ به دست آمد. میزان شاخص هماوری رس در ۴ گروه شامل ۰/۲۵-۰، ۰/۵۰-۰/۲۵، ۰/۷۵-۰/۵۰ و ۱-۰/۷۵ طبقه‌بندی شد (شکل۷). میزان فراوانی در این گروه‌ها به ترتیب برابر ۸، ۳۸، ۳۰ و ۲۴ درصد بود.





شکل ۷- توزیع فراوانی و نقشه کلاس‌بندی CFI در خاک های مورد مطالعه

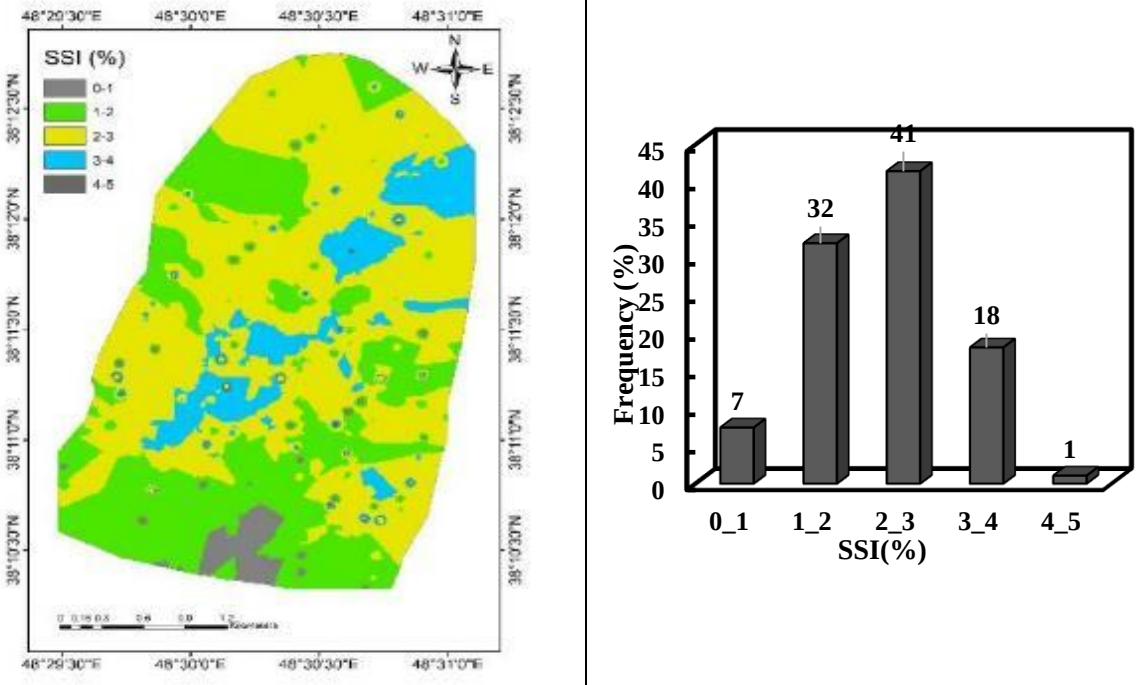
شاخص هماوری رس خاک (CFI) یک پارامتر حیاتی است که رفتار لخته سازی ذرات رس را در محیط های مختلف کمی می کند. این شاخص تحت تأثیر عواملی مانند میزان رس، میزان کربن آلی، قدرت یونی، pH و نوع کاتیون های موجود است.

هر چه CFI بالا باشد میزان پایداری خاکدانه‌ها بالا می‌رود به عبارت دیگر در صورتی که میزان CFI در یک خاک بیشتر از ۰/۵ باشد، چنین خاکی از لحاظ هماوری ذرات رس در شرایط مناسبی قرار دارد و اگر میزان CFI پائین‌تر از ۰/۵درصد باشد، چنین خاکی از لحاظ هماوری ذرات رس در وضعیت نامناسبی می‌باشد. با توجه به داده‌های مربوط به CFI در منطقه مورد مطالعه می‌توان نتیجه گرفت که هماوری ذرات رس در ۵۴ درصد از منطقه مطالعاتی مناسب و در ۴۶ درصد از این منطقه نامناسب می‌باشد. همانطور که در نقشه کلاس‌بندی (شکل ۷) مشاهده می‌شود، ۵۴ درصد (مناطق آبی و توسی) این منطقه CFI قابل قبول داشته و ۴۶ درصد این منطقه (مناطق زرد و سبز) دارای CFI کمتر از ۰/۵ بوده و هماوری رس‌ها در این مناطق پائین می‌باشد.

۷-۳- شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI)

شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI) در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۴/۴۵-۰/۱۳ درصد قرار داشت. میانگین و مد داده‌ها به ترتیب برابر ۲/۲۳ و ۲/۶۷ درصد به دست آمد. میزان شاخص پایداری ساختمان خاک در ۵گروه شامل ۰-۱، ۱-۲، ۲-۳، ۳-۴ و ۴-۵ درصد طبقه‌بندی شد (شکل۸). میزان فراوانی در این گروه‌ها به ترتیب برابر ۷، ۳۲، ۴۱، ۱۸ و ۱ درصد بود.

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]



شکل ۸- توزیع فراوانی و نقشه کلاس‌بندی شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI) در خاک‌های مورد مطالعه

شاخص پایداری خاک (SSI) تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله ویژگی‌های خاک، شیوه‌های مدیریتی و شرایط محیطی است. درک این تأثیرات برای افزایش انعطاف پذیری خاک و جلوگیری از تخریب بسیار مهم است. شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI) به منظور حفظ ساختمان خاک، کربن‌آلی را به عنوان تأثیرگذارترین عامل در نظر می‌گیرد همچنین با افزایش میزان رس خاک میزان این شاخص افزایش پیدا می‌کند. افزایش محتوای کربن‌آلی خاک منجر به اتصال فیزیکی و شیمیایی ذرات اولیه در خاکدانه‌ها می‌شود که این امر منجر به افزایش پایدرای خاکدانه‌ها شده و از شکستن خاکدانه‌ها و فرسایش خاک تا حدودی ممانعت به عمل می‌آورد (Emerson, 1997). Shahab و همکاران (2011) در پژوهشی شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI) را شاخص موثر بر کیفیت خاک اراضی کشاورزی و مرتعی جنوب مشهد معرفی کردند.

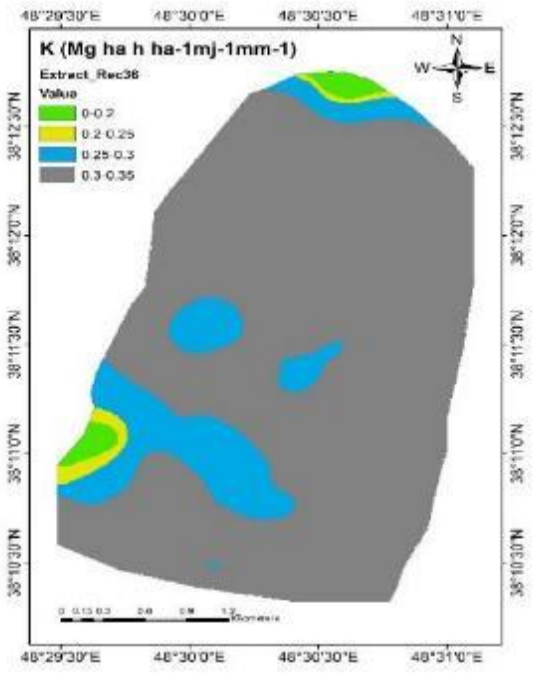
مقادیر بالای SSI نشان دهنده پایداری بیشتر هستند. افزودن کربن آلی خاک به روش‌های مختلف و استفاده از روش‌های مختلف خاکورزی، مانند بدون خاکورزی(NT) و خاکورزی حداقل(CT) می‌تواند به طور قابل توجهی پایداری ساختمان خاک را با افزایش تشکیل خاکدانه‌ها بهبود بخشد (Mikha et al., 2024).

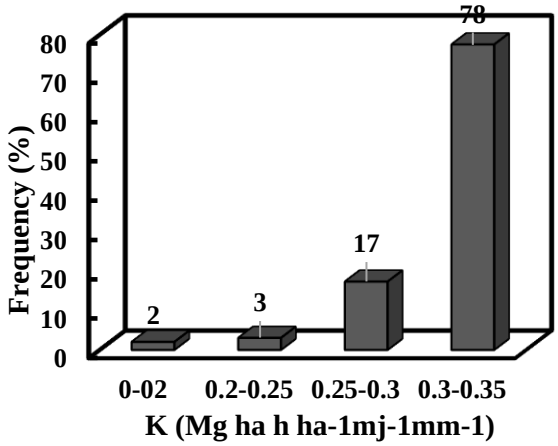
با توجه به مطالب فوق و داده‌های مربوط به SSI در منطقه مطالعاتی، میزان شاخص پایداری ساختمان خاک در ۸۰ درصد از این منطقه کمتر از ۳درصد بوده و ساختمان ناپایداری دارند و تنها در ۲۰ درصد از این منطقه مقدار SSI بیشتر از ۳درصد می‌باشد. همانطور که در نقشه کلاس‌بندی (شکل ۸) مشاهده می‌شود، اکثریت این منطقه دارای میزان پایداری ساختمان یائینی می‌باشد و تنها در بخش محدودی از مناطق مرکزی و شمال شرقی (مناطق آبی و توسی پررنگ) این منطقه میزان SSI قابل قبول می‌باشد که علت این امر را تا حدود زیادی به میزان رس و کربن آلی بالا و سیلت پائین این دو منطقه می‌توان نسبت داد.

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

۸-۳- فرسایش‌پذیری خاک (K)

به جداشدن و از هم پاشیدن ذرات از لایه سطحی خاک در اثر رواناب سطحی یا برخورد قطرات باران فرسایش‌پذیری خاک گفته می‌شود و یک پارامتر حیاتی برای ارزیابی پتانسیل فرسایش خاک می‌باشد (Ahmadi et al, 2019). فرسایش پذیری در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۰/۰۴۷-۰/۳۳۳ مگاگرم ساعت در هکتار بر مگاژول میلیمتر در هکتار قرار داشت. میانگین داده‌ها برابر ۰/۳۱۰ به دست آمد. میزان فرسایش پذیری خاک در ۴ گروه شامل ۰/۲-۰، ۰/۲۵-۰/۲، ۰/۳-۰/۳۵ و ۰/۳۵-۰/۴۲۵ طبقه‌بندی شد (شکل۹). میزان فراوانی در این گروه‌ها به ترتیب برابر ۲، ۳، ۱۷ و ۷۸ درصد بود.





شکل ۹- توزیع فراوانی و نقشه کلاس‌بندی K در خاک های مورد مطالعه

با توجه به مطالب فوق و داده‌های مربوط به K در منطقه مطالعاتی، میزان فرسایش‌پذیری در۷۸ درصد از این منطقه بیشتر از ۰/۳ مگاگرم ساعت در هکتار بر مگاژول میلیمتر در هکتار بوده و به شدت مستعد فرسایش می‌باشد و تنها در ۲۲درصد از این منطقه مقدار K کمتر از ۰/۳ می‌باشد. همانطور که در نقشه کلاس‌بندی (شکل ۹) نشان داده شده، اکثریت این منطقه دارای سطوح فرسایش پذیری بالایی می‌باشد و تنها در بخش محدودی از مناطق شمالی و جنوب غربی(مناطق سبز، زرد، آبی) این منطقه میزان K اندکی پائین می‌باشد که علت این امر را تا حدود زیادی به میزان رس بالا و سیلت پائین این دو منطقه می‌توان نسبت داد.

۹-۳- همبستگی پیرسون بین خصوصیات فیزیکی وشیمیایی خاک و پارامترهای برآورد شده در منطقه مورد مطالعه:

در جدول شماره ۳ ضرایب همبستگی بین خصوصیات مورد بررسی خاک ارائه شده است.

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

جدول۳- ضرایب همبستگی بین خصوصیات مختلف برآورد شده در منطقه مطالعاتی

	OC	Sand	Clay	Silt	WDSi	WDC	DR	CDR	CFI	SSI	K
OC	۱	-۰/۲۷۱**	۰/۰۲۸^{ns}	۰/۲۹۱**	۰/۲۴۶*	-۰/۱۹۱^{ns}	-۰/۲۶۶**	-۰/۲۳۶*	۰/۲۳۶*	۰/۹۵۲**	۰/۱۹۹^{ns}
SAND		۱	-۰/۵۲۷**	-۰/۷۳۳**	-۰/۶۴۶**	۰/۰۵۴^{ns}	۰/۵۵۰**	۰/۳۲۲**	-۰/۳۲۲**	۰/۰۱۵^{ns}	-۰/۵۷۸**
Clay			۱	-۰/۱۹۱^{ns}	۰/۰۱۴^{ns}	۰/۴۲۵**	-۰/۲۶۷**	۰/۰۳۷^{ns}	-۰/۰۳۷^{ns}	-۰/۱۳^{ns}	۰/۱۵۹^{ns}
Silt				۱	۰/۷۳۵**	-۰/۴۰۳**	-۰/۴۲۲**	-۰/۴۰۲**	۰/۴۰۲**	۰/۰۸۶^{ns}	۰/۵۴۱**
WDSi					۱	-۰/۶۳۴**	-۰/۱۳۵^{ns}	-۰/۷۰۹**	۰/۷۰۹**	۰/۰۶۴^{ns}	۰/۴۳۳**
WDC						۱	۰/۲۷۳**	۰/۹۰۰**	-۰/۹۰۰**	-۰/۱۸۱^{ns}	-۰/۱۰۷^{ns}
DR							۱	۰/۴۵۹**	-۰/۴۵۹**	-۰/۱۱^{ns}	-۰/۳۵۸**
CDR								۱	-۱/۰۰۰**	-۰/۱۵^{ns}	-۰/۲۴۰*
CFI									۱	۰/۱۵^{ns}	۰/۲۴۰*
SSI										۱	۰/۰۳۸^{ns}
K											۱

*، **، ns به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد و غیر معنی دار.

همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بین کربن‌آلی خاک و شن‌کل و شاخص پرکندگی (DR) مشاهده می‌شود همچنین همبستگی مثبت و معنی دار در سطح احتمال یک درصد بین کربن‌آلی خاک و سیلت کل و شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI) مشاهده می‌شود و همبستگی مثبت و معنی دار در سطح احتمال پنج درصد بین کربن‌آلی خاک و سیلت قابل انتشار در آب و شاخص CFI وجود دارد و بین کربن‌آلی خاک و شاخص CDR همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد مشاهده می‌شود. پایداری خاکدانه در حفظ و ترسیب کربن‌آلی خاک نقش کلیدی ایفا می‌کند (Abrar et al, 2020). Asadi fard و همکاران (2023) دریافتند که بین کربن‌آلی خاک و شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI) همبستگی مثبت و معنی‌دار شدید (۹۰٪) در سطح احتمال یک درصد وجود دارد.

همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بین شن کل با رس کل، سیلت کل، سیلت قابل انتشار در آب، شاخص CFI و K مشاهده می‌شود. همچنین همبستگی مثبت و معنی دار در سطح احتمال یک درصد بین شن کل و شاخص DR و CDR وجود دارد؛ نتایج فوق با نتایج مطالعه Igwe & Udegbunam (2008) و Saman & Rashid (2016) دارای مطابقت می‌باشد.

همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بین رس‌کل و شاخص پرکندگی(DR) مشاهده می‌شود. همچنین همبستگی مثبت و معنی دار در سطح احتمال یک درصد بین رس‌کل و رس قابل انتشار در آب وجود دارد. رس خاک به دلیل خاصیت چسبندگی و سطح ویژه بالا در تشکیل و پایداری خاکدانه بسیار نقش مهمی ایفا می‌کند؛ Uravka و همکاران (1962) در پژوهشی نشان دادند که با افزایش میزان رس، پایداری خاکدانه‌ها بیشتر می‌شود. همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بین سیلت کل با رس قابل انتشار در آب، شاخص DR و شاخص CDR مشاهده

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

می‌شود. همچنین همبستگی مثبت و معنی دار در سطح احتمال یک درصد بین سیلت کل و سیلت قابل انتشار در آب و شاخصCFI مشاهده می‌شود؛ نتایج فوق با نتایج همبستگی مطالعه Yang و همکاران (2024) مطابقت دارد.

همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بین سیلت قابل انتشار در آب و رس قابل انتشار در آب و شاخص CDR مشاهده می‌شود همچنین همبستگی مثبت و معنی دار در سطح احتمال یک درصد بین سیلت قابل انتشار در آب و شاخصCFI وجود دارد. همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بین رس قابل انتشار در آب و شاخص CFI وجود دارد همچنین همبستگی مثبت و معنی دار در سطح احتمال یک درصد بین رس قابل انتشار در آب و شاخص‌های DR و CDR مشاهده می‌شود. بین شاخص DR و شاخص CFI همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد وجود دارد و بین دو شاخص DR و CDR همبستگی مثبت و معنی دار در سطح احتمال یک درصد مشاهده می‌شود. همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بین شاخص CDR و شاخص CFI وجود دارد. وجود روابط همبستگی بین شاخص‌های پایداری و ناپایداری خاکدانه‌ها در تحقیقات متعددی گزارش شده است، به عنوان مثال در مطالعه‌ی Morade و همکاران (۱۳۹۳) وجود روابط همبستگی معنی‌دار منفی بین شاخص‌های پایداری و ناپایداری خاکدانه‌ها گزارش شد؛ به بیانی دیگر با افزایش عددی شاخص‌های عددی ناپایداری خاکدانه‌ها، مقادیر شاخص‌های ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین نتایج همبستگی پیرسون در مطالعه Igwe & Udegbunam (2008) با نتایج همبستگی پیرسون برای داده‌های WDC, WDSi, DR, CDR, CFI در این مطالعه مطابقت دارد.

همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بین فرسایش‌پذیری خاک با شاخص DR و شن کل مشاهده می‌شود، همچنین همبستگی مثبت و معنی دار در سطح احتمال یک درصد بین فرسایش‌پذیری خاک با سیلت کل و سیلت قابل انتشار در آب مشاهده می‌شود و همبستگی مثبت و معنی دار در سطح احتمال پنج درصد بین فرسایش‌پذیری خاک با شاخص CFI و میزان رطوبت خاک وجود دارد و بین فرسایش‌پذیری خاک با شاخص CDR، همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد مشاهده شد. وجود روابط همبستگی بین فرسایش پذیری و پایداری خاک در تحقیقات متعددی گزارش شده است. به عنوان مثال در مطالعه‌ی Stanchi و همکاران (2012) وجود روابط همبستگی مثبت معنی‌دار بین فرسایش‌پذیری خاک با تخریب خاکدانه‌ها و هدررفت خاک گزارش شد. نتایج پژوهشی دیگر نشان داد که سطوح بالای WDC ارتباط مثبتی با افزایش فرسایش پذیری خاک دارد، همانطور که در شرق نیجریه مشاهده می شود، جایی که خاک هایی با نسبت پراکندگی رسی بالا پتانسیل فرسایش قابل توجهی را نشان می‌دهند (Igwe, 2005).

۴- بحث و نتیجه‌گیری

با در نظر گرفتن اینکه خاکدانه‌های درشت و پایدار در اراضی ایران در اقلیت می‌باشند و به دلیل کمبود کربن‌آلی، اکثر اراضی کشور متشکل از خاکدانه‌های ریز و ناپایدار می‌باشند این موضوع در خاک‌های منطقه مطالعاتی که دارای کربن آلی کمتراز میانگین کشوری و استانی می‌باشد تشدید می‌شود؛ همچنین با توجه به این نکته که میزان فرسایش و هدررفت خاک با افزایش پلیداری خاک، کاهش پیدا می کند (Rohipour et al, 2004). بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که اراضی مورد مطالعه پایداری کمی داشته و در مقابل فرسایش آبی و بادی به شدت آسیب‌پذیر می‌باشد و همبستگی‌های بدست آمده از آنالیز داده‌ها با مطالب فوق دارای هماهنگی می‌باشند.

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

این اراضی اکثراً بافتی رسی یا نزدیک به رسی داشته و با توجه به تخلیه ماده‌آلی در اثر کشاورزی در طول زمان در این مناطق و مشاهده کمبود کربن‌آلی در ۷۶ درصد این منطقه، انتظار می‌رود فرآیند خاکدانه سازی در این منطقه ضعیف بوده و حتی با توجه به نتایج آزمایشات می‌توان احتمال داد برخی خاکدانه ها متلاشی شده‌اند و به این دلایل میزان رس و سیلت کل و قابل انتشار در آب در این مناطق بیشتر است.

رس قابل انتشار به عنوان یک شاخص بسیار مهم در اندازه‌گیری فرسایش خاک به حساب می‌آید و با توجه به مقادیر بالای این پارامتر در این منطقه بنابراین این منطقه در معرض فرسایش بادی و آبی قرار دارد البته با در نظر گرفتن مشاهدات میدانی و سرعت بالای باد به خصوص در روزهای خشک سال در این منطقه تخلیه عناصر غذایی به همراه ذرات خاک در اثر حمل توسط باد محتمل می‌باشد.

هر چه میزان شاخص‌های DR و CDR و WDC و WDSI و K کمتر باشد و در مقابل هر چه میزان شاخص‌های SSI و CFI و OC بیشتر باشد، پایداری خاک بالا بوده و در برابر فرسایش مقاومت بیشتری دارد لذا با توجه به داده‌های مربوط به شاخص‌های فوق در این منطقه، می‌توان احتمال داد که پایداری خاک در این منطقه ضعیف می‌باشد و این اراضی در برابر عوامل فرسایش به شدت آسیب‌پذیر می‌باشد. همچنین از نقش غیر قابل انکار کربن آلی در تمامی پارامترها و شاخص‌های فوق نمی‌توان چشم پوشی کرد، کربن آلی تمامی پارامترها و شاخص‌های مورد مطالعه را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد و با بالا بردن پایداری خاک، مقاومت خاک در برابر فرسایش را افزایش می‌دهد.

افزایش کربن آلی خاک و اتخاذ مدیریت زراعی مناسب از جمله به کارگیری روش‌های کشت و کار بدون خاکورزی و خاکورزی حداقل، از راهکارهای مناسب برای حفاظت از این اراضی می‌باشد.

سپاسگذاری

این مقاله مستخرج از پایان نامه اینجانب مرتضی خانزاده می‌باشد، بدین وسیله از زحمات اساتید راهنما و مشاورم تشکر می‌کنم و از دانشگاه محقق اردبیلی به منظور تأمین مالی و آزمایشگاهی این پژوهش سپاسگزارم.

منابع

1. Asghari, Sh., Shahab Arkhazloo, H., & Hasanpour Kashani, M . (2024). Geostatistical analysis of soil penetration resistance and shear strength in Fandoghloo region of Ardabil. *Journal of Environmental Erosion Research*. 2024; 14 (2) :106 -125 . http//doi.org/
2. Abrar, M. M., Xu, M., Shah, S. A. A., Aslam, M. W., Aziz, T., Mustafa, A., & Ma, X. (2020). Variations in the profile distribution and protection mechanisms of organic carbon under long-term fertilization in a Chinese Mollisol. *Science of the Total Environment*, 723, 138181.
3. Adornado, H.A., Yoshida, M., & Apolinares, H. (2009). Erosion Vulnerability Assessment in REINA, Quezon Province, Philippines with Raster-based Tool Built within GIS Environment. J. Agric. Res.
4. Ahmadi, F., Nosrati, K., & Hosseinzadeh., M.H. (2019). Determining the contribution of erodible soil units in sediment production and its relationship with soil organic carbon storage in the Kohdasht watershed, Lorestan province. *Hydrogeomorphology* , 6 (20), 141-164. (*in Persian*)

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

5. Asadi Fard, Z., Ahmadi, A., Jafarzadeh, A. A., Karami, A., & AlaviKia, S. (2023). Evaluation and Determination of the Most Effective Index on Soil Sensitivity to the Surface Sealing Using Ridge Regression. *Water and Soil Science*, *34*(1), 149-162. (*in Persian*)
6. Ayoubi, SH., Milikian, A., Mosaddeghi, M.R., Zeraatpisheh, M., & Zhao, Sh. (2022). Impacts of Clay Content and Type on Shear Strength and Splash Erosion of Clay–Sand Mixtures. Minerals, doi: 10.3390/min12111339.
7. Balci, A. N. (1998). Soil conservation. I. U. Forestry Faculty Publication Number: 439, Istanbul University Press, Istanbul.
8. Charles, A., Igwe. (2005). 1. Erodibility in relation to water-dispersible clay for some soils of eastern Nigeria. *Land Degradation & Development*, doi: 10.1002/LDR.647.
9. Curtin, D., Steppuhn, H., & Selles, F. (1994). Effects of magnesium on cation selectivity and structural stability of sodic soils. *Soil science society of America journal*, 58(3), 730-737.
10. Deborah, F., Kuhwald, M., Saggau, Ph., & Duttmann, R. (2024). 1. Using machine learning to model Soil Aggregate Stability as an indicator for soil erosion susceptibility at the catchment scale. doi: 10.5194/egusphere-egu24-16301.
11. Emerson, WW. (1977). Physical properties and structure. Soil factors in crop production in a semi-arid environment. Pp. 78–104. In: Russell JS and Greacen EL (eds). University of Queensland Press, St. Lucia, QLD, Australia.
12. Ghidey, F., & Alberts, E. E. (1997). Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength and aggregate stability. *American Society of Agricultural Engineers*. Vol, 40. pp: 135-129.
13. Goldberg, S., Kapoor, B.S., & Rhoades, J.D. (1990). Effect of aluminum and iron oxides and organic matter on flocculation and dispersion of arid zone soils . J. Soil Sci. 150: 588-593.
14. Handayani, I., & Widiastuti, H. (2022). 4. Evaluating Land Sustainability Indicators Through Structural Stability Changes In Deforested Land. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, doi: 10.1088/1755-1315/995/1/012007
15. Igwe, C. A., & Udegbunam, O. N. (2008). Soil properties influencing water-dispersible clay and silt in an Ultisol in southern Nigeria. *International Agrophysics*, *22*(4), 319-325.
16. Jafari, S., Bardbar, E., & Ghanian, M. (2019). Comparison of the results of three methods of measuring the amount of spreadable clay in Khuzestan soils. *Iran Water and Soil Research* , 50 (1), 123-134. (*in Persian*)
17. Kirchmeir, H., & Berger, V. (2019). Development of land cover and erosion risk map based on remote sensing for Tusheti protected areas. E.C.O. *Institute of Ecology*, GIZ.
18. Lipiec, J., Usowicz, B., Kłopotek, J., Turski, M., & Frąc, M. (2021). Effects of Application of Recycled Chicken Manure and Spent Mushroom Substrate on Organic Matter, Acidity, and Hydraulic Properties of Sandy Soils. Materials, 14(14), 4036.
19. Mark, N., Wuddivira, R., Stone, J., & Ekwue, E.I. (2009). Clay, organic matter, and wetting effects on splash detachment and aggregate breakdown under intense rainfall.. *Soil Science Society of America Journal*, doi: 10.2136/SSSAJ2008.0053.
20. Masnang, A., Jannah, A., Andriyanty, R., & Haryati, U. (2022). The Effectiveness and Valuation of Using Silt Pit to Reduce Erosion and Nutrient Loss of Andosol. *Journal of Tropical Soils*, doi: 10.5400/jts.2022.v27i1.27-35.
21. McManis, K. (2003). Identification and stabilization methods for problematic silt soils : a laboratory evaluation of modification and stabilization additives : technical summary.
22. Mikha, M., Green, T., Tyler, J., & Gary, W. (2024). Soil Structural Stability Influenced by Land Management. doi: 10.5194/egusphere-egu24-1343.

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]

23. Molina, N. C., Caceres, M. R., & Pietroboni, A. M. (2001). Factors affecting aggregate stability and water dispersible clay of recently cultivated semiarid soils of Argentina Arid Land Res. And Manage. 15: 77-87.
24. Moradi, F., Khalilmoghadam, B., Jafari, S., & Qurbanidashtaki, S. (2014). Aggragates Stability Evaluation Indices and the Most Effective Soil Characteristics: Case Study in Sugarcane Agro-Industry of Khozestan. *Watershed Management Research Journal*, *27*(4), 43-53. (*in Persian*)
25. Marefati, H., Shahab Arkhazloo, H., Asgari, Sh., & Soltani Tolarood, A.A. (2024). The effect of gully erosion on integrated soil quality indices in South of Ardabil. *Journal of Environmental Erosion Research*.2024; 14 (3) :43-65. http//doi.org/
26. Rengasamy, P. (1982). Dispersion of calcium clay. Aust. J. Soil res. 20, 153-7.
27. Richter, G., & Negendank, J. (1977). Soil erosion processes and their measurement in the German area of the Moselle river. Earth Surface Processes, 2: 261–7.
28. Rohipour, H., Farzaneh, H., & Asadi, H. (2004). Investigating the relationship between some soil grain stability indicators and the soil erodibility factor using rain simulation .235-254(*in Persian*)
29. Roosta, M., Golchin, A., & Siadat, H. (2012). Investigating the effect of organic materials and calcium-containing mineral compounds on the size distribution of soil grains and the amount of dispersible clay in a sodium soil. *Soil and Water Sciences*, 15(2), 242-260. (*in Persian*)
30. Saman, M., Rasheed, K. (2016). 1. The Effect of Clay Content and Land Use on Dispersion Ratio at Different Locations in Sulaimani Governorate Kurdistan Region Iraq. *Open Journal of Soil Science*, doi: 10.4236/OJSS.2016.61001.
31. Sayara, T., Basheer Salimia, R., Hawamde, F., & Sánchez, A. (2020). Recycling of organic wastes through composting: Process performance and compost application in agriculture. *Agronomy*, 10(11), 1838.
32. Shahab, H., Emami, H., Haghnia, GH., & Karimi, A., (2011). Determining most important properties for soil quality indices of agriculture and range lands in some parts of Southern Mashhad. *Journal of Water and Soil* 25:1197-1205. (*in Persian*)
33. Shahbazi, K., & Basharti, H. (2012). An overview of soil fertility in Iran. *Journal of land management*. 10.22092/lmj.2013.100072. (*in Persian*)
34. Soane, B. D. (1990). The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. Soil Till. Res. 16: 179–201. 34. Thomas, G. W. 1996.
35. Stanchi, S., Freppaz, M., & Zanini, E. (2012). The influence of Alpine soil properties on shallow movement hazards, investigated through factor analysis, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: 1845– 1854.
36. Wischmeier, W.H., Johnson, C.B., & Cross, B.V., 1971. A soil erodibility monograph for farmland and construction sites. J. *Soil and water Cons*.,26(5): 189-193.
37. Yang, M., Qinke, Y., Keli, Zh., Guowei, P., & Chenlu, H. (2024). Global soil erodibility factor (K) mapping and algorithm applicability analysis. Catena, doi: 10.1016/j.catena.2024.107943.
38. Yarahmadi, J., Eslahi, M., Behrawan, H . , & Khosroshahi, M . (202 4). Analysis of the sand dunes mobility based on climate elements in the East Azerbaijan Province . *Journal of Environmental Erosion Research*. 2024; 14 (2) : 1 -18 . http//doi.org/

[DOI: 10.61186/jeer.14.4.146]