

(OPEN ACCESS)

**Investigating the influence of parent material and topography
on the soil-water retention curve and soil aggregate stability indicators
(Case study: parts of Khorasan Razavi Province)**

Mahmood Zare¹ , Ali Golkarian^{*2} , Hojat Emami³ , Maryam Shahrokhi⁴ 

1. M.Sc. in Watershed Management, Dept. of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: mahmoodzare@mail.um.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: golkarian@um.ac.ir
3. Professor, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: hemami@um.ac.ir
4. M.Sc. in Watershed Management, Dept. of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. E-mail: maryam.sh9674@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: Understanding the different factors on the characteristics of soil-water retention curve and soil aggregate stability can play an important role in better understanding the environmental potentials and managing natural areas. The soil-water retention curve shows the changes of moisture in different soil suctions, and the stability of soil aggregate is also an accurate indicator for evaluating soil quality in planning the optimal use of natural and agricultural areas. In most of the research conducted, these two characteristics have been investigated in agricultural soils. In the present study, considering the effect of the soil-water retention curve and aggregate stability indicators on the state of natural vegetation, as well as the effect on permeability, runoff emergence, and soil erosion, an attempt is made to investigate some of the factors affecting the two aforementioned characteristics. Parent materials and the topographic condition of the land are factors that can have a significant impact on the soil-water retention curve and soil aggregate stability. The mineralogical composition, texture and structure of the parent rock has a direct effect on the ability of the soil to retain and absorb water, permeability and characteristics of the retention curve. The topography conditions also play an important role in the distribution and maintenance of soil moisture due to its influence on hydrological processes and microclimate. In addition, topography affects the processes of soil formation and the type of vegetation, which in turn affect the soil water retention characteristics and stability of soil aggregates.
Article history: Received: 12.27.2024 Revised: 04.03.2025 Accepted: 04.15.2025	
Keywords: Geology, Khorasan Razavi, Soil Aggregates Stability, Topographic Wetness, Water Retention Curve	
	Materials and Methods: The studied area is located in Razavi Khorasan province and the cities of Mashhad, Torbat Heydarieh, Sarkhs and Chenaran. In this research, the soil characteristics of seven types of marl, limestone (Cenozoic and Mesozoic), ophiolite, shale, granite and sandstone were selected from the relatively pure rocks of Razavi Khorasan province, Using 1:100,000 geological maps from the Geological Organization of

Iran. Topographic wetness index was used to determine the factor of topographic characteristics, and this index was evaluated in two classes, positive and negative. The topographic wetness index describes the tendency of water to accumulate in any point of the sub-basin and the tendency of gravity forces to transport water downstream. The topographic wetness index is obtained from the combination of the area of the upstream basin and the slope, and it determines the effect of topography on the amount of saturation levels for the production of runoff. Based on this and according to the examination of seven types of stones, there are a total of 14 different treatments, which, including three replications for each treatment, a total of 42 samples were taken from a depth of 0-20 cm using a cylinder sampler and used to prepare a soil-water retention curve, determination of stability indicators of soil aggregates and measurement of physical and chemical properties. A pressure plate device was used to prepare the soil-water retention curve and the amount of moisture was determined in different matric suctions, including saturation and suctions of 10, 30, 50, 100, 300, 500, 1000 and 1500 kilopascals. Several indices have been used to evaluate the stability of soil aggregates, among these indices, we can refer to the weighted average of the diameter of soil aggregates in dry and wet sieving conditions, the stability index of soil aggregates and the percentage of degradation of soil aggregates.

Results: According to the results of soil-water retention curve, the highest moisture retention is related to medium texture (Loam) and the lowest is related to light textures (Sandy loam). Changes in the slope of the curve in medium soils are gradual, but in light soils it is sudden due to the presence of large pores. Also, the results showed that shale has the highest percentage of moisture in different suctions, such that at a suction of 10 kPa, they retain more than 50% moisture. After that, marl, Jurassic limestone, Paleogene limestone show the highest amount of moisture percentage and sandstone, with only 20% moisture retention at 10 kPa suction, show the lowest amount of moisture percentage in different suctions. The amount of saturated moisture in the soils of shale and marl, respectively, is the highest and is more than 50% in both of them. After that, the Jurassic limestone soils of Chenaran and Paleogene limestone of Sarakhs and ophiolite have the highest amount of saturated moisture. Granite and sandstone soils generally had the lowest amount of saturated moisture with less than 30%. Also, soils containing more silt, in terms of retention curve characteristics, have higher saturated moisture and agricultural capacity, which can be seen in marl and shale soils. Ophiolite and sandstone soils have more weight average diameter of soil aggregates than other types of rocks, with more than one millimeter. Which indicates that the percentage of silt in the soil has an inverse relationship with the average weighted diameter of the soil aggregate. It is obvious that the average weighted diameter of soil aggregates in dry state is higher than in wet state, but in the jurassic limestone soils of Chanaran, the destruction of soil aggregates was more than 80%, which indicates that soil aggregates of this rock type are more dispersed than in other soils. The percentage of clay and silt more than 60% in the Paleogene Sarakhs limestone, Jurassic Chenaran limestone, marl and shale has caused the stability of the soil aggregates in the soils of these rocks to reach less than 10%.

Conclusion: Differences in rock type can cause significant differences in the characteristics of the soil-water retention curve and aggregate stability

indicators Soils formed from them. Also a significant correlation was observed between the characteristics of the soil-water retention curve and soil aggregate stability indicators in different types of rocks. On the other hand investigating the type of limestone in the second and third geological periods showed that there is no significant difference in the investigated indicators with age change. Among the chemical properties of the soil, organic matter and among the physical properties of the soil, the texture plays a large role in the retention curve and stability indicators of soil aggregate. Finally there was no significant difference between positive and negative topographic wetness index in most of the studied variables of retention curve characteristics and soil aggregate stability indicators, which indicates the lack of influence of this factor on the studied indicators.

Cite this article: Zare, Mahmood, Golkarian, Ali, Emami, Hojat, Shahrokhi, Maryam. 2025. Investigating the influence of parent material and topography on the soil-water retention curve and soil aggregate stability indicators (Case study: parts of Khorasan Razavi Province). *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (3), 35-61.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23120.3780

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

بررسی تأثیر مواد مادری و وضعیت توپوگرافی بر خصوصیات منحنی رطوبتی و شاخص‌های پایداری خاک‌دانه‌ها (مطالعه موردی: بخش‌هایی از استان خراسان رضوی)

محمود زارع¹، علی گلکاریان^{2*}، حجت امامی³، مریم شاهرخی⁴

1. کارشناسی‌ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
رایانامه: mahmoodzare@um.ac.ir
2. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
رایانامه: golkarian@um.ac.ir
3. استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: hemami@um.ac.ir
4. کارشناسی‌ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
رایانامه: maryam.sh9674@gmail.com

چکیده	اطلاعات مقاله
سابقه و هدف: شناخت عوامل مختلف بر خصوصیات منحنی رطوبتی و پایداری خاک‌دانه‌ها می‌تواند در درک بهتر پتانسیل‌های محیطی و مدیریت عرصه‌های طبیعی نقش مهمی داشته باشد. منحنی مشخصه رطوبتی خاک، تغییرات رطوبت در مکش‌های مختلف خاک را نشان می‌دهد. هم‌چنین پایداری خاک‌دانه‌ها نیز شاخص دقیقی برای ارزیابی کیفیت خاک در برنامه‌ریزی استفاده بهینه از عرصه‌های طبیعی و زراعی است. در بیش‌تر پژوهش‌های انجام‌شده این دو مشخصه در خاک‌های زراعی موردبررسی قرار گرفته است، در پژوهش حاضر با توجه به تأثیر خصوصیات منحنی رطوبتی و پایداری خاک‌دانه‌ها بر وضعیت پوشش گیاهی طبیعی و هم‌چنین تأثیر بر نفوذپذیری، ظهور رواناب و فرسایش خاک سعی بر آن است که برخی عوامل مؤثر بر دو مشخصه مذکور موردبررسی قرار گیرد. جنس سنگ‌بستر و وضعیت توپوگرافی زمین عواملی هستند که می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌های منحنی رطوبتی خاک و پایداری خاک‌دانه‌ها داشته باشند. ترکیب کانی‌شناسی، بافت و ساختار سنگ مادر، تأثیر مستقیمی بر توانایی خاک در نگهداری و جذب آب، نفوذپذیری و خصوصیات منحنی رطوبتی دارد. وضعیت توپوگرافی نیز به دلیل تأثیر بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و میکروکلیم، نقش مهمی در توزیع و نگهداری رطوبت خاک ایفا می‌کند. علاوه بر این، توپوگرافی بر فرآیندهای تشکیل خاک و نوع پوشش گیاهی مؤثر است که این عوامل نیز به‌نوبه خود بر خصوصیات رطوبتی و پایداری خاک‌دانه‌ها تأثیرگذارند.	نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی تاریخ دریافت: 03/10/07 تاریخ ویرایش: 04/01/14 تاریخ پذیرش: 04/01/26 واژه‌های کلیدی: پایداری خاک‌دانه، خراسان رضوی، رطوبت توپوگرافی، سنگ‌شناسی، منحنی رطوبتی

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه در استان خراسان رضوی و شهرستان‌های مشهد، تربت حیدریه، سرخس و چناران قرار دارد. در این پژوهش هفت جنس سنگ مارن، آهک (در دو دوران سنوزوئیک و مزوزوئیک)، افیولیت، شیل، گرانیت و ماسه سنگ از سنگ‌های نسبتاً خالص استان خراسان رضوی با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی 1:100000 سازمان زمین‌شناسی کشور انتخاب شدند. برای تعیین عامل خصوصیات توپوگرافی از شاخص رطوبت توپوگرافی استفاده شد که این شاخص در دو کلاس مثبت و منفی مورد بررسی قرار گرفت. شاخص رطوبت توپوگرافی، گرایش آب به جمع شدن را در هر نقطه از زیرحوضه و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین‌دست توصیف می‌کند. شاخص رطوبت توپوگرافی از ترکیب مساحت حوضه بالادست و شیب به دست می‌آید و تعیین‌کننده تأثیر توپوگرافی بر روی میزان سطوح اشباع جهت تولید روان‌آب است. بر این اساس و با توجه به بررسی هفت جنس سنگ، در مجموع 14 تیمار مختلف وجود دارد که با احتساب سه تکرار برای هر تیمار در مجموع 42 نمونه از عمق 0-20 سانتی‌متری با استفاده از استوانه نمونه‌گیر برداشت شد و برای تهیه منحنی رطوبتی خاک و تعیین شاخص‌های پایداری ساختمان خاک جهت اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک آماده‌سازی گردید. برای تهیه منحنی رطوبتی خاک نمونه‌های مورد نظر از دستگاه صفحات فشاری¹ استفاده شد و مقدار رطوبت در مکش‌های ماتریک اشباع، 10، 30، 50، 100، 300، 500، 1000 و 1500 کیلو پاسکال تعیین شدند. شاخص‌های متعددی برای ارزیابی پایداری خاک‌دانه‌ها استفاده شده است، از جمله این شاخص‌ها می‌توان به میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در دو حالت الک خشک و تر، شاخص پایداری خاک‌دانه‌ها و درصد تخریب خاک‌دانه‌ها اشاره نمود.

یافته‌ها: با توجه به نتایج حاصل از منحنی‌های رطوبتی خاک بیش‌ترین نگهداشت رطوبت مربوط به بافت متوسط (لومی) و کم‌ترین مربوط به بافت سبک (شنی لومی) است. تغییرات شیب منحنی در خاک‌های متوسط تدریجی است ولی در خاک‌های سبک به دلیل وجود خلل و فرج درشت ناگهانی است. هم‌چنین نتایج نشان داد که خاک‌های حاصل از سنگ‌بستر شیل دارای بیش‌ترین مقدار درصد رطوبت وزنی در مکش‌های مختلف است به گونه‌ای که در مکش 10 کیلو پاسکال بیش از 50 درصد رطوبت را نگه می‌دارد. بعدازآن نیز مارن، آهک ژوراسیک، آهک پالئوژن بیش‌ترین مقدار درصد رطوبت وزنی در مکش‌های مختلف را از خود نشان می‌دهند و سنگ‌بستر ماسه سنگ تنها با نگهداشت 20 درصد رطوبت در مکش 10 کیلو پاسکال کم‌ترین مقدار درصد رطوبت وزنی در مکش‌های مختلف را نشان می‌دهند. مقدار رطوبت اشباع در دو جنس سنگ شیل و مارن به ترتیب بیش‌ترین مقدار و در هر دو بیش‌تر از 50 درصد می‌باشد. بعدازآن جنس سنگ‌های آهک ژوراسیک چناران و آهک پالئوژن سرخس و افیولیت دارای بیش‌ترین مقدار رطوبت اشباع می‌باشند. دو جنس سنگ گرانیت و ماسه سنگ با کم‌تر از 30 درصد، کم‌ترین مقدار رطوبت اشباع را به خود اختصاص دادند. هم‌چنین هرچه بافت خاک به سمت مرکز مثلث بافت خاک و تا حدودی متمایل به سیلت باشد از نظر

ویژگی‌های منحنی رطوبتی دارای رطوبت اشباع و ظرفیت زراعی بالاتری است که نمونه آن در جنس سنگ‌های مارن و شیل مشهود است. جنس سنگ افیولیت و ماسه‌سنگ با بیش از یک میلی‌متر دارای میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های بیش‌تری نسبت به بقیه جنس سنگ‌ها هستند. که نشان‌دهنده این است که درصد سیلت در خاک رابطه معکوسی با میانگین وزنی قطر خاکدانه دارد. بدیهی است که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت خشک بیش‌تر از حالت تر باشد ولی در جنس سنگ‌آهک ژوراسیک چناران تخریب خاکدانه‌ها بیش از ۸۰ درصد بود که نشان‌دهنده پاشیده شدن بیش‌تر خاکدانه‌های این جنس سنگ نسبت به دیگر خاک‌ها می‌باشد. رس و سیلت بیش از ۶۰ درصد در خاک‌هایی با جنس سنگ‌آهک پالئوژن سرخس، آهک ژوراسیک چناران، مارن و شیل باعث شده است که درصد پایداری خاکدانه این جنس سنگ‌ها به کم‌تر از ۱۰ درصد برسد.

نتیجه‌گیری: تفاوت در جنس سنگ می‌تواند سبب بروز تفاوت‌های معنی‌داری در خصوصیات منحنی رطوبتی و شاخص‌های پایداری ساختمان حاصل از آن‌ها گردد. هم‌چنین همبستگی معنی‌داری بین خصوصیات منحنی رطوبتی خاک و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها در جنس سنگ‌های مختلف مشاهده شد. از سویی دیگر بررسی جنس سنگ‌آهک در دوران‌های دوم و سوم زمین‌شناسی جهت تعیین نقش سن در متغیرهای موردبررسی نشان داد که تفاوت معنی‌داری در شاخص‌های موردبررسی با تغییر سن وجود ندارد. از بین خصوصیات شیمیایی خاک، ماده آلی و از بین خصوصیات فیزیکی خاک بافت نقش زیادی در منحنی رطوبتی و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها نشان دادند. درنهایت در اغلب متغیرهای موردبررسی از خصوصیات منحنی رطوبتی و شاخص‌های پایداری ساختمان خاک در رطوبت توپوگرافی مثبت و منفی تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد که این موضوع بیانگر عدم تأثیر این عامل در شاخص‌های موردبررسی است.

استناد: زارع، محمود، گلکاریان، علی، امامی، حجت، شاهرخی، مریم (۱۴۰۴). بررسی تأثیر مواد مادری و وضعیت توپوگرافی بر خصوصیات منحنی رطوبتی و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها (مطالعه موردی: بخش‌هایی از استان خراسان رضوی). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۲ (۳)، ۶۱-۳۵.

DOI: 10.22069/jwsc.2026.23120.3780



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

شناخت عوامل مختلف مؤثر بر خصوصیات منحنی رطوبتی و پایداری خاک‌دانه‌ها می‌تواند در درک بهتر پتانسیل‌های محیطی و مدیریت عرصه‌های طبیعی نقش مهمی داشته باشد. در بیش‌تر پژوهش‌های انجام‌شده این دو مشخصه در خاک‌های زراعی موردبررسی قرار گرفته است، در پژوهش حاضر با توجه به تأثیر خصوصیات منحنی رطوبتی و پایداری خاک‌دانه‌ها بر وضعیت پوشش گیاهی طبیعی و همچنین تأثیر بر نفوذپذیری، ظهور رواناب و فرسایش خاک سعی بر آن است که برخی عوامل مؤثر بر دو مشخصه مذکور موردبررسی قرار گیرند. مدیریت صحیح مراتع در خصوص حفظ پوشش گیاهی موجود و توسعه و استقرار پوشش گیاهی جدید بستگی کاملی به پتانسیل عرصه‌های طبیعی در تأمین منابع آب موردنیاز گیاه دارند. همچنین یکی از داده‌های ورودی تعیین‌کننده در بسیاری از مدل‌های برآورد میزان فرسایش و رسوب، وضعیت رطوبت پیشین و پتانسیل نفوذپذیری خاک بوده که هر دو ارتباط تنگاتنگی با خصوصیات منحنی رطوبتی و شاخص‌های پایداری خاک‌دانه‌ها دارند.

منحنی مشخصه رطوبتی، تغییرات رطوبت در مکش‌های مختلف خاک را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که در مکش‌های پایین، تغییرات جزئی در مقدار رطوبت با تغییرات کم پتانسیل ماتریک همراه است، اما در مکش‌های بالا، تغییرات جزئی در مقدار رطوبت، تغییرات زیادی را در پتانسیل ماتریک ایجاد می‌کند (1). از عوامل مؤثر بر خصوصیات منحنی رطوبتی خاک می‌توان به بافت خاک اشاره کرد. هرچه مقدار رس بیش‌تر باشد رطوبت موجود در نیروی مکش معین بیش‌تر خواهد بود و تغییرات شیب منحنی نیز

تدریجی است اما در خاک‌های شنی به‌دلیل این‌که بسیاری از خلل و فرج‌ها درشت هستند وقتی نیروی مکش متناسب با قطر آن‌ها اعمال شود، بخش عمده آب آن‌ها خالی می‌شود و بنابراین تغییرات شیب منحنی نیز تند می‌باشد. همچنین ارتباط نزدیکی بین مقادیر شن، رس و جرم ویژه ظاهری با رطوبت حجمی خاک در نقاط مختلف منحنی رطوبتی مشاهده شد (2). در مطالعه‌ای دیگر تأثیر چرخه‌های خشک و مرطوب شدن چندگانه بر منحنی رطوبتی خاک‌های گرانیتهی موردبررسی قرار گرفت. در این پژوهش، نمونه‌های خاک گرانیتهی دست‌نخورده تحت چرخه‌های متعدد خشک شدن و مرطوب شدن قرار گرفتند و تغییرات منحنی رطوبتی و توزیع اندازه منافذ خاک موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ظرفیت نگهداشت آب و مقدار ورودی هوا در این خاک‌ها با افزایش تعداد چرخه‌های خشک و مرطوب شدن کاهش می‌یابد و پس از چهارچرخه به حالت تقریباً ثابت می‌رسد این موضوع نقش توپوگرافی بستر در چرخه‌های خشک و تر شدن را نشان می‌دهد (3).

در مطالعه‌ای جهت تعیین منحنی رطوبتی خاک یک روش جدید از طریق منحنی‌های بافت خاک، چگالی ظاهری و ظرفیت زراعی معرفی شد. محققین پارامترهای مدل ون گنوجتن (VG) شامل محتوای آب اشباع، α و m از اطلاعات بافت خاک، چگالی ظاهری و محتوای آب در ظرفیت زراعی را محاسبه کردند. محتوای آب باقی‌مانده را نیز از منحنی هدایت حرارتی نسبت به محتوای آب تخمین زدند. آن‌ها این روش را با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و میدانی بر روی 23 نوع خاک ارزیابی کردند و نتایج نشان داد که این روش می‌تواند منحنی رطوبتی را با دقت خوبی تخمین بزند (4).

اثر بخشی شبکه‌های عصبی عمیق¹ (DNN) در پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک با استفاده از مدل‌های مختلف با ترکیب‌های متفاوت از پارامترهای ورودی سه‌ل الوصول مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی پژوهش ارزیابی تفاوت استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق و سطحی² (SNN) در دقت پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی بود. نتایج نشان داد که مدل‌هایی که با پارامترهای بافت خاک و تخلخل خاک به‌عنوان پارامترهای ورودی تقویت می‌شوند، عملکرد بهتری دارند. در مقابل، پارامترهایی مانند وزن مخصوص، عمق خاک و محتوای آلی به‌طور قابل‌توجهی به قابلیت پیش‌بینی مدل‌ها اضافه نمی‌کنند (5).

ساختمان خاک حاصل آرایش ذرات خاک در کنار یکدیگر و اتصال این ذرات به‌وسیله نیروهای چسبنده است. دو عامل مهم که می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر این خصوصیات داشته باشند، سنگ‌بستر و وضعیت توپوگرافی هستند. این عوامل به‌دلیل تأثیر بر فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری و قابلیت بهره‌برداری از خاک دارند (6). سنگ‌بستر به‌عنوان منبع اصلی تشکیل‌دهنده خاک، تأثیر به‌سزایی در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دارد. ترکیب کانی‌شناسی، بافت و ساختار سنگ مادر، تأثیر مستقیمی بر توانایی خاک در نگهداری و جذب آب، نفوذپذیری و خصوصیات منحنی رطوبتی دارد (7). به‌عنوان مثال: خاک‌های تشکیل‌شده از سنگ‌های آذرین مثل بازالت و گرانیت به دلیل داشتن ترکیب‌های معدنی مختلف، رفتار رطوبتی متفاوتی نشان می‌دهند. خاک‌های بازالتی معمولاً دارای ظرفیت نگهداری آب بالاتری هستند درحالی‌که خاک‌های گرانیتی به‌دلیل داشتن ساختار دانه‌ای درشت، نفوذپذیری

بیش‌تری دارند (8). میزان هوازدهی سنگ‌بستر می‌تواند بر هدایت هیدرولیکی اشباع و منحنی رطوبتی خاک مؤثر باشد بر اساس پژوهشی که در شمال ژاپن انجام شد و در آن محتوای حجم آب و هدایت هیدرولیکی اشباع در سه کلاس هوازدهی (ضعیف، متوسط و شدید) اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع و نگهداشت رطوبت خاک در کلاس‌های مختلف هوازدهی سنگ‌بستر الگوهای متمایزی را نشان می‌دهند. در کلاس هوازدهی ضعیف و متوسط، مقادیر هدایت هیدرولیکی پایین و تغییر کمی در محتوای حجم آب مشاهده شد، درحالی‌که در کلاس هوازدهی شدید، مقادیر هدایت هیدرولیکی متوسط و تغییرات بزرگی در محتوای حجم آب به چشم می‌خورد در این راستا سنگ‌بسترهای مختلف با درجه هوازدهی متفاوت می‌تواند در منحنی رطوبتی خاک مؤثر باشد (9).

وضعیت توپوگرافی نیز به دلیل تأثیر بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و میکروکلیم، نقش مهمی در توزیع و نگهداری رطوبت خاک ایفا می‌کند. علاوه بر این، توپوگرافی بر فرآیندهای تشکیل خاک و نوع پوشش گیاهی تأثیرگذار است که این عوامل نیز به‌نوبه خود بر خصوصیات رطوبتی و پایداری خاکدانه‌ها تأثیر می‌گذارند. توپوگرافی را می‌توان از عوامل مهم کنترل‌کننده الگوی مکانی رطوبت خاک دانست که برای فهم و درک بسیاری از تغییرات در خاک‌ها و فرآیندهای هیدرولوژیکی می‌توان از آن استفاده نمود (10).

از طرف دیگر مطالعات نشان داده‌اند که عواملی هم‌چون توزیع اندازه منافذ، شکل منافذ، درجه پیوستگی منافذ، بافت و تخلخل کل خاک، همگی می‌توانند بر خصوصیات منحنی رطوبتی خاک و

1- Deep neural network

2- Shallow neural network

مزوزوئیک)، افیولیت، شیل، گرانیت و ماسه سنگ از سنگ‌های نسبتاً خالص استان خراسان رضوی انتخاب شدند با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی 1:100000 سازمان زمین‌شناسی کشور (شکل 1).

در مطالعه حاضر دو عامل سنگ‌بستر و خصوصیات توپوگرافی به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر خصوصیات منحنی رطوبتی خاک و شاخص‌های پایداری خاک‌دانه‌ها در نظر گرفته شده است. برای تعیین عامل خصوصیات توپوگرافی از شاخص رطوبت توپوگرافی استفاده شد که این شاخص در دو کلاس مثبت و منفی مورد بررسی قرار گرفت. شاخص رطوبت توپوگرافی، گرایش آب به جمع شدن را در هر نقطه از زیرحوضه و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین‌دست توصیف می‌کند. شاخص رطوبت توپوگرافی از ترکیب مساحت حوضه بالادست و شیب به دست می‌آید و تعیین‌کننده تأثیر توپوگرافی بر روی میزان سطوح اشباع جهت تولید روان‌آب است که با استفاده از رابطه 1 محاسبه می‌گردد (12).

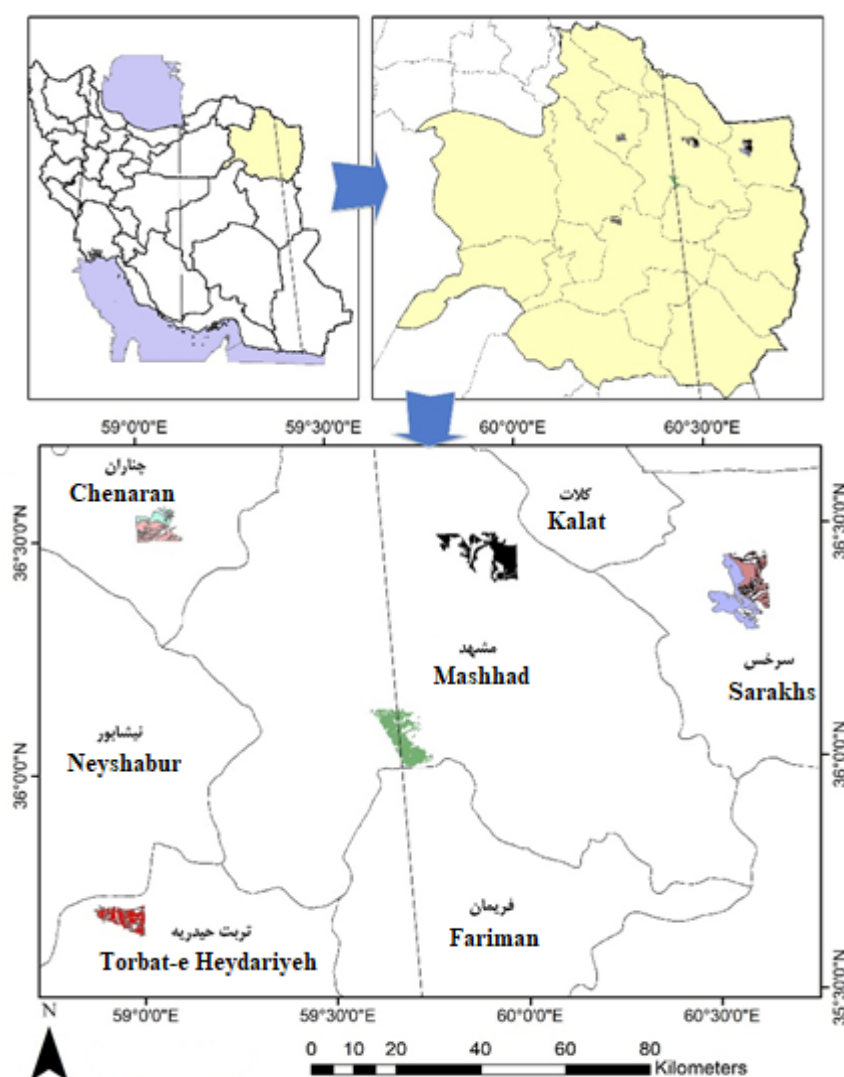
$$TWI = \ln (As/\tan\beta) \quad (1)$$

که در آن، TWI مقدار شاخص رطوبت توپوگرافی، As مساحت ویژه حوضه بر حسب متر و β شیب به درجه است. برای محاسبه شاخص رطوبت توپوگرافی، ابتدا نقشه مدل رقومی ارتفاع محدوده تمامی سنگ‌ها از سایت USGS تهیه و با ساخت نقشه شیب و جریان تجمعی در محیط نرم‌افزار ArcGIS این شاخص تهیه و طبقه‌بندی شد.

شاخص‌های پایداری خاک‌دانه‌ها تأثیرگذار باشند. به‌عنوان مثال نتایج پژوهشی نشان داد که کیفیت فیزیکی خاک در کاربری‌های مختلف می‌تواند متفاوت باشد و مدیریت بهتر خاک می‌تواند منجر به بهبود منحنی رطوبتی و شاخص‌های پایداری شود (11). با توجه به پیشینه پژوهش‌های صورت گرفته، هدف از این پژوهش بررسی تأثیر مواد مادری (جنس سنگ‌بستر) و خصوصیات توپوگرافی بر منحنی رطوبتی خاک و شاخص‌های پایداری خاک‌دانه‌ها است. هم‌چنین دو فرضیه اصلی پژوهش عبارت‌اند از: 1- خاک‌های تشکیل‌شده بر روی جنس سنگ‌های مختلف دارای خصوصیات منحنی رطوبتی و شاخص‌های پایداری خاک‌دانه متفاوتی هستند. 2- ویژگی‌های توپوگرافی مختلف می‌تواند در خصوصیات منحنی رطوبتی و شاخص‌های پایداری خاک‌دانه مؤثر باشند. دانستن تفاوت در مشخصه‌های منحنی‌های رطوبتی خاک و پایداری خاک‌دانه‌ها در شرایط متفاوت توپوگرافی و سنگ‌بستر می‌تواند تصمیم‌گیران را در مدیریت بهتر عرصه‌های طبیعی یاری رساند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در استان خراسان رضوی و شهرستان‌های مشهد، تربت‌حیدریه، سرخس و چناران قرار دارد، که در محدود طول جغرافیایی 58 درجه و 52 دقیقه تا 60 درجه و 40 دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی 35 درجه و 38 دقیقه تا 36 درجه و 25 دقیقه شمالی قرار دارد. در این پژوهش هفت سنگ بستر مارن، آهک (در دو دوران سنوزوئیک و



شکل 1- محدوده مورد مطالعه و سازندهای مورد استفاده.

Figure 1. The study area and the formations used.

منحنی رطوبتی خاک نمونه‌های مورد نظر از دستگاه صفحات فشاری¹ استفاده شد و مقدار رطوبت در مکش‌های 10، 30، 50، 100، 300، 500، 1000 و 1500 کیلوپاسکال تعیین شدند (13). از آنجایی که ساختمان خاک به خصوص حفظ منافذ درشت، در مکش‌های کم نقش اساسی دارند، تعیین رطوبت خاک در مکش‌های کمتر از 3 کیلوپاسکال با استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده انجام شد. برای این منظور ابتدا نمونه دست‌نخورده اشباع و رطوبت آن تعیین

بر این اساس و با توجه به بررسی هفت نوع سنگ‌بستر، جمعاً 14 تیمار مختلف وجود دارد که با احتساب سه تکرار برای هر تیمار در مجموع 42 نمونه از عمق 0-20 سانتی‌متری با استفاده از استوانه نمونه‌گیر برداشت شد و برای تهیه منحنی رطوبتی خاک، تعیین شاخص‌های پایداری خاک‌دانه‌ها و اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک آماده‌سازی گردید.

منحنی رطوبتی خاک و شاخص‌های پایداری خاک‌دانه‌ها در سنگ‌بسترهای مختلف: برای تهیه

1- Pressure plate

را روی یک سری الک با اندازه‌های مشخص، در آب در معرض تکان‌های مکانیکی قرار می‌دهند که بر اساس روش (15) با استفاده از رابطه 3 محاسبه می‌شود.

$$MWD = \sum_{i=1}^K w_i \bar{x}_i \quad (3)$$

که در آن، $\bar{x}_i$ میانگین قطر منافذ دو الک متوالی، w_i نسبت وزن خاک‌دانه‌های روی هر الک به وزن کل خاک است.

پایداری خاک‌دانه‌ها (AS) با استفاده از روش الک تر و بعد از تصحیح شن بر اساس رابطه 4 تعیین شد (15).

$$\%AS = \frac{WSA - Msand}{Msample - Msand} \quad (4)$$

که در آن، WSA جرم خاک‌دانه‌های باقی‌مانده بر روی الک 0/25 میلی‌متری، Msand جرم شن و Msample جرم نمونه خاک است.

درصد تخریب خاک‌دانه‌ها یکی دیگر از شاخص‌های مناسب جهت ارزیابی ساختمان فیزیکی خاک می‌باشد که بر اساس اندازه‌گیری میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت تر و خشک به دست می‌آید که بر اساس رابطه 5 محاسبه گردید (15).

$$PAD = \frac{MD - MW}{MD} \times 100 \quad (5)$$

که در آن، MD جرم خاک‌دانه‌های بزرگ‌تر از اندازه 0/25 میلی‌متر در حالت الک خشک و MW جرم خاک‌دانه‌های بزرگ‌تر از اندازه 0/25 میلی‌متر در حالت الک تر است.

همچنین بافت خاک به روش هیدرومتر، ماده آلی به روش تیتراسیون برگشتی با اسیدسولفوریک غلیظ و کربنات کلسیم با روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک انجام شد (16).

آنالیز آماری تیمارها: با توجه به این‌که شرط استفاده از آمار پارامتریک نرمال بودن¹ داده‌های موردبررسی

گردید. فشار داخل دستگاه برای مکش‌های ذکرشده تنظیم شد و پس از ایجاد تعادل در هر مکش، مقدار رطوبت آن‌ها تعیین شد. مقدار رطوبت حجمی را می‌توان از حاصل‌ضرب رطوبت وزنی محاسبه‌شده در مقدار جرم مخصوص ظاهری نمونه به‌دست آورد. با قرار دادن میزان درصد رطوبت حجمی در محور افقی و مختصات عادی و مکش‌های مختلف برحسب کیلوپاسکال در محور عمودی و مختصات لگاریتمی منحنی رطوبتی خاک برای هرکدام از نمونه‌ها رسم شد.

یکی از نقاط مهم در منحنی رطوبتی خاک، رطوبت اشباع است. به‌عبارتی میزان رطوبت موجود در خاک هنگامی که خاک بدون مکش است. همچنین سطح زیر منحنی رطوبتی خاک بیانگر توان نگهداری آب در خاک در متوسطی از مکش‌ها است.

پارامتر فیزیکی خاک که با S نشان داده می‌شود برابر با شیب منحنی نگهداشت آب خاک در نقطه عطف است. مقدار شیب (S) در نقطه عطف با استفاده از رابطه 2 به‌دست آمد (14).

$$S = -n(\theta_{sat} - \theta_{res}) \cdot \left[1 + \frac{1}{m}\right]^{-(1+m)} \quad (2)$$

که در آن، θ_{sat} و θ_{res} رطوبت اشباع و باقی‌مانده (بر اساس کیلوگرم بر کیلوگرم)، m و n پارامترهای شکل منحنی هستند که با استفاده از نرم‌افزار RETC به دست آمد.

شاخص‌های متعددی برای ارزیابی پایداری خاک‌دانه‌ها استفاده‌شده است، ازجمله این شاخص‌ها می‌توان به میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در دو حالت الک خشک و تر، شاخص پایداری خاک‌دانه‌ها و درصد تخریب خاک‌دانه‌ها اشاره نمود. در روش الک خشک، تنها تنش‌های مکانیکی بر خاک‌دانه‌های خشک روی یک سری الک با اندازه‌های مشخص وارد می‌شود. درحالی‌که در روش الک تر، خاک‌دانه‌ها

نتایج و بحث

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک: برخی خصوصیات خاک‌های مناطق مورد مطالعه از جمله ویژگی‌های بافتی شامل درصد رس، سیلت و شن، بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، درصد ماده آلی و درصد کربنات کلسیم نمونه‌های مختلف اندازه‌گیری و در جدول 1 ارائه شده است.

است، ابتدا این مهم با استفاده از آزمون کولموگراف - اسمیرنوف تعیین گردید. جهت بررسی ارتباط و همبستگی بین متغیرها از آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد. تجزیه واریانس با استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گرفت و در نهایت جهت بررسی مقایسه میانگین‌ها در تیمارهایی با اختلاف معنی‌دار از آزمون LSD استفاده شد. همه آزمون‌های آماری در نرم‌افزار IBM SPSS Statistics 22 مورد بررسی قرار گرفت.

جدول 1- ویژگی‌های خاک نمونه‌های مورد بررسی.

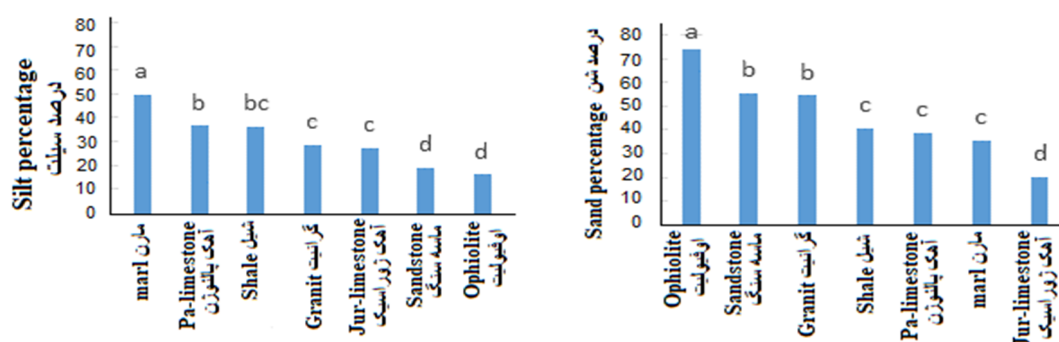
Table 1. Characteristics of the examined samples.

بافت خاک Soil texture	درصد کربنات کلسیم CaCO ₃	درصد ماده آلی Organic matter	جرم مخصوص Specific gravity (gr/cm ³)	درصد شن Sand percentage	درصد سیلت Silt percentage	درصد رس Clay percentage	TWI	مواد مادری Parent material
Loam ² , sandy loam ¹	13.0	1.90	1.31	52.00	32.67	15.33	+	گرانیت
sandy loam ² , loam ¹	32.5	3.10	1.31	57.33	27.33	15.33	-	Granite
sandy loam, clay, loam	34.5	1.90	1.13	44.00	30.67	25.33	+	آهک پالئوژن سرخس
loam ² , clay loam ¹	35.0	1.85	1.16	34.00	45.33	20.67	-	Sarakhs Paleogene limestone
clay ³	35.0	3.40	1.25	22.00	28.67	49.33	+	آهک ژوراسیک چناران
clay ² , clay loam ¹	33.0	0.20	1.30	18.67	28.67	52.67	-	Chenaran Jurassic limestone
sandy loam ² , loamy sand ¹	30.0	1.90	1.47	72.67	17.33	10.00	+	افیولیت
sandy loam ¹ , loamy sand ²	33.5	0.90	1.49	75.33	16.67	8.00	-	Ophiolite
silt loam ² , loam ¹	35.0	1.90	1.65	36.00	52.67	11.33	+	مارن
silt loam ² , loam ¹	29	1.30	1.65	35.33	50.67	14.00	-	Marl
sandy loam, sandy clay loam	28.0	2.50	1.40	55.33	20.67	24.00	+	ماسه سنگ
sandy loam, sandy clay loam	29	2.05	1.43	56.00	19.33	24.67	-	Sandstone
loam ² , silt loam/loam ¹	25.5	1.00	1.52	38.00	39.33	22.67	+	شیل
Loam, clay loam	30.5	1.10	1.54	43.33	36.00	20.67	-	Shale

باعث شده آب بیش‌تری در بین ذرات ذخیره گردد (21). درصد شن نیز به ترتیب در خاک‌های افیولیتی، ماسه‌سنگ، گرانیت، شیل، آهک پالئوژن سرخس، مارن و آهک ژوراسیک چناران کاهش می‌یابد. افیولیت و گرانیت جزو سنگ‌های آذرین به شمار می‌آیند که نسبت به هوازدگی مقاوم‌تر از دیگر سنگ‌ها هستند و به همین دلیل خاک‌های آن‌ها از نظر درصد ذرات درشت بیش‌تر از ذرات ریز است.

نتایج آزمایش فاکتوریل متغیرهای درصد سیلت و درصد شن در جنس سنگ‌ها و شاخص‌های مختلف رطوبت توپوگرافی مختلف نشان می‌دهد که عامل سنگ‌شناسی در سطح 1 درصد معنی‌دار بوده هم‌چنین عامل شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) برای دو متغیر درصد سیلت و درصد شن معنی‌دار نبوده با بررسی اثر متقابل دو عامل سنگ‌شناسی و TWI نیز مشخص می‌شود که میانگین درصد سیلت و رس با یکدیگر اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. به‌منظور تعیین این‌که خاک‌های کدام سنگ‌بستر با یکدیگر اختلاف معنی‌داری از نظر درصد سیلت و شن دارند از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) استفاده شد (شکل 2).

درصد رس در خاک‌های آهک ژوراسیک چناران بیش‌ترین مقدار و حدود 50 درصد و به ترتیب در خاک‌های ماسه‌سنگ، آهک پالئوژن سرخس، شیل، گرانیت و مارن کاهش می‌یابد و در افیولیت کم‌ترین مقدار و حدود 10 درصد می‌رسد. علی‌رغم این‌که افزایش رس در خاک باعث افزایش تخلخل کل می‌گردد ولی بخش عمده‌ای از آن را خلل و فرج ریز تشکیل می‌دهد، به عبارتی قدرت نگهداری رطوبت در خاک رسی به‌مراتب بیش از خاک شنی است که این امر باعث می‌شود نقطه پژمردگی گیاه در خاک‌های رسی مقدار بیش‌تری از خاک‌های شنی باشد (17، 18) به عبارتی باین‌که آب در خاک موجود است ولی گیاه قادر نیست از آن آب استفاده نماید. درصد سیلت در خاک‌های مارنی بیش‌ترین و در خاک‌های افیولیت و ماسه‌سنگ کم‌ترین مقدار می‌باشد. افزایش درصد سیلت از یک‌سو باعث حساسیت به فرسایش خاک می‌گردد اما از سوی دیگر از نظر رطوبت قابل‌استفاده گیاه جزو بهترین خاک‌ها می‌باشند زیرا خلل و فرج موجود در سیلت درشت‌تر از ذرات رس هستند که باعث می‌گردد گیاه راحت‌تر بتواند از این رطوبت استفاده نماید (17، 19، 20) از طرفی تخلخل کل در سیلت بیش‌تر از شن می‌باشد که

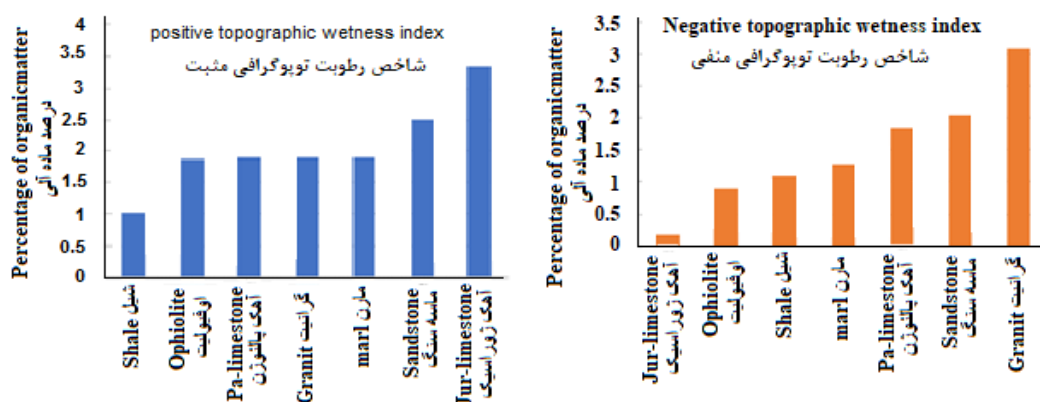


شکل 2- گروه‌بندی سنگ‌بستر بر اساس متغیر درصد سیلت و شن با استفاده از آزمون LSD.

Figure 2. Grouping of rock types based on the variable percentage of silt and sand using the LSD test.

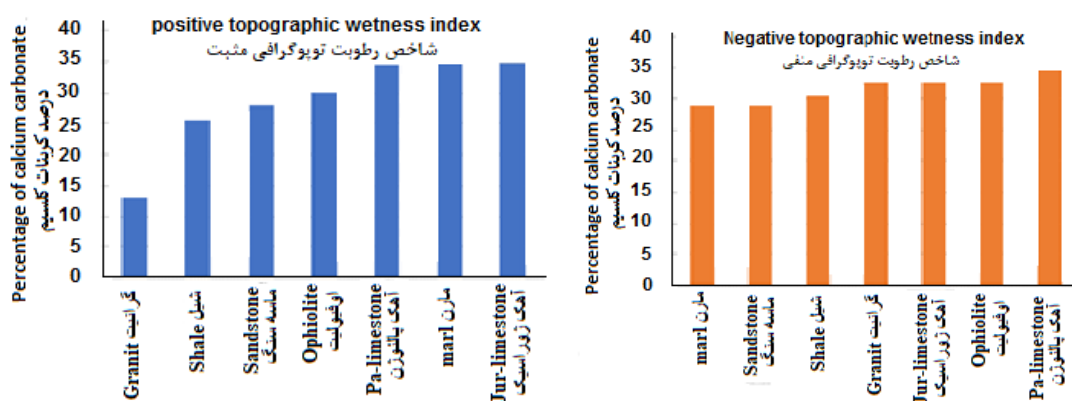
ماده آلی و کربنات کلسیم: شکل 3 نتایج حاصل از اندازه‌گیری میزان درصد ماده آلی و شکل 4 نتایج حاصل از اندازه‌گیری کربنات کلسیم را در خاک‌های حاصل از سنگ‌بسترهای مختلف و برای شاخص رطوبت توپوگرافی مثبت و منفی نشان می‌دهد.

همان‌طور که از شکل 2 مشخص است، به‌طورکلی با توجه به درصد ماسه، سیلت و رس، نمونه خاک‌های بررسی‌شده در منطقه مورد مطالعه، خاک‌های حاصل از افیولیت، گرانیات، ماسه‌سنگ، مارن، شیل، آهک پالئوژن و آهک ژوراسیک از نظر کیفیت بافت به‌ترتیب دارای سبک‌ترین تا سنگین‌ترین بافت هستند.



شکل 3- درصد ماده آلی نمونه‌های مختلف در شاخص رطوبت توپوگرافی مثبت و منفی.

Figure 3. Percentage of organic matter of different samples in positive and negative topography wetness index.



شکل 4- درصد کربنات کلسیم نمونه‌های مختلف در شاخص رطوبت توپوگرافی مثبت و منفی.

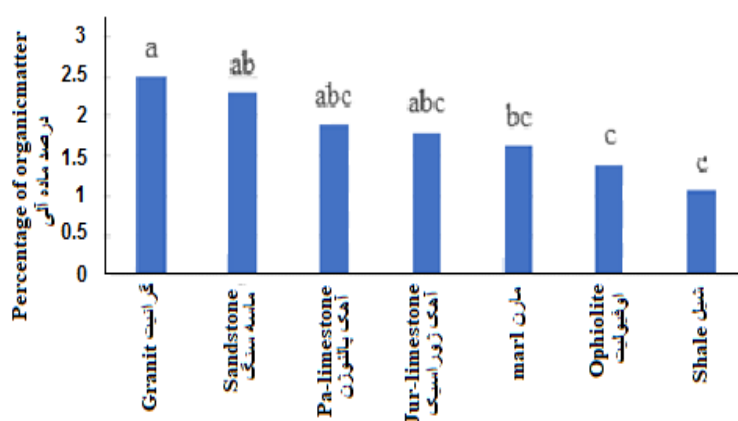
Figure 4. Calcium carbonate percentage of different samples in positive and negative topography wetness index.

سنگ‌بستر نیز بیش‌ترین مقدار و بیش از 50 درصد می‌باشد. خاک‌های حاصل از ماسه‌سنگ، آهک پالئوژن سرخس، مارن و افیولیت نیز به ترتیب دارای بیش‌ترین ماده آلی هستند و در آن‌ها نیز میزان ماده آلی TWI مثبت بیش از ماده آلی TWI منفی است.

با توجه به شکل 3 مشخص می‌شود که خاک‌های آهکی ژوراسیک چنان‌را با TWI مثبت دارای بیش‌ترین ماده آلی می‌باشد این در حالی است که همین سنگ در TWI منفی کم‌ترین ماده آلی را به خود اختصاص داده است. درصد رس در این

بیشترین مقدار و ماسه سنگ و شیل کمترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند. نتایج آزمایش فاکتوریل، درصد ماده آلی نشان می‌دهد که عامل سنگ‌شناسی و شاخص رطوبت توپوگرافی در سطح 1 درصد معنی‌دار می‌باشند (شکل 5).

این در حالی است که خاک دو سنگ گرانیت و شیل مقدار ماده آلی در TWI منفی بیش‌تر از TWI مثبت است. با این تفاوت که گرانیت دارای ماده آلی نسبتاً بالا ولی شیل دارای ماده آلی نسبتاً کمی است. در خصوص میزان کربنات کلسیم نیز خاک‌های آهک پالئوژن سرخس، آهک ژوراسیک چناران و افیولیت

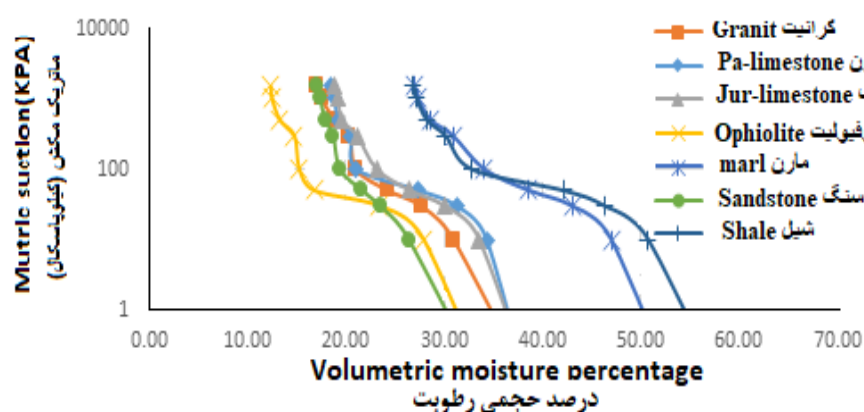


شکل 5- گروه‌بندی سنگ‌بستر بر اساس متغیر درصد ماده آلی با استفاده از آزمون LSD.

Figure 5. Rock type grouping based on the organic matter percentage variable using the LSD test.

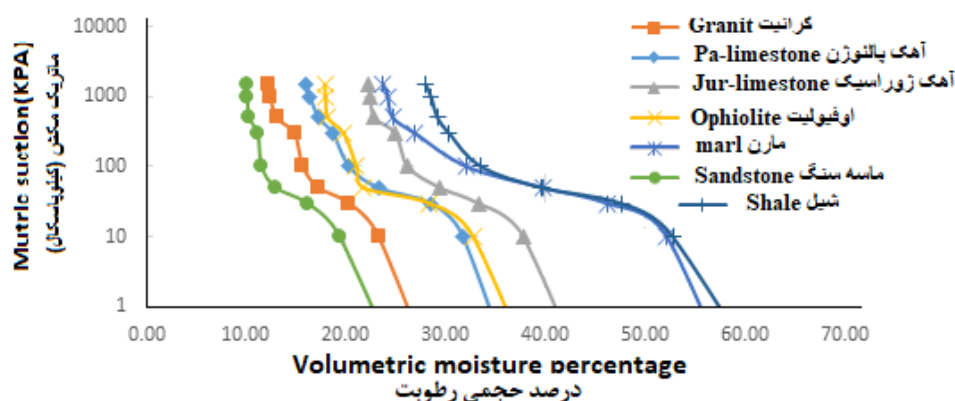
رطوبت توپوگرافی منفی و مثبت تعیین و در شکل‌های 6 و 7 ارائه شده است.

نتایج حاصل از منحنی رطوبتی خاک: بر اساس نتایج حاصله منحنی رطوبتی خاک برای خاک‌های حاصل از سنگ‌بسترهای مختلف در شاخص‌های



شکل 6- منحنی رطوبت خاک برای شاخص رطوبت توپوگرافی مثبت در سنگ‌بسترهای مختلف.

Figure 6. Soil-water retention Curve for positive topographic wetness index in different types of rocks.



شکل 7- منحنی رطوبت خاک برای شاخص رطوبت توپوگرافی منفی در سنگ‌بسترهای مختلف.

Figure 7. Soil-water retention Curve for negative topographic wetness index in different types of rocks.

بعدازآن نیز خاک‌های مارن، آهک ژوراسیک، آهک پالئوژن بیش‌ترین مقدار درصد رطوبت وزنی در مکش‌های مختلف را از خود نشان می‌دهند و خاک‌های ماسه‌سنگ، افیولیت و گرانیت به ترتیب کم‌ترین مقدار درصد رطوبت وزنی در مکش‌های مختلف را نشان می‌دهند. با توجه به منحنی رطوبت خاک در خاک‌های افیولیتی تغییرات شیب آن به‌صورت ناگهانی است که از ویژگی‌های شاخص بافت خاک شنی است.

با توجه به نتایج حاصل از منحنی‌های رطوبتی خاک بیش‌ترین نگهداشت رطوبت مربوط به بافت‌های متوسط و کم‌ترین مربوط به بافت‌های سبک است. تغییرات شیب منحنی در خاک‌های متوسط و سنگین تدریجی است ولی در خاک‌های سبک به دلیل وجود خلل و فرج درشت ناگهانی است. همان‌طور که از شکل‌های 6 و 7 مشخص است خاک‌های حاصل از شیل دارای بیش‌ترین مقدار درصد رطوبت وزنی در مکش‌های مختلف است.

جدول 2- ویژگی‌های شاخص منحنی رطوبت خاک نمونه‌های موردبررسی.

Table 2. Characteristics of the Soil-water retention Curve index of the examined samples.

S	AUC	AW %	PWP %	FC %	Msat %	TWI	مواد مادری Parent material
0.04	32.75	3.25	17.12	20.37	45.69	+	گرانیت
0.03	25.17	2.65	12.18	14.83	34.33	-	Granite
0.06	31.86	2.06	18.42	20.48	42.03	+	آهک پالئوژن سرخس
0.05	32.31	2.72	15.96	18.68	41.60	-	Sarakhs Paleogene limestone
0.05	30.14	2.33	18.81	21.14	43.49	+	آهک ژوراسیک چناران
0.05	32.79	2.80	22.16	24.96	49.73	-	Chenaran Jurassic limestone
0.05	32.10	2.40	12.37	14.77	40.07	+	افیولیت
0.05	29.89	1.89	17.86	19.76	44.80	-	Ophiolite
0.04	41.89	3.96	26.93	30.90	58.92	+	مارن
0.06	53.65	3.18	23.74	26.92	64.29	-	Marl
0.04	23.52	1.65	17.05	18.70	41.07	+	ماسه‌سنگ
0.04	21.35	1.13	10.03	11.16	31.81	-	Sandstone
0.05	49.01	3.35	26.77	30.12	64.53	+	شیل
0.07	50.57	2.36	27.96	30.33	70.49	-	Shale

TWI: شاخص رطوبت توپوگرافی، Msat: رطوبت اشباع، FC: ظرفیت زراعی، PWP: نقطه پژمردگی دائم، AW: رطوبت قابل‌استفاده گیاه،

AUC: سطح زیر منحنی رطوبتی خاک و S مقدار شیب در نقطه عطف

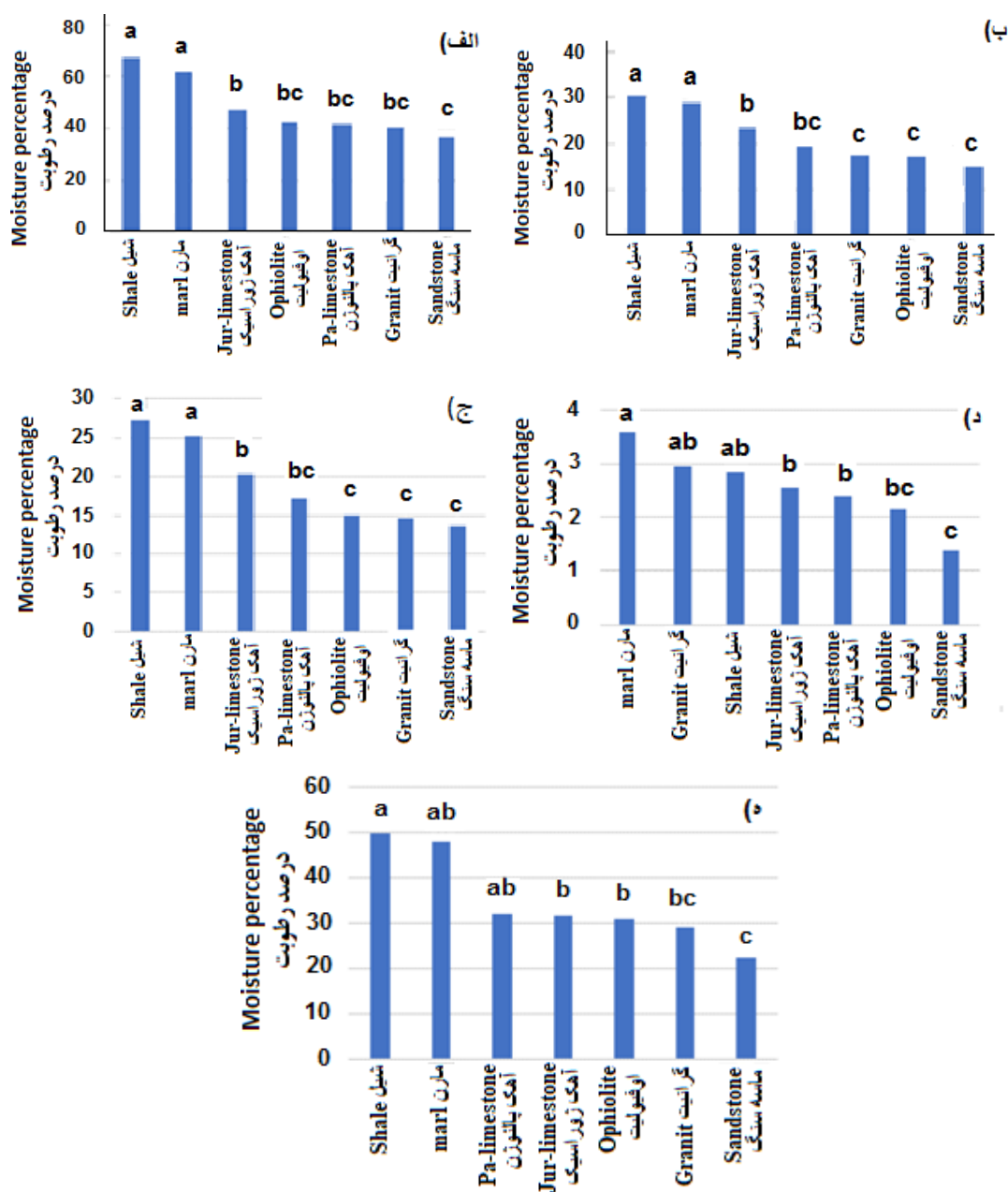
TWI: Topographic wetness index, MSat: Saturated soil moisture, FC: field capacity, PWP: Permanent wilting point, AW: Total available water, AUC: Area under the soil-water retention curve, S: Slope of the soil-water retention curve at the inflection point

مقدار رطوبت اشباع در خاک‌های شیل و مارن به‌ترتیب بیش‌ترین مقدار و در هر دو بیش‌تر از 50 درصد می‌باشد که نشان‌دهنده این است که در خاک‌های این دو سنگ‌بستر هنگامی که خاک به حالت اشباع می‌رسد، بیش از نیمی از آن را آب تشکیل می‌دهد. بعد از آن خاک‌های آهک ژوراسیک چناران و آهک پالئوژن سرخس و افیولیت دارای بیش‌ترین مقدار رطوبت اشباع می‌باشند. خاک‌های حاصل از گرانیات و ماسه‌سنگ به‌طور کلی کم‌ترین مقدار رطوبت اشباع را به خود اختصاص می‌دهند. هم‌چنین هرچه بافت خاک به سمت مرکز مثلث بافت خاک و تا حدودی متمایل به سیلت باشد از نظر ویژگی‌های منحنی رطوبتی دارای رطوبت اشباع و ظرفیت زراعی بالاتری است که نمونه آن در خاک‌های مارن و شیل مشهود است.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از جدول 2 مشخص می‌شود که خاک‌های گرانیات، مارن و شیل بیش‌ترین رطوبت قابل‌استفاده گیاه را دارند. هم‌چنین خاک‌های آهکی و افیولیت در حد متوسط و ماسه‌سنگ کم‌ترین رطوبت قابل‌استفاده گیاه را دارند که می‌تواند به این معنی باشد که گیاه در سنگ‌بسترهای گرانیات، مارن و شیل از بیش‌ترین مقدار رطوبت موجود در خاک می‌تواند استفاده نماید. خاک‌های ماسه‌سنگ و تا حدی افیولیت به‌دلیل این که دارای درصد شن بالایی هستند دارای ظرفیت زراعی کمی بوده و به‌عبارتی بعد از خروج آب ثقیلی، مقدار رطوبت در خاک بسیار ناچیز است. بر این اساس شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بیانی از حجم منافذ خاک بوده و تابعی از آن می‌باشد (5، 22، 23، 24) تأثیرگذاری زیاد منحنی مشخصه از اندازه و آرایش منافذ خاک نشان می‌دهد که شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف می‌تواند نشان‌دهنده جنبه‌های مختلفی از

ساختمان و کیفیت فیزیکی خاک مانند نفوذپذیری، سخت‌شدگی و فشردگی باشد (14)، بنابراین هر عاملی که بتواند اندازه و آرایش منافذ خاک را تحت تأثیر قرار دهد سبب تغییر شاخص S می‌شود (25). مقادیر بزرگ‌تر شاخص S در خاک‌های شیل مربوط به دانه‌بندی ریز بوده که مسئول بسیاری از خواص فیزیکی خاک است (26، 27). علی‌رغم این که برخی پژوهش‌گران (25) بیان نمودند شاخص S همبستگی معنی‌داری با بسیاری از ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت فیزیکی خاک دارد، در این پژوهش این شاخص با بسیاری از متغیرهای فیزیکی خاک همبستگی معنی‌داری ندارد و استفاده از این شاخص نمی‌تواند معیار مناسبی از کیفیت فیزیکی خاک باشد که با نتایج (28) همخوانی دارد. مقدار رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم در خاک‌های مارن و شیل نسبت به سنگ‌های دیگر بیش‌تر است. شاید دلیل اصلی این موضوع مربوط به میزان بالای ذرات ریز رس و سیلت تشکیل‌دهنده این خاک‌ها باشد (29).

نتایج آزمایش فاکتوریل متغیرهای رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم، رطوبت قابل‌استفاده گیاه، سطح زیر منحنی رطوبتی خاک و شیب نقطه عطف منحنی رطوبتی خاک نشان می‌دهد که عامل سنگ‌شناسی برای تمامی متغیرهای منحنی رطوبتی خاک به‌جز شیب نقطه عطف منحنی رطوبتی در سطح 1 درصد معنی‌دار است. این موضوع با نتایج (30، 31) که نقش ترکیب کانی‌شناسی در خصوصیات منحنی‌های رطوبتی را تأیید می‌کنند همخوانی دارد. علاوه بر این عامل شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) برای تمامی متغیرهای موردبررسی در هیچ سطحی معنی‌دار نبود (شکل 8).

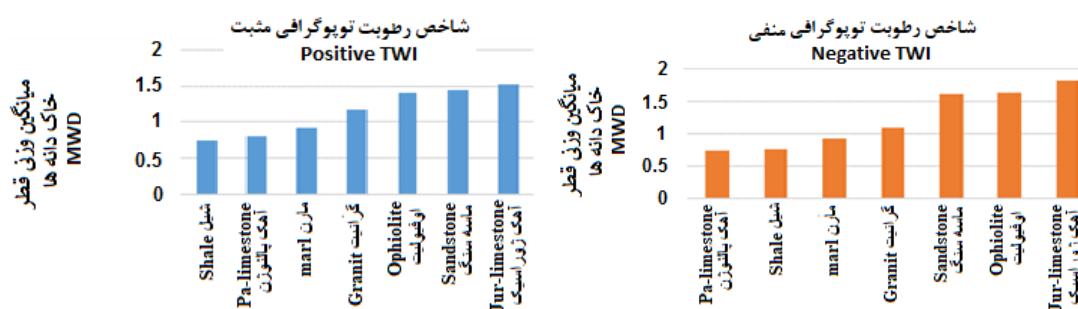


شکل 8- گروه‌بندی سنگ‌بستر بر اساس متغیرهای الف) رطوبت اشباع، ب) ظرفیت زراعی، ج) نقطه پژمردگی دائم، د) رطوبت قابل‌استفاده گیاه و ه) سطح زیر منحنی رطوبتی با استفاده از آزمون LSD.

Figure 8. The grouping of rock types based on the variables a) saturated moisture, b) field capacity, c) permanent wilting point, d) plant usable moisture and e) The area under the humidity curve using the LSD test.

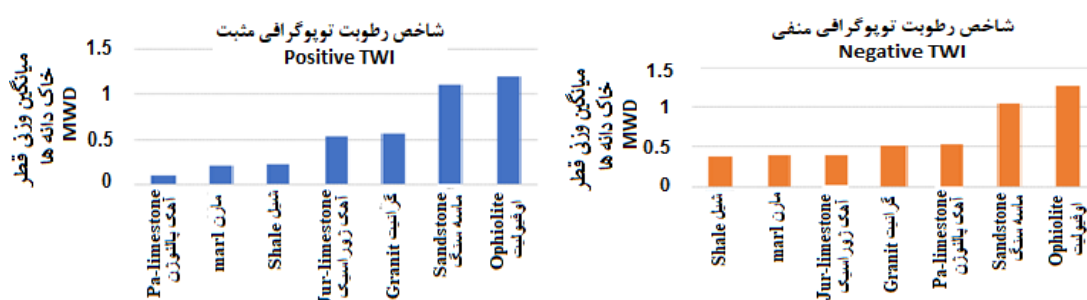
الک تر (MWD_{wet})، درصد پایداری خاک‌دانه‌ها (AS)، درصد تخریب خاک‌دانه‌ها (PAD) را در خاک‌های حاصل از سنگ‌بسترهای مختلف برای شاخص رطوبت توپوگرافی مثبت و منفی نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از شاخص‌های پایداری خاک‌دانه‌ها: شکل‌های 9 تا 12 مقادیر مختلف چهار شاخص میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها به‌صورت الک خشک (MWD_{dry})، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها به‌صورت



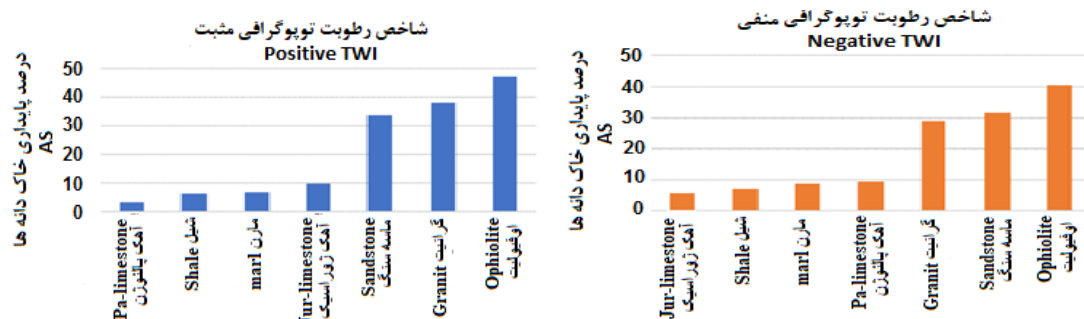
شکل 9- شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت خشک برای نمونه‌های موردبررسی.

Figure 9. The weighted average index of the diameter of soil aggregates (MWD) in the dry state for the examined samples.



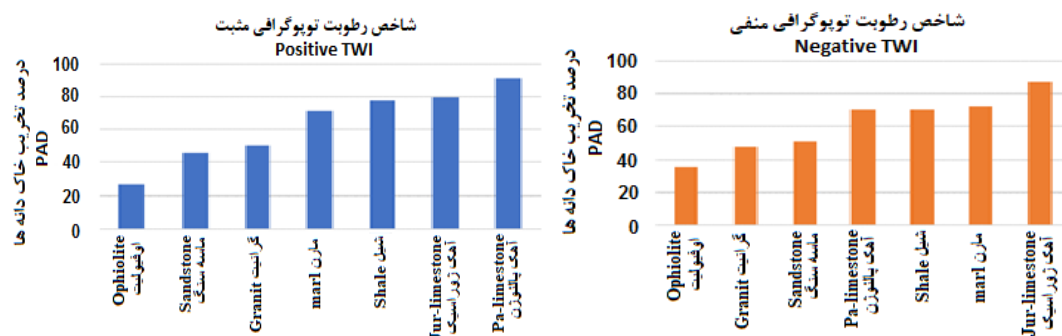
شکل 10- شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت تر برای نمونه‌های موردبررسی.

Figure 10. The weighted average index of the diameter of soil aggregates (MWD) in the wet state for the examined samples.



شکل 11- شاخص درصد پایداری خاکدانه‌ها برای نمونه‌های موردبررسی.

Figure 11. Percent stability index of soil aggregates (AS) for the studied samples.

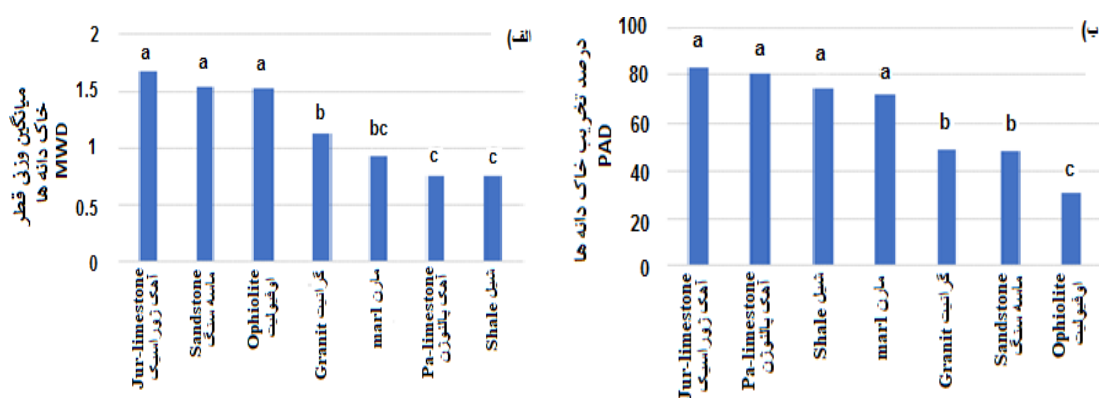


شکل 12- شاخص درصد تخریب خاکدانه‌ها برای نمونه‌های موردبررسی.

Figure 12. Index of soil aggregates destruction percentage (PAD) for the studied samples.

درصد پایداری خاک‌دانه این سنگ‌بسترها به کم‌تر از 10 درصد برسد. به عبارتی در پژوهش حاضر مشاهده می‌شود که وجود رس و سیلت زیاد باعث کاهش پایداری می‌گردد (33، 34، 35). اما در پژوهش‌هایی نیز همبستگی معنی‌داری بین پایداری خاک‌دانه‌ها و درصد رس پیدا نشد (36، 37). هم‌چنین نتایج بیانگر آن است که نوع سازند زمین‌شناسی منطقه در کنار این‌که بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک اثرگذار است، بر روند تغییرات پایداری خاک‌دانه‌ها و در تعیین نوع فاکتورهای خاکی مؤثر در فرایند خاکدانه‌سازی نقش دارد که با نتایج (38، 39، 40) مطابقت دارد. میزان ماده آلی نیز تنها متغیری است که علاوه بر سنگ‌های مختلف در شاخص‌های رطوبتی مختلف دارای اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد می‌باشد که با نتایج (35، 41، 42) مطابقت دارد. نتایج آزمایش فاکتوریل پارامترهای میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت الک خشک و درصد تخریب خاک‌دانه‌ها نشان می‌دهد که عامل سنگ‌شناسی برای این دو متغیر در سطح 1 درصد معنی‌دار است (شکل 13).

خاک‌های حاصل از سنگ‌بستر افیولیت و ماسه‌سنگ دارای میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌های بیش‌تری نسبت به بقیه سنگ‌بسترها هستند. دلیل این موضوع می‌تواند وجود رابطه معکوس بین درصد سیلت و میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها باشد (32). بدیهی است که میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت خشک بیش‌تر از حالت تر باشد ولی در خاک‌های آهک ژوراسیک چنان‌که تفاوت میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌های در حالت خشک نسبت به حالت تر قابل‌ملاحظه بوده که نشان‌دهنده این است که خاک‌های این سنگ‌بستر نسبت به سنگ‌بسترهای دیگر بر اثر شست‌وشو بیش‌تر از هم‌پاشیده است. زیاد بودن درصد مواد ریزدانه در خاک نشان‌دهنده بافت سنگین و حساسیت آن نسبت به تغییرات رطوبت می‌باشد، به‌طوری‌که افزایش رطوبت باعث کاهش چسبندگی خاک به‌دلیل کاهش نیروهای الکتریکی بین ذرات رس شده و پایداری آن را به نحو چشمگیری کاهش می‌دهد. درصد رس و سیلت بیش از 60 درصد در خاک‌های آهک پالئوژن سرخس، آهک ژوراسیک چناران، مارن و شیل باعث شده است که



شکل 13- گروه‌بندی سنگ‌بسترهای مختلف بر اساس متغیرهای الف) میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت خشک و ب) درصد تخریب خاک‌دانه‌ها با استفاده از آزمون LSD.

Figure 13. Grouping of rock types based on the variables a) weighted average diameter of soil aggregates (MWD) in dry state and b) percent degradation of soil aggregates (PAD) with Using the LSD test.

تحلیل همبستگی متغیرها: اطلاع از همبستگی بین متغیرهای مورد بررسی از یک سو مستقیم یا غیرمستقیم بودن رابطه بین آنها را تعیین می کند و از سویی دیگر میزان ارتباط آنها را باهم مشخص می کند. هنگامی که همبستگی بین متغیرهای یک پدیده در مطالعات متعدد تأیید شود، می توان در بررسی های بعدی یکی از آنها را مدنظر قرارداد که این امر یکی از اصول کاربردی در مدل سازی است. بر این اساس همبستگی بین همه عوامل مورد بررسی در پژوهش حاضر محاسبه و در جدول 3 ارائه گردید.

جدول 3- ماتریس همبستگی بین متغیرهای مختلف را نشان می دهد.

Table 3. Shows the correlation matrix between different variables.

OM	Sand	Silt	S	AUC	AW	PWP	FC	Msat	PAD		
0.981**	0.065	-0.527**	-0.332*	-0.466**	-0.273	-0.394**	-0.402**	-0.399**	-0.314*	R	MWDdry
0.004	0.683	0.000	0.032	0.002	0.080	0.010	0.008	0.009	0.043	P value	
-0.179	-0.790**	0.536**	0.139	0.324*	0.256	0.501**	0.498**	0.336*		R	PAD
0.256	0.000	0.000	0.381	0.036	0.102	0.001	0.001	0.029		P value	
-0.509**	-0.322*	0.534**	0.549**	0.931**	0.474**	0.894**	0.890**			R	Msat
0.001	0.038	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000			P value	
-0.456**	-0.442**	0.569**	0.259	0.761**	0.611**	0.992**				R	FC
0.002	0.003	0.000	0.098	0.000	0.000	0.000				P value	
-0.470**	-0.443**	0.546**	0.299	0.744**	0.505**					R	PWP
0.002	0.003	0.000	0.054	0.000	0.001					P value	
-0.164	-0.237	0.456**	-0.110	0.531**						R	AW
0.299	0.130	0.002	0.486	0.000						P value	
-0.469**	-0.286	0.597**	0.634**							R	AUC
0.002	0.067	0.000	0.000							P value	
-0.405**	-0.094	0.225								R	S
0.008	0.553	0.152								P value	
-0.133	-0.617**									R	Silt
0.400	0.000									P value	
0.077										R	Sand
0.627										P value	

* معنی داری همبستگی در سطح پنج درصد ** معنی داری همبستگی در سطح یک درصد

* Significance at the 5% level ** Significance at the 1% level

MDDdry: میانگین وزنی قطر خاکدانه ها در حالت خشک، PAD: درصد تخریب خاکدانه ها، Msat: رطوبت اشباع، FC: ظرفیت زراعی، PWP: نقطه پژمردگی دائم، AW: رطوبت قابل استفاده گیاه، AUC: سطح زیر منحنی رطوبتی خاک، S: مقدار شیب در نقطه عطف، Silt: درصد سیلت، Sand: درصد شن، OM: ماده آلی

TWI: Weighted average diameter of soil aggregates in dry state, PAD: percent degradation of soil aggregates, MSat: Saturated soil moisture, FC: field capacity, PWP: Permanent wilting point, AW: Total available water, AUC: Area under the soil-water retention curve, S: Slope of the soil-water retention curve at the inflection point, Silt: Silt percentage, Sand: Sand percentage, OM: Organic matter

نتایج جدول 3 نشان می‌دهد که متغیر میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت خشک با متغیرهای درصد تخریب خاک‌دانه‌ها، رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم، رطوبت قابل‌استفاده گیاه، سطح زیر منحنی رطوبتی، شیب نقطه عطف منحنی رطوبتی و درصد سیلت ارتباط معنی‌دار و معکوسی دارد. با افزایش میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها درصد تخریب خاک‌دانه‌ها کم‌تر و به تبع آن پایداری خاک‌دانه‌ها بیش‌تر می‌شود، این امر باعث می‌گردد که در یک مکش ثابت، از یک‌سو رطوبت کم‌تری در خاک وجود داشته باشد و از سوی دیگر مقدار ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم کم‌تر باشد. متغیر رطوبت قابل‌استفاده گیاه با متغیرهای رطوبت اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم، سطح زیر منحنی رطوبتی و درصد سیلت رابطه معنی‌دار و مستقیم دارد. خاک‌های که دارای درصد سیلت بالاتری هستند از یک‌سو آب بیش‌تری را نسبت به ذرات شن ذخیره می‌کنند و از سوی دیگر منافذ آن به‌قدری بزرگ است تا گیاه بتواند رطوبت داخل آن را تخلیه نماید که این باعث می‌شود که هرچه درصد سیلت در خاکی بیش‌تر باشد رطوبت قابل‌استفاده گیاه بیش‌تر شود (21). متغیر شیب نقطه عطف منحنی رطوبتی کم‌ترین ارتباط را با سایر متغیرها دارد به‌طوری‌که با متغیرهای میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت خشک و درصد ماده آلی رابطه معکوس معنی‌دار و با متغیرهای رطوبت اشباع و سطح زیر منحنی رطوبتی رابطه مستقیم معنی‌دار دارد.

میزان ماده آلی تنها متغیری است که علاوه بر سنگ‌ها مختلف در شاخص‌های رطوبتی مختلف دارای اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد می‌باشد. بین میزان مواد آلی با میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها در حالت خشک رابطه مستقیم معنی‌دار وجود دارد که با نتایج (43) که بیان کردند با افزایش

مقدار ماده آلی، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه‌ها افزایش می‌یابد همخوانی دارد. به‌طورکلی بین ماده آلی و پایداری خاک‌دانه‌ها همبستگی مثبت و بین ماده آلی و تخریب خاک‌دانه‌ها همبستگی منفی وجود دارد (40، 42، 43، 44، 45) در پژوهش حاضر ماده آلی همبستگی معنی‌داری با تخریب خاک‌دانه‌ها ندارد که علت آن می‌تواند تفاوت در نوع ماده آلی خاک در هر منطقه باشد از طرف دیگر بخشی از ماده آلی عامل تشکیل خاک‌دانه است و تا یک مقدار مشخص روی ایجاد خاک‌دانه می‌تواند تأثیرگذار باشد و بالاتر از آن مقدار آستانه اثری بر خاک‌دانه‌ای شدن ندارد (33) و علاوه بر این‌ها اثر ماده آلی در خاک‌هایی با درصد زیاد رس کم می‌شود (43).

نتیجه‌گیری کلی

تفاوت در جنس سنگ می‌تواند سبب بروز تفاوت‌های معناداری در خصوصیات منحنی رطوبتی و شاخص‌های پایداری ساختمان حاصل از آن‌ها گردد. همچنین همبستگی معناداری بین خصوصیات منحنی رطوبتی خاک و شاخص‌های پایداری خاک‌دانه‌ها در جنس سنگ‌های مختلف مشاهده شد. از سوی دیگر با توجه به این‌که در بسیاری از موارد گذر زمان در سنگ‌های رسوبی به دلیل فراهم آوردن شرایط لازم برای بروز فرایندهای دیاژنز می‌تواند سبب تغییر در برخی خصوصیات سنگ گردد بررسی جنس سنگ‌آهک در دوران‌های دوم و سوم زمین‌شناسی جهت تعیین نقش سن در متغیرهای موردبررسی نشان داد که تفاوت معناداری در شاخص‌های موردبررسی با تغییر سن وجود ندارد. از بین خصوصیات شیمیایی خاک، ماده آلی و از بین خصوصیات فیزیکی خاک بافت نقش زیادی در منحنی رطوبتی و شاخص‌های پایداری خاک‌دانه‌ها نشان دادند. درنهایت در اغلب متغیرهای موردبررسی از خصوصیات منحنی رطوبتی و شاخص‌های پایداری ساختمان خاک در رطوبت

داده‌ها و اطلاعات

تمامی اطلاعات مورد نیاز پژوهش از طریق برداشت‌های میدانی و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده است.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: انجام برداشت‌های میدانی و آنالیزهای آزمایشگاهی و تحلیل داده‌های به‌دست آمده
نویسنده دوم: نظارت بر همه روند پژوهش در مراحل برداشت، آنالیز، تحلیل داده‌ها و نگارش مقاله
نویسنده سوم: ارائه مشاوره در خصوص روش کار و تحلیل داده‌های حاصله
نویسنده چهارم: تهیه و آماده‌سازی مقاله و به‌روزرسانی پیشینه تحقیق

اصول اخلاقی

اصول اخلاقی در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت گردیده است و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان این مقاله است.

حمایت مالی

این مقاله در قالب طرح شماره 3 دانشجویی با شماره 46147 مربوط به پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول مورد حمایت دانشگاه فردوسی مشهد قرار گرفته است.

توپوگرافی مثبت و منفی تفاوت معنادار مشاهده نشد که این موضوع بیانگر عدم تأثیر این عامل در شاخص‌های مورد بررسی است.

به‌طور کلی خاک‌های عرصه‌های طبیعی ایران به دلیل جوان بودن ساختار زمین‌شناسی از تحول‌یافتگی مناسبی برخوردار نبوده و در بسیاری از موارد از جمله در مورد خاک‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر، احتمال وجود خاک‌دانه‌های بالای 4 میلی‌متر در آنها کم است. بر این اساس روش کمپر و روزنا نمی‌تواند روش مناسبی جهت برآورد شاخص‌های پایداری خاک‌دانه‌ها در این خاک‌ها باشد و بهتر است از روش‌های قطره‌ای که برای انجام آنها خاک‌دانه‌هایی بدون توجه به اندازه انتخاب می‌شوند استفاده شود.

خصوصیات منحنی‌های رطوبتی خاک و پایداری خاک‌دانه‌ها می‌تواند در نفوذپذیری، وضعیت نگهداشت آب، آستانه ظهور رواناب و به‌طور غیرمستقیم در فرسایش خاک تأثیرگذار باشد. از آنجایی که فرایندهای آزمایشگاهی تعیین منحنی رطوبتی خاک اقدامی زمان‌بر و پرهزینه است، چنانچه در پژوهش‌های مشابه دیگر در سطح کشور ارتباط مناسبی بین خصوصیات منحنی رطوبتی خاک‌های حاصل از جنس سنگ‌های مختلف تأیید شود و با توجه به این‌که ویژگی‌های سنگ‌شناسی از جمله اطلاعات قابل‌دسترس و دقیق در ایران است، می‌توان از این طریق وضعیت کلی منحنی‌های رطوبتی خاک و پایداری خاک‌دانه‌ها را برای بخش‌های مختلف کشور تعیین نمود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد به دلیل حمایت از پژوهش سپاسگزاری می‌نمایند.

منابع

1. Dias, A. S., Hughes, P. N., Toll, D. G., & Glendinning, S. (2023). A simple method to determine soil–water retention curves of compacted active clays. *Transportation Geotechnics*, 43, 101138. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101138>.
2. Botula, Y. D., Cornelis, W. M., Baert, G., & Van Ranst, E. (2012). Evaluation of pedotransfer functions for predicting water retention of soils in Lower Congo (D.R. Congo). *Agricultural Water Management*, Volume 111, August 2012, P 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.006>.
3. Kong, L., Sayem, H. M., & Tian, H. (2018). Influence of drying–wetting cycles on soil-water characteristic curve of undisturbed granite residual soils and microstructure mechanism by nuclear magnetic resonance (NMR) spin-spin relaxation time (T₂) relaxometry. *Canadian Geotechnical Journal*, 55(2), 208-216. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0614>.
4. Liu, L., Lu, Y., Horton, R., & Ren, T. (2024). Determination of soil water retention curves from thermal conductivity curves, texture, bulk density, and field capacity. *Soil and Tillage Research*, 239, 105957. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105957>.
5. Ding, X., & El-Zein, A. (2024). Predicting soil water retention curves using machine learning: A study of model architecture and input variables. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108122. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108122>.
6. Zhang, J., Wang, S., Fu, Z., Wang, F., Wang, K., & Chen, H. (2024). Soil thickness influences the control effect of micro-topography on subsurface runoff generation in the karst hillslope critical zone. *Catena*, 239, 107957. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107957>.
7. Yanai, K., Masaoka, N., Kosugi, K., Fujimoto, M., & Yamakawa, Y. (2024). The Effects of Bedrock Topography and Soil Permeability on Saturated Zone Distribution in a Mountainous Steep-Slope Area. 38(11). <https://doi.org/10.1002/hyp.70000>.
8. Wilson, S. G., Lambert, J. J., Nanzio, M., & Dahlgren, R. A. (2017). Soil genesis and mineralogy across a volcanic lithosequence. 285(301-312). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.09.013>.
9. Katsura, S. Y., Suzuki, Y., & Yoshino, T. (2024). Saturated hydraulic conductivity and water retention curve of variably weathered tuff breccia bedrock in a headwater catchment. *Journal of Hydrology*, 130889. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130889>.
10. Grabs, T., Seibert, J., Bishop, K., & Laudon, H. (2009). Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. *Journal of Hydrology*. 373(1-2), 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.031>.
11. Amiri Mijan, F., Shirani, H., Esfandiarpour, A., Besalatpour, A., & Shekofteh, H. (2017). Assessment of the S-index using three models of the soil water retention curve in five different Land uses in south of Kerman. *Water and soil protection research*. 25 (6), 103-87. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.14945.3009>. [In Persian]
12. Pourghasemi, H. R., Yousefi, S., Kornejady, A., & Cerdà, A. (2017). Performance assessment of individual and ensemble data-mining techniques for gully erosion modeling. *Science of the Total Environment*, 609, 764-775. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.198>.
13. Hasheminejad, Y., & Zangabadi, M. (2022). Working with plates and pressure chambers. *Soil and Water Research Institute of Iran*. 39 p.
14. Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part I/ Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and

- effects on root growth. *Geoderma*, 120(3-4), 201-214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>.
15. Kemper, W. D., & Rosenau, R. C. (1986). Aggregate stability and size distribution. In 'Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. (Ed. ER Page) pp. 425-442. Soil Science Society of America: Madison, WI. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>.
16. Shahbazi, K., Marzi, M., Mohammadi, M. M., Asadi, H., Fathi Garlidani, A., Sadat Hashemi Nasab Zavareh, K., Tolouei, R., Beheshti, M., Avizhgan, A., & Cheraghi, M. (2024). Methods of Soil Analysis Sampling, Chemical, and Physical Methods. *Soil and Water Research Institute of Iran*. 1074 p. [In Persian]
17. Reichert, J. M., Aluquerque, J. A., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Urach, F. L., & Carlesso R. (2009). Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande Do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Brazil*, 33, 1547-1560. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600004>.
18. Haverkamp, R., Leij, F. J., Fuentes, C., Sciortino, A., & Ross P. J. (2005). Soil water retention. Introduction of shape index. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 1881-1890. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0225>.
19. Vaezi, A. R., Bayat, Z., & Foroumadi, M. (2018). Variability of surface srosion and sarticle size sistribution in selation to slope aspect and Ggradient in a semi-arid region in west of Zanzan. *Journal of Water and Soil Science*, 22(2), 1-14. <https://doi.org/10.29252/jstnar.22.2.1>. [In Persian]
20. Zhao, L., Liang, X., & Wu, F. (2014). Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Land*, 6(4), 400-409. <https://doi.org/10.1007/s40333-013-0246-z>.
21. Ghorbani Dashtaki, S., Homae, M., & Khodaverdiloo, H. (2011). Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Management*, 26, 68-74. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00254.x>.
22. Azadmard, B., Mosaddeghi, M. R., Ayoubi, S., Chavoshi, E., & Raoof, M. (2019). Estimation of near-saturated soil hydraulic properties using hybrid genetic algorithm-artificial neural network. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 20(3), 437-439. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.09.001>.
23. Haghverdi, A., Öztürk, H. S., & Durner, W. (2018). Measurement and estimation of the soil water kashretention curve using the evaporation method and the pseudo continuous pedotransfer function. *Journal of hydrology*, 563, 251-259. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.007>.
24. Kotlar, A. M., van Lier, Q. D. J., & de Souza Brito, E. (2020). Pedotransfer functions for water contents at specific pressure heads of silty soils from Amazon rainforest. *Geoderma*, 361, 114098. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114098>.
25. Rezaei, A. M., Nishaburi, M. R., & Jafarzadeh, A. A. (2018). Evaluation of Campbell's model to determine the water-soil characteristics curve. *Agricultural Sciences of Iran*, 3, 559-553. [In Persian]
26. Tang, A. M., Vu, M. N., & Cui, Y. J. (2011). Effects of the maximum soil aggregates size and cyclic wetting-drying on the stiffness of a lime-treated clayey soil. *Géotechnique*, 61(5), 421-429. <https://doi.org/10.1680/geot.SIP11.005>.
27. Wang, Y., Cui, Y. J., Tang, A. M., Tang, C. S., & Benahmed, N. (2015). Effects of aggregate size on water retention capacity and microstructure of lime-treated silty soil. *Géotechnique Letters*, 5(4), 269-274. <https://doi.org/10.1680/jgele.15.00127>.
28. Van Lier, J. (2014). Revisiting the S-index for soil physical quality and its use in Brazil. *Revista Brasileira de*

- Ciência do Solo*, 38, 1-10. doi.org/10.1590/S0100-06832014000100001.
29. Zhai, Q., Rahardjo, H., Satyanaga, A., Dai, G., & Zhuang, Y. (2020). Framework to estimate the soil-water characteristic curve for soils with different void ratios. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 4399-4409. [doi:10.1007/s10064-020-01825-8](https://doi.org/10.1007/s10064-020-01825-8).
30. Javanshir, S., Bayat, H., & Gregory, A. S. (2020). Effect of free swelling index on improving estimation of the soil moisture retention curve by different methods. *Catena*, 189, 104479. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104479>.
31. Bayat, H., Rastgou, M., Nemes, A., Mansourizadeh, M., & Zamani, P. (2017). Mathematical models for soil particle-size distribution and their overall and fraction-wise fitting to measurements. *Eur. J. Soil Sci.* 68, 345-364. <https://doi.org/10.1111/ejss.12423>.
32. Khneifer, J., Khadem-ol-Rasoul, A., & Amerikha, H. (2020). Modelling soil aggregate stability as an index of soil erodibility using geomorphometric parameters. *Agricultural Engineering*. 43(1), 49-64. <https://doi.org/10.22055/agen.2020.28561.1482>.
33. Armin, M., Rohipour, H., Ahmadi, H., Salajegheh, A., Mahdian, M. H., & Gurbanian Kheybari, V. (2015). Relationship between Aggregate Stability and Selected Soil Properties in Taleghan Watershed. *Journal of Range and Watershed Management*. 61 (2), 295-275. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2016.61683>. [In Persian]
34. Dimoyiannis, D. G., Tsadilas, C. D., & Valmis, S. (1998). Factors affecting aggregate instability of Greek agricultural soils. *Communications in Soil Science and plant analysis*, 29(9-10), 1239-1251. <https://doi.org/10.1080/00103629809370023>.
35. Kouchami-Sardoo, I., Shirani, H., Esfandiarpour Borojni, A., & Besalatpour, A. A. (2018). Determining the Features Influencing the Structural Stability of Soils of Arid Regions Using a Hybrid GA-ANN Algorithm. *Applied Soil Research*, 8(3), 129-143. [In Persian]
36. Igwe, C. A., & Mbagwu, J. S. C. (1995). Physical properties of soils of southeastern Nigeria and the role of some aggregating agents in their stability. *Soil Science*, 160(6), 431-441. [doi: 10.1097/00010694-199512000-00009](https://doi.org/10.1097/00010694-199512000-00009).
37. Mbagwu, J. S. C., & Bazzoffi, P. (1998). Soil characteristics related to resistance of breakdown of dry soil aggregates by water-drops. *Soil and Tillage Research*, 45(1-2), 133-145. [https://doi.org/10.1016/S0933-3630\(96\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0933-3630(96)00133-X).
38. Bardsirizadeh, S., Esfandiarpour Borujeni, I., Basalatpour, A., & Abbaszadeh Dehji, P. (2016). Determining the most effective soil component in estimating the stability of soil structure using the geostatistics method. *Journal of Water and soil*. 31(2), 533-544. <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i2.54438>. [In Persian]
39. Etminan, S., Kiani, F., Khormali, F., & Habashi, H. (2013). Effect of soil properties with different parent materials on aggregate stability: in Shastkola watershed, Golestan province. *Soil management and sustainable production*. 1 (2), 59-39. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23221267.1390.1.2.3.8>. [In Persian]
40. Bouslihim, Y., Rochdi, A., Aboutayeb, R., El Amrani, Paaza N., Miftah, A., & Hssaini L. (2021). Soil Aggregate Stability Mapping Using Remote Sensing and GIS-Based Machine Learning Technique. *Frontiers in Earth Science*. 9, 748859. [https://doi:10.3389/feart.2021.748859](https://doi.org/10.3389/feart.2021.748859).
41. Nikpoor, M., Mahboobi, A., Mosadeghi, M., & Safadoost, A. (2018). Investigating the effect of intrinsic soil properties on the building stability of some soils in Hamadan province. *Agricultural sciences and techniques and natural resources, water and soil sciences*, 15, 58. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.24763594.1390.15.58.6.0>. [In Persian]

42. Kamali, K., Zehtabian, G., Mesbahzadeh, T., Shahab Arkhazloo, H., Arabkhedri, M., & Moghadamnia, A. (2019). Evaluation of the Soil Sustainability Indices in Desert Areas (Case study: Rangeland and Agriculture fields of Semnan). *Journal of Range and Watershed Management*, 73, 1. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2020.275953.1353>. [In Persian]
43. Toogood, J. A. (1978). Relation of aggregate stability to properties of Alberta soils.
44. Rivera, J. I., & Bonilla, C. A. (2020). Predicting soil aggregate stability using readily available soil properties and machine learning techniques. *Catena*, 187, 104408. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104408>.
45. Zeraatpisheh, M., Ayoubi, S., Mirbagheri, Z., Mosaddeghi, M. R., & Xu, M. (2021). Spatial prediction of soil aggregate stability and soil organic carbon in aggregate fractions using machine learning algorithms and environmental variables. *Geoderma Regional*, 27, e00440. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00440>.

