

روابط بین پایداری خاکدانه‌ها و برخی خصوصیات خاک در خاک‌های حوزه آبخیز طالقان

- ❖ محسن آرمین*: استادیار، دانشگاه یاسوج، ایران.
- ❖ حسن روحی پور: دانشیار، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، ایران.
- ❖ حسن احمدی: استاد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران.
- ❖ علی سلاجقه: دانشیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.
- ❖ محمد حسین مهدیان: دانشیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ایران.
- ❖ وجیهه قربان‌نیا خبیری: دانشجوی دوره دکتری محیط زیست، دانشگاه ملایر، ایران.

چکیده

پایداری خاکدانه‌ها کی از خصوصیات اصلی مؤثر بر فرسایش‌پذیری و ویژگی‌های اصلی هیدرولیکی و فیزیکی خاک است. آگاهی از مؤلفه‌های خاک کنترل‌کننده پایداری خاکدانه‌ها برای حفظ ساختمان خاک بسیار مهم است. همچنین شناسایی خصوصیات بحرانی خاک مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها در حوزه آبخیزی که فرسایش خاک ناشی از الگوهای طبیعی پایداری خاکدانه‌ها است، پایه و اساس استراتژی‌های حفاظتی است. هدف این مطالعه که در خاک‌های سطحی طالقان انجام شده، بررسی رابطه بین پایداری خاکدانه‌ها و برخی از خصوصیات خاک است. در این تحقیق، واحدهای کاری بر اساس همگنی در شیب دامنه، جهت جغرافیایی و سنگ‌شناسی حاصل شده‌اند، سپس با تکیه بر نتایج مطالعات زمین‌آماری در مقیاس واحدهای همگن کاری در بخشی از خاک‌های حوزه آبخیز طالقان به وسعت ۳۲۶۰ هکتار، ۸۴ نقطه به‌عنوان نقاط نمونه‌برداری خاک انتخاب شده‌اند. شاخص‌های پایداری مورد استفاده میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و پایداری مرطوب خاکدانه‌ها هستند. همبستگی بین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و خصوصیات خاک با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون استخراج شده و بر اساس معنی‌داری آماری آن‌ها ارزیابی شده است. سپس بر اساس نتایج همبستگی و با استفاده از روش رگرسیون گام‌به‌گام اقدام به توسعه مدل‌های پیش‌بینی پایداری خاکدانه‌ها شد. نتایج حاکی از غیرقابل انتظار بودن همبستگی بین خصوصیات خاک و پایداری خاکدانه‌ها است به طوری که همبستگی بین پایداری خاکدانه‌ها با درصد آهک، رس و رطوبت اشباع منفی است در حالی که با درصد شن ریز و شن خیلی ریز مثبت است. بنابراین بهبود پایداری خاکدانه‌ها و کنترل فرسایش خاک در حوزه آبخیز طالقان در گرو مدیریت این خصوصیات خاک و انجام پروژه‌های حفاظت خاک در جهت تعدیل و بهینه کردن آن‌ها است.

واژگان کلیدی: پایداری خاکدانه‌ها، خصوصیات خاک، واحد کاری، رگرسیون گام‌به‌گام، حوزه آبخیز طالقان.

۱. مقدمه

در حالی که مطالعات زیادی راجع به روابط بین پایداری خاکدانه‌ها و خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک وجود دارد، مطالعات چندانی راجع به توسعه این روابط در مارن‌ها وجود ندارد. علاوه بر این نتایج اغلب این مطالعات نشان می‌دهد که محل و نوع خاک نقش مهمی در تعیین این روابط دارد و در زون‌های اقلیمی و خاک‌های مختلف روابط متفاوتی وجود دارد. بنابراین، به‌منظور تفکیک این‌که مدیریت کدام‌یک از این خصوصیات می‌تواند منجر به بهبود پایداری خاکدانه‌ها در یک منطقه معین شود، نیاز است که این روابط در مناطق مختلف مطالعه شود. مطالعات مختلف گزارش کرده‌اند که در معادلات پیش‌بینی فرسایش خاک، به‌جای فرسایش‌پذیری خاک که تعیین آن مستلزم انجام آزمایش‌های پرهزینه و زمان‌بر است، می‌توان از شاخص پایداری خاکدانه‌ها استفاده کرد [۵، ۱۶، ۶۵]. طبق تعریف، پایداری خاکدانه‌ها توانایی و مقاومت اتصالات آن‌ها در مقابل تنش‌های ناشی از فرایندهای پخشیدگی مثل شخم، فرایندهای انقباض و انبساط ذرات خاک و انرژی جنبشی قطرات باران است که خود تابعی از نیروهای جاذبه و دافعه ناشی از فعل‌وانفعالات بین مولکولی و الکترواستاتیک بین محلول و ذرات خاک است [۵۲]. در همین زمینه گفته شده که خاکدانه‌ای شدن حاصل فرایندهای فولکوله‌ای شدن و سیمانی شدن است که خصوصیات خاک نقش برجسته‌ای در این دو مکانیسم بازی می‌کنند [۱۰]. رابطه بین ساختمان خاک و تعدادی از خصوصیات خاک شامل مقدار شن، سیلت، رس، آهک، اسیدیته، هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی و نسبت جذب سدیم توسط مورد بررسی قرار گرفت [۶۲]. نتایج نشان داد که مقدار رس و نسبت جذب سدیم مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها هستند. همبستگی بین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و خصوصیات خاک به استثناء مقدار آهک و

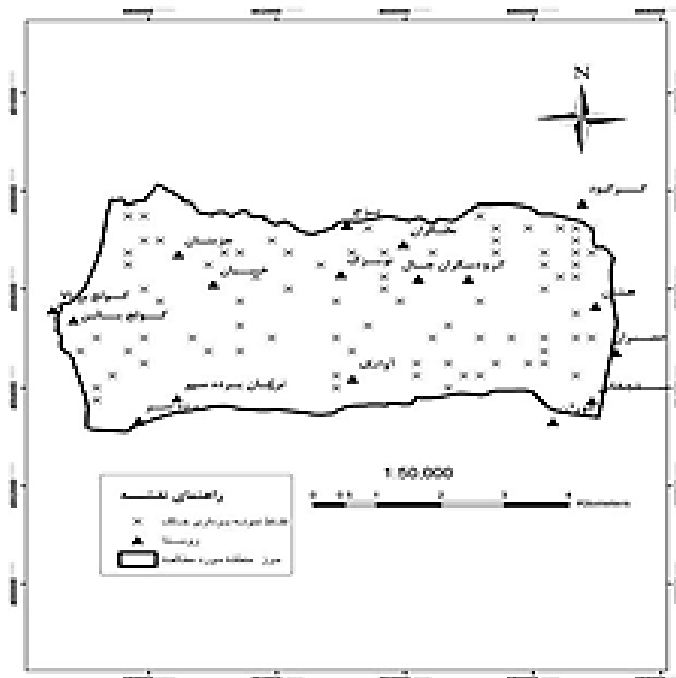
شن ریز مثبت بود. طی تحقیقی، محققین به این نتیجه رسیدند که چنانچه اندازه کلوخه‌های خاک افزایش پیدا کند، میزان جداشدگی ذرات خاک افزایش پیدا کرده و مقاومت کششی بین خاکدانه‌ها کاهش پیدا می‌کند که در نهایت میزان تلفات پاشمان در خاکدانه‌های بزرگ بیشتر از خاکدانه‌های کوچک است [۱]. اثرات برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک روی شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها مورد بررسی قرار گرفت [۴۸]. نتایج نشان داد که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها رابطه منفی معنی‌داری با ظرفیت تبادل کاتیونی و نسبت جذب سدیم دارد ولی بافت خاک با وجود تغییرات زیاد، تأثیر معنی‌داری روی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها ندارد. به‌طور کلی مهم‌ترین خصوصیات خاک مؤثر بر پایداری خاکدانه‌ها و فرسایش خاک از زمان تحقیقات اولیه محققان پیشرو در این زمینه به خوبی شناخته شده است [۲۷، ۳۶، ۶۶، ۶۷]. خصوصیات که اغلب ذکر شده شامل بافت خاک، کانی‌شناسی رس، مقدار مواد آلی، نوع و غلظت کاتیون‌ها، مقدار آهک و اثرات متقابل متعدد بین این خصوصیات هستند. یک مطالعه مروری کامل از این اثرات ارائه شد [۱۹]. از بین خصوصیات خاک، سه مورد از آن‌ها نقش مهمی در پایداری خاکدانه‌ها دارد. این خصوصیات شامل درصد سدیم قابل تبادل خاک [۱۸، ۲۱، ۳۵، ۵۹]. اکسیدهای آهن و آلومینیوم و اکسی هیدروکسیدهایی که باعث سیمانی شدن خاکدانه‌ها می‌شوند، به ویژه برای خاک‌های تروپیکال و لاتریتی [۴۰، ۵۴] و مواد آلی که عامل اتصال‌دهنده بین ذرات معدنی خاک است [۱۴، ۲۶، ۴۶، ۶۳] و سطح خاک را در مقابل ضربه قطرات باران محافظت می‌کند. همچنین، نفوذپذیری آب را بهبود می‌بخشد و ممکن است ویژگی‌های آب دوستی از خود نشان دهد که سرعت خیس شدن و واریختگی خاک را کاهش می‌دهد [۳۴، ۴۳، ۶۱]. در کشور نیجریه، رابطه بین پایداری خاکدانه‌ها و تعدادی از خصوصیات خاک (مقدار مواد آلی، فسفر در دسترس، اسیدیته، وزن مخصوص ظاهری، مقدار رطوبت،

۲. روش‌شناسی تحقیق

۱.۲. معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از حوزه آبخیز طالقان است که در محدوده ۳۶ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی قرار دارد. منطقه فوق از غرب به روستای کولج، از شرق به روستای کرکبود، از جنوب به رودخانه طالقان و از شمال به مرز واحدهای سنگی مارن و گدازه بازی (Ekv) محدود می‌شود. نتایج حاصل از مطالعات انجام شده در حوزه آبخیز طالقان حاکی از فرسایش‌پذیری قابل ملاحظه اراضی با سنگ بستر انواع مارن است، از این‌رو، گستره این تحقیق محدود به بخشی از این اراضی به وسعت ۳۲۶۰ هکتار است. این محدوده عمدتاً دارای سنگ بستر مارنی مربوط به دوران سوم زمین شامل زیر واحدهای سنگی GY (گلسنگ قرمز و سیلت ژپسی) و NGM (گلسنگ قرمز و سیلت) و رسوبات آبرفتی شامل Q1 (نهشته پلیستوسن قدیمی) و Q2 (رسوبات آبرفتی و سیلابی عهد حاضر) است. خصوصیات خاک تابعی از خصوصیات فیزیکی-شیمیایی سنگ مادر است، خاک‌های ایجاد شده بر روی لیتولوژی آهک دارای درصد کربنات کلسیم بالا، pH قلیایی و EC کم می‌باشد. خاک‌های ایجاد شده بر روی مارن تبخیری عمدتاً رسی دارای آهک، EC نسبتاً بالا و pH قلیایی می‌باشد. موقعیت کلی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری خاک در شکل (۱) نشان داده شده است.

مقادیر شن درشت، شن ریز، سیلت و رس را بررسی شد [۳۲]. نتایج نشان داد که همه خصوصیات فوق‌الذکر به‌استثنای فسفر در دسترس و مقدار رس رابطه خطی معنی‌داری با شاخص پایداری خاکدانه‌ها دارند. اثرات بعضی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک روی شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها مورد بررسی قرار گرفت [۴۸]. نتایج نشان داد که میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها رابطه منفی معنی‌داری با ظرفیت تبادل کاتیونی و نسبت جذب سدیم دارد ولی بافت خاک باوجود تغییرات زیاد، تأثیر معنی‌داری روی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها ندارد. رابطه بین ساختمان خاک و تعدادی از خصوصیات خاک (مقدار ماسه، سیلت، رس، کربنات کلسیم معادل، اسیدیته، هدایت الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی و نسبت جذب سدیم) مورد بررسی قرار گرفت [۶۲]. نتایج نشان داد که مقدار رس و نسبت جذب سدیم مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها هستند. همبستگی بین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و خصوصیات خاک با استثناء مقدار کربنات کلسیم معادل و شن ریز مثبت بود. مشکلات نسبی در کمی کردن نقش و روابط این خصوصیات با پایداری خاکدانه‌های خاک به‌طور گسترده‌ای شناسایی شده است. درحالی‌که بعضی از این خصوصیات اثرات سببی مستقیمی بر پایداری خاکدانه‌ها دارند بعضی دیگر اثرات غیرمستقیمی دارند، بنابراین به‌عنوان شاخص‌های وضعیت پایداری خاکدانه‌ها عمل می‌کنند. بنابراین این مطالعه به‌منظور دستیابی به اهداف زیر انجام گرفته است: (۱) بررسی چگونگی ارتباط خصوصیات خاک انتخاب شده با پایداری خاکدانه‌ها در منطقه مورد مطالعه، (۲) توسعه مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی پایداری خاکدانه‌های خاک در منطقه مورد مطالعه و (۳) شناسایی مهم‌ترین خصوصیات خاک با هدف مدیریت پایداری خاکدانه‌های خاک.



شکل ۱. موقعیت کلی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری

۲.۲. تعیین نقاط نمونه برداری خاک

به منظور تعیین نقاط نمونه برداری خاک ابتدا نقشه واحدهای همگن کاری از تلفیق سه نقشه کلاس‌های شیب زمین، کلاس‌های جهت جغرافیایی و سنگ‌شناسی حاصل شده است. نقشه شیب و جهت جغرافیایی با استفاده از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ تهیه شدند. در نقشه شیب، کلاسه‌بندی بر اساس فراوانی شیب‌های موجود در منطقه (۰-۱۲، ۱۲-۲۵، ۲۵-۴۰ و $40 <$) صورت گرفته است. بیشترین کلاس شیب مربوط به شیب بیشتر از ۴۰ درصد و کمترین آن مربوط به شیب ۱۲-۲۵ درصد است که به ترتیب ۴۳/۰۹ و ۱۴/۷۲ درصد از کل منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. کلاسه‌بندی نقشه جهت جغرافیایی نیز بر اساس جهت‌های جغرافیایی موجود در منطقه مورد مطالعه صورت گرفت. در واقع جهت‌های جغرافیایی فرعی به دلیل مساحت کم لحاظ نشده‌اند. بیشترین کلاس جهت جغرافیایی مربوط به جهت جنوبی و کمترین آن مربوط

به جهت شمالی است که به ترتیب ۳۶/۰۲ و ۰/۸۷ درصد از کل منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. نقشه سنگ‌شناسی منطقه مورد مطالعه از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی کشور استخراج شده است. در این نقشه واحد سنگی NGM با ۴۰/۴۷ درصد بیشترین مساحت منطقه را اشغال کرده است. بدین ترتیب نقشه‌های سنگ‌شناسی، شیب و جهت جغرافیایی با هم تلفیق شدند که حاصل این تلفیق پس از پالایش و ادغام واحدهای کوچک در واحدهای بزرگ، نقشه‌ای با ۵۰ نوع واحد کاری همگن با مساحت ۹/۸ تا ۳۰۷/۸ هکتار شد. البته قبل از ادغام نقشه‌های پایه به منظور تهیه نقشه واحدهای همگن کاری نهایی، ابتدا از طریق پیمایش‌های صحرایی یک‌هفته‌ای و نظارت دقیق اقدام به نهایی کردن این لایه‌های اطلاعاتی شد. بعد از تهیه نقشه واحدهای کاری، اقدام به طراحی شبکه نمونه برداری سیستماتیک در ابعاد ۵۰۰×۵۰۰، ۲۵۰×۲۵۰ و ۱۰۰×۱۰۰ متر شد که تعداد نقاط نمونه برداری در هر

بر این اساس از ۲۳۸ نمونه مرحله اول، جمعاً ۸۴ نمونه برای اندازه‌گیری شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها انتخاب شد. با استفاده از نرم‌افزار DNR Garmin نقاط نمونه‌برداری به دستگاه موقعیت‌یاب جهانی^۳ منتقل و برای بررسی پایداری خاکدانه‌ها از لایه یک تا سه سانتی‌متری خاک سطحی نمونه برداشت شد زیرا این لایه تحت تأثیر باران طبیعی است و نقش تعیین‌کننده‌ای در فرایندهای فرسایش دارد [۱۱].

۳.۲. اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکو-شیمیایی

نمونه‌های خاک

پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه خاکشناسی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، آن‌ها را هوا خشک کرده^۴، کلوخه‌های بزرگ به آرامی با دست خرد کرده^۵ و از الک دو، سه و پنج میلی‌متر عبور داده شدند. خاکدانه‌های بزرگ‌تر از سه میلی‌متر برای آزمایش‌های پایداری خاکدانه‌ها و ذرات کوچک‌تر از دو میلی‌متر برای بررسی خصوصیات فیزیکو-شیمیایی مورد استفاده قرار گرفتند. خصوصیات فیزیکو-شیمیایی نمونه‌های خاک با استفاده از روش‌های معمول اندازه‌گیری شده‌اند. هدایت الکتریکی (EC25) و اسیدیته (pH) در عصاره ۱:۱ خاک اندازه‌گیری شده‌اند. بافت خاک به روش هیدرومتری و با متلاشی‌کردن نمونه خاک در ۱۰۰ میلی‌لیتر هگزامتافسفات سدیم ۴۰ درصد تعیین شد [۲۲]. برای بررسی توزیع اندازه ذرات شن، سوسپانسیون آب و خاک تهیه شده به منظور اندازه‌گیری بافت خاک از الک‌های ۰/۰۵۳، ۰/۱۲۵ و ۰/۲ میلی‌متر عبور داده شد و سپس محتویات باقی‌مانده روی هر الک را کاملاً شستشو داده تا تمامی ذرات از هم جدا شدند. بعد از شستشوی کامل محتویات باقی‌مانده روی هر الک جمع‌آوری، خشک و

یک از این شبکه‌ها به ترتیب ۱۱۵، ۵۳۱ و ۳۳۳۸ نقطه بوده است. در مرحله بعد با در نظر گرفتن ابعاد واحدهای همگن کاری و مقایسه آن‌ها با شبکه‌های نمونه‌برداری مختلف از نظر توزیع و فراوانی مناسب نقاط نمونه‌برداری در هر واحد همگن کاری، شبکه نمونه‌برداری ۲۵۰×۲۵۰ متر به عنوان شبکه نهایی نمونه‌برداری انتخاب شد. از ۵۳۱ نقطه مشخص شده در شبکه ۲۵۰×۲۵۰ مترمربعی، در ۴۳۸ نقطه نمونه‌برداری انجام شد و ۹۳ نقطه به دلیل قرار گرفتن در بستر رودخانه و حریم روستا قابل برداشت نبودند. در مرحله اول، برای کسب اطلاع از طبیعت تغییرپذیرها، از بین ۴۳۸ نمونه برداشت شده، اقدام به انتخاب ۲۳۸ نمونه از آن‌ها به عنوان نمونه‌های مرحله اول بر اساس توزیع و فراوانی مناسب آن‌ها در واحدهای کاری شد تا با استفاده از داده‌های حاصل از آن‌ها و تخمین تغییرپذیری و شناخت توزیع مکانی متغیر، به طراحی مرحله بعد اندیشیده شود. این توالی باید تا آنجا ادامه یابد که داده‌های حاصل از یک مرحله معینی از نمونه‌برداری مؤید صحت و یا دقت آن در محدوده از پیش تعیین شده باشد. بعد از اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکو-شیمیایی ۲۳۸ نمونه خاک و استخراج آماره‌ها، برای دستیابی به نحوه توزیع ساختار مکانی منطقه مورد مطالعه از نظر خصوصیات فیزیکو-شیمیایی مورد بررسی، با استفاده از برنامه الحاقی Geostatistical Analyst نسخه ۹/۳ نرم‌افزار ARCGIS اقدام به بررسی واریوگرافی و ترسیم نیم‌تغییرنمای هر یک از متغیرهای فیزیکو-شیمیایی خاک با استفاده از مدل‌های مختلف و جفت‌سازی^۱ بهترین مدل بر اساس مجذور میانگین خطای تخمین^۲ مدل شد و در نهایت پارامترهای مربوط به آن شامل اثر قطعه‌ای، سقف و شعاع تأثیر استخراج شد. با توجه به شعاع تأثیر خصوصیات فیزیکو-شیمیایی مهم و مؤثر در پایداری خاکدانه‌ها (اجزاء بافت خاک و عوامل مؤثر در خاکدانه سازی نظیر ماده آلی و آهک) اقدام به طراحی شبکه نمونه‌برای اندازه‌گیری شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها بر اساس حداقل شعاع تأثیر به دست آمده، شد.

¹ Fitting

² Root Mean Square Error

³ Global Position System

⁴ Air-Dried

⁵ Crushed

محللول خاک اندازه‌گیری شد. بعد از اندازه‌گیری کاتیون‌ها، درصد سدیم قابل تبادل (ESP) و نسبت جذب سدیم (SAR) از طریق فرمول‌های زیر محاسبه شده است.

$$ESP = \frac{Na^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100 \quad (1)$$

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (2)$$

که در آن‌ها: غلظت کاتیون‌های Na، K، Ca و Mg به میلی‌اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم خاک است. بر این اساس، در این تحقیق ۱۸ خصوصیت فیزیکی-شیمیایی خاک شامل ماده آلی، هدایت الکتریکی، اسدیته، رس، سیلت، شن کل، شن درشت، شن ریز، شن خیلی ریز، آهک، درصد رطوبت اشباع، سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم، کلر، اکسید آهن، نسبت جذب سدیم و درصد سدیم قابل تبادل اندازه‌گیری شده است.

۴.۲. اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها با استفاده

از روش لی بیسونایس^۷

از دهه آخر سال ۱۹۳۰ تاکنون چندین روش برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. این موضوع از یک طرف نشان‌دهنده گرایش محققان در بررسی این ویژگی خاک و از طرف دیگر نبود یک روش استاندارد رضایت‌بخش است. این روش اکثر جنبه‌های قابل توجه در روش‌های رایج را در برمی‌گیرد. دستورالعمل این روش از چندین روش موجود [۲۴، ۲۹، ۳۷] اقتباس شده است. این روش همچنین در دامنه وسیعی از خاک‌ها و شرایط مختلف محیطی قابل اجرا است. نمونه‌های خاک از الک پنج میلی‌متر رد شده و

وزن شد. ذرات باقیمانده روی الک ۰/۰۵۳ میلی‌متر (۰/۵۳ - ۰/۱۲۵ میلی‌متر) معادل شن خیلی ریز، ذرات روی الک ۰/۱۲۵ (۰/۱۲۵ - ۰/۲ میلی‌متر) معادل شن ریز و ذرات روی الک ۰/۲ میلی‌متر (۰/۲ تا دو میلی‌متر) معادل شن درشت است. مقدار ماده آلی به روش والکی-بلاک تعیین شد [۴۷]. آهک به روش کلسیمتری اندازه‌گیری شد. درصد رطوبت اشباع^۱ خاک با استفاده از اختلاف بین وزن خشک خاک و وزن مرطوب خاک هنگامی که دارای رطوبت ۱۰۰ درصد (اشباع) است، تعیین شد. اکسید آهن با روش سترات-بیکربنات-دی‌تیونیت^۲ اندازه‌گیری شد [۴۴] به این صورت که چهار گرم خاک نرم عبور داده شده از الک ۰/۱۵ میلی‌متر وزن و در درون لوله ۱۰۰ میلی‌لیتری سانتریفیوژ ریخته شد. سپس ۴۰ میلی‌لیتر سترات سدیم^۳ ۰/۳ مولار و پنج میلی‌لیتر بیکربنات سدیم^۴ یک مولار به آن اضافه شد. لوله سانتریفیوژ در درون یک حمام آب^۵ با درجه حرارت ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. یک گرم دی‌تیونیت سدیم (هیدروسولفات سدیم)^۶ به آن اضافه شد و به مدت ۱۵ دقیقه با دستگاه همزن برقی نمونه‌ها کاملاً به همزده شدند. در ادامه به مدت پنج دقیقه در دور ۱۶۰۰ تا ۲۲۰۰ (دور بر دقیقه) نمونه‌ها سانتریفیوژ شد. سپس، عصاره در یک بالن ۵۰۰ میلی‌لیتری ریخته شد و به حجم رسانده شد. میزان اکسید آهن عصاره استخراج شده با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری و در نهایت به میلی‌گرم در ۱۰۰ گرم نمونه خاک محاسبه شد.

کاتیون‌های تبادل‌پذیری با روش استخراج کاتیون‌ها با استفاده از استات آمونیم و در ادامه روش تیتراسیون برای کلسیم و منیزیم و روش شعله‌سنجی برای سدیم و پتاسیم اندازه‌گیری شده است. مقدار آنیون کلر در عصاره

¹ Saturation Point

² Citrate-Dithionate-Bicarbonate Extraction

³ C6H5Na3O7.2H2O

⁴ NaHCO3

⁵ Water Bath

⁶ Na2S2O4

⁷ Le Bissonnais

خاکدانه‌ها در هفت طبقه قطری بیان می‌شود.

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (3)$$

$$r_n = r_{n+1} \text{ و } r_0 = r_1$$

که در آن r_i قطر i امین الک به میلی‌متر، m_i وزن خاکدانه‌های باقیمانده روی i امین الک (گرم) تقسیم بر وزن کل نمونه خاک و n تعداد الک‌ها است.

۵.۲. اندازه‌گیری پایداری مرطوب خاکدانه‌ها^۵

پایداری مرطوب خاکدانه‌ها بر این اساس تعیین می‌شود که خاکدانه‌های ناپایدار هنگام غوطه‌ور شدن در آب آسان‌تر از خاکدانه‌های پایدار شکسته می‌شوند. برای تعیین پایداری، هشت الک (با توری ۰/۲۵ میلی‌متر) با یک مقدار مشخصی از خاکدانه‌های خاک پر می‌شوند. این الک‌ها در یک قوطی که با آب مقطر پر شده قرار داده می‌شوند که برای یک مدت زمان خاصی بالا و پایین می‌شوند. خاکدانه‌های ناپایدار از هم جدا شده و از توری‌های الک عبور کرده و در قوطی‌های پر شده از آب که در زیر الک‌ها قرار گرفته‌اند، جمع می‌شوند. بعد از این زمان خاص، قوطی‌ها برداشته می‌شود و با یک مجموعه قوطی دیگر که با آب حاوی متلاشی کننده ۶ پر شده، جایگزین می‌شوند. سپس، الک کردن تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که همه خاکدانه‌ها منهدم شوند. ذرات ماسه و قطعات ریشه گیاهان روی الک باقی می‌ماند و فقط خاکدانه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. بعد از خشک کردن، قوطی‌های حاوی خاکدانه‌ها، وزن خاکدانه‌های پایدار و ناپایدار تعیین می‌شود. تقسیم وزن خاکدانه‌های پایدار به وزن کل خاکدانه‌ها، شاخصی از پایداری خاکدانه‌ها است. برای جلوگیری از واریختگی خاکدانه‌ها هنگام گذاشتن

خاکدانه‌های سه تا پنج میلی‌متر برای آزمایش انتخاب شده است. کمی قبل از اجرای تیمارها، خاکدانه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در حرارت ۴۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده تا این‌که مقدار رطوبت و در نتیجه وزن آن‌ها ثابت شود.

نمونه‌های آماده‌شده برای اجرای سه تیمار زیر مورد بررسی قرار گرفتند: (۱) خیس شدن سریع (Fw)^۱، (۲) خیس شدن آهسته (Sw)^۲ و (۳) شکستگی مکانیکی ناشی از تکان دادن خاک بعد از خیس کردن اولیه (Ws)^۳. برای تیمار خیس شدن سریع، پنج گرم خاکدانه به مدت ۱۰ دقیقه در آب مقطر غوطه‌ور می‌شود. بعد از خارج کردن آب مقطر با پیپت، خاکدانه‌های مقاوم در برابر واریختگی به یک الک ۰/۰۵ میلی‌متری غوطه‌ور شده در اتانول منتقل می‌شوند و برای تفکیک ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر از خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر، ۲۰ بار الک به آرامی و با دست در داخل اتانول بالا و پایین می‌شود. خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۰۵ میلی‌متر در آون با حرارت ۴۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شوند سپس توزیع اندازه آن‌ها با الک‌های ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵ و ۰/۰۵ میلی‌متر به صورت خشک اندازه‌گیری می‌شود. در تیمار خیس شدن آهسته، خاکدانه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه روی یک کاغذ صافی در معرض مکش ۰/۳ - کیلو پاسکال قرار می‌گیرند. سپس دستورالعمل توزیع اندازه ذرات تشریح شده در بالا برای تیمار خیس شدن سریع اجرا می‌شود. در تیمار شکستگی مکانیکی ناشی از تکان دادن خاک بعد از خیس کردن اولیه به منظور حفظ ساختمان خاک، ابتدا خاکدانه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در اتانول غوطه‌ور می‌شوند، سپس به یک ارلن که با ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب آب مقطر پر شده انتقال داده می‌شوند. متعاقباً درب ارلن با چوب پنبه بسته‌شده و در مدت یک دقیقه ۲۰ بار به حالت سروته شدن^۴ تکان داده می‌شود. سپس دستورالعمل خشک کردن و الک کردن تشریح شده در بالا انجام می‌شود. برای هر نمونه خاک، پایداری خاکدانه‌ها برحسب میانگین وزنی قطر

¹ Fast wetting

² Slow wetting

³ Wetting stirring

⁴ End - Over - End

⁵ Wet Aggregate Stability

⁶ Disperse

همبستگی بین شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها و خصوصیات فیزیکو-شیمیایی خاک با استفاده از همبستگی پیرسون.

ایجاد توابع انتقالی بین خصوصیات فیزیکو-شیمیایی خاک و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها.

معادلات رگرسیونی که رابطه بین ویژگی‌های خاک را بیان می‌کند به عنوان تابع انتقالی (PTS) نام‌گذاری شده‌اند [۲۵، ۹]. به مجموعه‌ای از این توابع انتقالی (PTFs) گفته می‌شود. توابع انتقالی "داده‌های موجود" را به "داده‌های مورد نیاز" تبدیل می‌کنند به عبارت دیگر اصطلاح PTFs برای توصیف معادله‌هایی به کار می‌رود که وابستگی بین متغیرهای زود یافت (نظیر بافت خاک، مواد آلی و غیره) و دیر یافت (نظیر پایداری خاکدانه‌ها و فرسایش‌پذیری) را نشان می‌دهند [۲]. برای تعیین قابلیت کاربرد خصوصیات خاک در تخمین پایداری خاکدانه‌ها به منظور ارائه مدل پیش‌بینی، لازم است همبستگی بین خصوصیات فیزیکو-شیمیایی خاک (اجزاء بافت خاک و عوامل مؤثر در خاکدانه سازی) و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌های حاصل از ۸۴ نمونه خاک تعیین و ارزیابی شود. برای ایجاد توابع انتقالی قبل از هر اقدامی باید همگن بودن منطقه از نظر متغیرهای مستقل و وابسته بررسی شود برای این کار ابتدا اثر واحد سنگ‌شناسی بر روی خصوصیات فیزیکو-شیمیایی نمونه‌های خاک مورد بررسی در این بخش قرار گرفت تا در صورت معنی‌داری اثر واحد سنگ‌شناسی، مدل‌های پیش‌بینی بر اساس گروه‌های تفکیک شده از آزمون مقایسه میانگین‌ها ارائه شوند. به عبارت دیگر در صورتی که واحد سنگ‌شناسی تأثیر معنی‌داری در مقدار رس نمونه‌های مورد بررسی برای ارائه رابطه بین رس و شاخص پایداری داشته باشد، محقق مجاز نیست که همه داده‌های رس را در قالب یک معادله با داده‌های شاخص پایداری برازش دهد. قبل از ورود به بخش رگرسیون ابتدا باید خطی یا غیر خطی بودن رابطه بین متغیر وابسته و هر یک از متغیرهای مستقل بررسی شود. در صورت

الک‌ها در قوطی‌های پر شده با آب، خاکدانه‌ها از قبل خیس می‌شوند.

$$WAS = \frac{Wds}{(Wds + Wdw)} \quad (۴)$$

که در آن WAS شاخص پایداری مرطوب خاکدانه‌ها، Wds وزن خاکدانه‌های متلاشی شده در محلول متلاشی کننده (گرم) و Wdw وزن خاکدانه‌های متلاشی شده در آب مقطر (گرم) است.

۶.۲. تجزیه و تحلیل داده‌ها

با استفاده از نسخه ۱۶ نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل داده‌ها به صورت زیر انجام گرفت:

آزمون تشخیص داده‌های پرت برای داده‌های خصوصیات فیزیکو-شیمیایی نمونه‌های خاک و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها: داده‌های پرت مشاهده‌هایی متفاوت از دیگر داده‌ها هستند. این داده‌ها نتایج تحلیل‌های آماری را تحت تأثیر قرار می‌دهند و باید قبل از هر تحلیل آماری، داده‌های پرت شناسایی و توجیه پذیر بودن و یا نبودن و در نتیجه حذف یا عدم حذف آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق برای تشخیص داده پرت از معیار $M \pm 3S.D.$ استفاده شده است که M میانگین متغیر و $S.D.$ انحراف معیار متغیر است. مشاهده‌هایی که خارج از این دامنه باشند از لحاظ آماری پرت به حساب می‌آیند. البته در صورتی که نظرات کارشناسی، مشاهدات صحرائی و اطلاعات نقشه‌های پایه دال بر پرت نبودن این داده‌ها باشد باید از حذف آن‌ها خودداری کرد.

بررسی نرمالیت‌ه توزیع داده‌های خصوصیات فیزیکو-شیمیایی نمونه‌های خاک و پایداری خاکدانه‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف.

استخراج آماره‌های حداکثر، حداقل، میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات خصوصیات فیزیکو-شیمیایی نمونه‌های خاک و پایداری خاکدانه‌ها.

مدل‌سازی شرکت داده شدند.

تابع انتقالی سوم

تمامی خصوصیات فیزیکی - شیمیایی به‌عنوان متغیر ورودی وارد مدل شدند.

۳. نتایج

۳.۱. تجزیه و تحلیل‌های آماری

در این تحقیق رابطه بین برخی از خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها بررسی شده است که در ابتدا نتایج تجزیه و تحلیل‌های آماری داده‌ها از نظر وجود یا عدم وجود داده پرت، توزیع داده‌ها و آماره‌ها ارائه شده است و در ادامه نتایج همبستگی بین خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها ارائه و مدل‌های پیش‌بینی نشان داده می‌شود.

بر اساس معیار ارائه شده برای تشخیص داده‌های پرت، مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هیچ‌یک از تیمارهای مورد بررسی پرت نیست. اطلاعات مربوط به تشخیص داده پرت برای میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به تشخیص داده پرت برای میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها	میانگین	انحراف معیار	حد بالا	حد پایین
MWD-Fw	۰/۵۶	۰/۲۵	۱/۳۱	-
MWD-Sw	۱/۴	۰/۳۸	۲/۵۴	۰/۲۶
MWD-Ws	۱/۰۴	۰/۳۶	۲/۱۲	-

ولی در تیمار Fw غیر نرمال است که بعد از حذف تعدادی از نمونه خاک‌ها که به‌صورت قطعات سیمانی شده بودند، توزیع مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار Fw نیز نرمال شد به‌طوری‌که سطح معنی‌داری توزیع از ۰/۰۴۸ به ۰/۳۶ رسید.

خطی بودن روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته از رگرسیون خطی و در صورت غیر خطی بودن از رگرسیون غیر خطی استفاده می‌شود. به همین منظور ابتدا همبستگی بین ۱۸ خصوصیت فیزیکی - شیمیایی خاک با پایداری خاکدانه‌ها با استفاده از همبستگی پیرسون بررسی شد. بعد از انجام آزمون همبستگی پیرسون فقط خصوصیات فیزیکی - شیمیایی که رابطه معنی‌داری با شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها داشتند وارد مدل‌های رگرسیونی شده‌اند.

در ایجاد توابع انتقالی از روش رگرسیون گام‌به‌گام استفاده شد. در این روش بااهمیت‌ترین متغیرها مرحله به مرحله وارد معادله رگرسیونی می‌شود و این عمل تا هنگامی ادامه پیدا می‌کند که سطح خطای آزمون معنی‌داری به پنج درصد برسد.

تابع انتقالی اول

در ایجاد این تابع خصوصیات فیزیکی و اجزاء بافت خاک در مدل رگرسیونی شرکت داده شد و بهترین مدل رگرسیونی برای برآورد پایداری خاکدانه‌ها ایجاد شد.

تابع انتقالی دوم

در این تابع خصوصیات مؤثر در خاکدانه‌سازی (خصوصیات شیمیایی) به‌عنوان متغیر ورودی در

نتایج آزمون کولموگروف - اسمیرنوف نرمالیته توزیع مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها تحت مکانیسم‌های مختلف شکستگی خاکدانه‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که توزیع‌های مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار Sw و Ws نرمال

جدول ۲. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنف برای مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمارهای مختلف

Asymp.Sig.(2-tailed)	Kolmogorov-Smirnov Z	مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها
۰/۰۴۸	۱/۳۹	MWD-Fw
۰/۰۹	۱/۳۳	MWD-Sw
۰/۹۵	۰/۵۱	MWD-Ws

در جدول (۳) آماره‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با مکانیسم‌های مختلف شکستگی خاکدانه‌ها ارائه شده است. در این جدول، واحد شاخص‌های F_w ، S_w و W_s میلی‌متر و ضریب تغییرات نیز به درصد بیان شده است.

جدول ۳. شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها

شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها	آماره				
	میانگین	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	ضریب تغییرات
MWD-Fw	۰/۵۶	۱/۱۷	۰/۱۷	۰/۲۵	۴۵
MWD-Sw	۱/۴	۱/۹۷	۰/۵۱	۰/۳۸	۲۷
MWD-Ws	۱/۰۴	۱/۸۵	۰/۳	۰/۳۶	۳۴

تشخیص داده پرت، از لحاظ آماری مشاهده پرتی در داده‌های پایداری مرطوب خاکدانه‌ها وجود ندارد. این حدود در جدول (۴) ارائه شده‌اند. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنف توزیع داده‌های پایداری مرطوب خاکدانه‌ها در جدول (۵) ارائه شده است. نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که توزیع داده‌های پایداری مرطوب خاکدانه‌ها نرمال است.

برای همه نمونه‌های خاک، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هر سه تیمار مورد بررسی روند یکسانی را نشان داد. به این ترتیب که مقدار آن در تیمار $F_w < W_s < S_w$ و به ترتیب دارای میانگین $۱/۴$ ، $۱/۰۴$ و $۰/۵۶$ میلی‌متر بودند. دامنه مقادیر F_w ، S_w و W_s به ترتیب از $۰/۱۷$ تا $۱/۱۷$ ، $۰/۵۱$ تا $۱/۹۷$ و $۰/۳$ تا $۱/۸۵$ میلی‌متر بود.

با توجه به حد بالا و پایین معیار ارائه شده برای

جدول ۴. حدود بالا و پایین تشخیص داده پرت برای پایداری مرطوب خاکدانه‌ها

شاخص پایداری	میانگین	انحراف معیار	حد بالا	حد پایین
WAS	۰/۵۵	۰/۱۳	۰/۹۴	۰/۱۶

جدول ۵. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنف برای پایداری مرطوب خاکدانه‌ها

Asymp.Sig.(2-tailed)	Kolmogorov-Smirnov Z	شاخص پایداری
۰/۲۵۷	۱/۰۱۲	WAS

آماره‌های خصوصیات فیزیکو- شیمیایی نمونه خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۷) نشان داده شده است.

آماره‌های پایداری مرطوب خاکدانه‌ها در جدول (۶) ارائه شده است. چنانچه در جدول فوق‌الذکر مشاهده می‌شود، پایداری مرطوب خاکدانه‌ها در منطقه مورد مطالعه از ۰/۱۹ تا ۰/۸۱ متغیر است.

جدول ۶. آماره‌های پایداری مرطوب خاکدانه‌ها

آماره					شاخص پایداری
ضریب تغییرات	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	میانگین (میل)	
۲۳/۶	۰/۱۳	۰/۱۹	۰/۸۱	۰/۵۵	WAS

جدول ۷. آماره‌های خصوصیات فیزیکو- شیمیایی نمونه خاک‌های مورد مطالعه

آماره‌ها					خصوصیات فیزیکو- شیمیایی
ضریب تغییرات	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	میانگین	
۶۵	۰/۹۱	۰/۰۹	۴/۵۲	۱/۳۹	ماده آلی
۳	۰/۲۴	۶/۵	۸/۲	۷/۷	اسیدیته
۹۶	۰/۷	۰/۰۸	۳/۴۷	۰/۷۳	هدایت الکتریکی
۳۶	۵/۹۲	۰/۶	۲۵	۱۶/۵۶	آهک
۳۲	۱۴/۶۶	۱۸/۲	۸۰	۴۵/۲۷	رس
۷۳	۱۴/۳۴	۱/۲	۵۳/۶	۱۹/۵۸	سیلت
۵۹	۲۰/۷۲	۱/۴	۷۶/۶	۳۵/۱۵	شن کل
۶۷/۳۸	۲۰/۴۶	۰/۲۶	۷۵/۲۴	۳۰/۱۸	شن درشت
۱۳۶/۹۶	۲/۱۲	۰/۰۶	۱۱/۷	۱/۵۵	شن ریز
۹۷/۲	۳/۳۲	۰/۲۴	۱۶/۴۴	۳/۴۲	شن خیلی ریز
۵۹/۶۱	۰/۲۸	۰/۱۵	۱/۹۸	۰/۴۷	سدیم
۲۰/۳۴	۸/۵۴	۸	۷۲	۴۱/۹۹	مجموع کلسیم و منیزیم
۲۰/۹۵	۰/۲۷	۰/۸۴	۱/۹۳	۱/۳	پتاسیم
۸۵/۱۶	۰/۷۷	۰/۶	۷/۶	۰/۹	کلر
۶۵/۱۷	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۴۴	۰/۱۱	نسبت جذب سدیم
۸۰/۷۷	۰/۹۵	۰/۲۶	۵/۴	۱/۱۷	درصد سدیم قابل تبادل
۳۵	۲۴/۳	۲۶	۱۳۵	۶۹/۱	اکسید آهن

خاک ارائه شوند.

نتایج آزمون کولموگروف- اسمیرنف برای توزیع داده‌های متغیرهای وابسته (MWD-Sw, MWD-Fw) و (MWD-Ws) قبلاً در جدول (۲) نشان داده شده است. بر اساس نتایج این جدول، توزیع داده‌های متغیرهای وابسته نرمال است. اطلاعات مربوط به تشخیص داده پرت

۲.۳. توابع انتقالی بین خصوصیات فیزیکو -

شیمیایی خاک و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها

بر اساس نتایج جدول (۸) واحد سنگ‌شناسی تأثیر معنی‌داری روی خصوصیات فیزیکو - شیمیایی این بخش از نمونه‌های خاک ندارد. لذا، بر اساس این یافته، تصمیم بر آن شد تا مدل‌های پیش‌بینی بر اساس کل نمونه‌های

متغیرهای وابسته نیز قبلاً در جدول (۱) ارائه شده است. وابسته داده پرتی وجود ندارد. بر اساس اطلاعات جدول (۱) در هیچ کدام از متغیرهای

جدول ۸. نتایج تجزیه واریانس اثر واحد سنگ‌شناسی روی خصوصیات فیزیکی- شیمیایی

Sig.	F	خصوصیات فیزیکی- شیمیایی
۰/۷۴۴	۰/۲۹۷	ماده آلی
۰/۳۴۴	۱/۰۸۰	هدایت الکتریکی
۰/۵۰۸	۰/۶۸۳	اسیدیته
۰/۲۰۳	۱/۶۲۷	آهک
۰/۸۵۲	۰/۱۶۰	رس
۰/۴۱۶	۰/۸۸۶	سیلت
۰/۵۵۰	۰/۶۰۲	شن کل
۰/۷۶۲	۰/۲۷۳	شن درشت
۰/۱۳۹	۲/۰۲۰	شن ریز
۰/۵۹۸	۰/۵۱۸	شن خیلی ریز
۰/۲۰۲	۱/۶۳۲	رطوبت اشباع
۰/۶۸۶	۰/۳۷۸	کلر
۰/۵۹۲	۰/۵۲۷	مجموع کلسیم و منیزیم
۰/۴۴۲	۱/۴۴۶	سدیم
۰/۱۴۲	۱/۹۹۷	پتاسیم
۰/۱۳۸	۲/۰۳۰	اکسید آهن
۰/۳۳۰	۱/۱۲۵	نسبت جذب سدیم
۰/۴۲۹	۰/۸۵۴	درصد سدیم قابل تبادل

نمی‌کند. با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون، همبستگی بین متغیرهای مستقل و وابسته بررسی شد که نتایج آن در جدول (۱۰) ارائه شده است.

با توجه به این که اکثر خصوصیات فیزیکی- شیمیایی (متغیرهای مستقل) رابطه خطی با شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها داشتند، تصمیم بر آن شد تا از روش رگرسیون خطی استفاده شود. البته بعضی از این متغیرها رابطه غیر خطی نیز با شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها داشتند ولی ضریب همبستگی آن‌ها تفاوت چندانی با ضریب همبستگی خطی نداشت. لذا، در این تحقیق از روش رگرسیون خطی استفاده شد.

بر اساس نتایج جدول (۹)، توزیع داده‌های متغیرهای مستقل این بخش از نمونه‌های خاک شامل ماده آلی، رس، شن، شن درشت، مجموع کلسیم و منیزیم، اکسید آهن، پتاسیم و رطوبت اشباع نرمال ولی متغیرهای هدایت الکتریکی، آهک، سیلت، شن ریز، شن خیلی ریز، کلر، سدیم، نسبت جذب سدیم و درصد سدیم قابل تبادل غیر نرمال است. برای نرمال کردن توزیع متغیرهای وابسته غیرنرمال از توابع مختلف مثل لگاریتم، جذر و توان دوم استفاده شد ولی توزیع هیچ کدام از آن‌ها نرمال نشد. از آنجائیکه شرط اصلی در ایجاد روابط رگرسیونی نرمال بودن توزیع متغیر وابسته است، نرمال نبودن توزیع متغیرهای مستقل مشکلی در روابط رگرسیونی ایجاد

جدول ۹. نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف متغیرهای فیزیکی-شیمیایی نمونه‌های خاک مورد استفاده در ایجاد توابع انتقالی

Asymp.Sig.(2-tailed)	Kolmogorov-Smirnov Z	متغیرهای فیزیکی- شیمیایی
۰/۳۲۸	۰/۹۵۰	ماده آلی
۰/۰۰۰	۲/۸۳۷	هدایت الکتریکی
۰/۰۴۳	۱/۳۸۵	اسیدیته
۰/۰۰۶	۱/۷۱۲	آهک
۰/۰۳۱	۱/۴۴۱	رس
۰/۷۰۴	۰/۷۰۴	سیلت
۰/۲۷۷	۰/۹۹۴	شن کل
۰/۴۴۲	۰/۸۶۶	شن درشت
۰/۰۰۰	۲/۲۱۲	شن ریز
۰/۰۱۶	۱/۵۵۲	شن خیلی ریز
۰/۲۹۵	۰/۹۷۸	رطوبت اشباع
۰/۰۰۰	۲/۲۲۳	کلر
۰/۰۹۵	۱/۲۳۵	مجموع کلسیم و منیزیم
۰/۰۰۰	۲/۰۸۰	سدیم
۰/۴۸۴	۰/۸۳۸	پتاسیم
۰/۳۴۸	۰/۹۳۳	اکسید آهن
۰/۰۰۰	۳/۰۶۷	نسبت جذب سدیم
۰/۰۰۰	۲/۲۹۳	درصد سدیم قابل تبادل

جدول ۱۰. ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای فیزیکی- شیمیایی و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها

شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها	متغیرهای فیزیکی- شیمیایی	ضریب همبستگی پیرسون	سطح معنی‌داری
MWD-Fw	آهک	-۰/۲۳	پنج درصد
	رس	-۰/۲۷	پنج درصد
	شن ریز	۰/۴۸	یک درصد
	شن خیلی ریز	۰/۴	یک درصد
	رطوبت اشباع	-۰/۳۳	یک درصد
MWD-Sw	ماده آلی	۰/۳۱	یک درصد
	آهک	-۰/۳۳	یک درصد
	رس	-۰/۲۹	یک درصد
	شن ریز	۰/۴۵	یک درصد
	شن خیلی ریز	۰/۴۶	یک درصد
MWD-Ws	رطوبت اشباع	-۰/۲۳	پنج درصد
	ماده آلی	۰/۲۶	پنج درصد
	رس	-۰/۳۴	یک درصد
	شن ریز	۰/۴	یک درصد
	شن خیلی ریز	۰/۴۳	یک درصد
	رطوبت اشباع	-۰/۳۲	یک درصد

شده است.
در جدول (۱۲) توابع انتقالی بین شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها و خصوصیات فیزیکی - شیمیایی ارائه شده است.

در جدول (۱۱) همبستگی بین خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک نشان داده شده است. لازم به ذکر است که فقط همبستگی خصوصیتی ارائه شده که از آن‌ها در تحلیل نتایج همبستگی بین شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها و خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک استفاده

جدول ۱۱. همبستگی بین خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک

سطح معنی‌داری	ضریب همبستگی پیرسون	خصوصیات فیزیکی - شیمیایی خاک	
پنج درصد	۰/۳	شن خیلی ریز	سیلت
پنج درصد	-۰/۲۱	سدیم	
پنج درصد	۰/۲۱	آهک	
یک درصد	-۰/۴۵	شن ریز	
یک درصد	-۰/۴۸	شن خیلی ریز	رس
یک درصد	۰/۶	رطوبت اشباع	
پنج درصد	۰/۲۷	سدیم	
یک درصد	-۰/۵۵	شن ریز	
یک درصد	-۰/۵۴	شن خیلی ریز	آهک
یک درصد	-۰/۳۲	ماده آلی	
یک درصد	-۰/۳۳	اکسید آهن	

جدول ۱۲. توابع انتقالی بین شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها و خصوصیات فیزیکی - شیمیایی

مدل‌های پیش‌بینی	توابع	شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها
$MWD - Fw = 0.075 \times FSand + 0.49$ $R = 0.48$	تابع انتقالی اول	MWD-Fw
$MWD - Fw = -0.013 \times CaCo_3 + 0.82$ $R = 0.23$	تابع انتقالی دوم	
$MWD - Fw = 0.075 \times FSand + 0.49$ $R = 0.48$	تابع انتقالی سوم	
$MWD - Sw = 0.053 \times VFSand + 1.23$ $R = 0.46$	تابع انتقالی اول	MWD-Sw
$MWD - Sw = 0.097 \times Om - 0.016 \times CaCo_3 + 1.55$ $R = 0.4$	تابع انتقالی دوم	
$MWD - Sw = 0.113 \times Om + 0.049 \times VFSand + 1.087$ $R = 0.52$	تابع انتقالی سوم	
$MWD - Ws = 0.049 \times VFSand + 0.9$ $R = 0.43$	تابع انتقالی اول	MWD-Ws
$MWD - Ws = 0.109 \times Om + 0.921$ $R = 0.26$	تابع انتقالی دوم	
$MWD - Ws = 0.091 \times Om + 0.046 \times VFSand + 0.787$ $R = 0.48$	تابع انتقالی سوم	

لذا در منطقه مورد مطالعه مواد آلی نقشی در مقدار MWD-Fw ندارند. ماده آلی بسته به ترکیبات سازنده‌اش می‌تواند به‌عنوان ماده پایدارکننده و یا عامل ناپایداری خاکدانه‌ها باشد و یا ممکن است هیچ تأثیری بر پایداری خاکدانه‌ها نداشته باشد [۲۳]. بنابراین، شاید یکی از علل تفاوت نتایج، تفاوت در نوع مواد آلی خاک در هر منطقه باشد. به‌طور کلی، همبستگی‌های زیادی بین ماده آلی و پایداری خاکدانه‌ها گزارش شده است [۶۳ و ۶]. اما ضرایب این همبستگی‌ها همیشه قوی نبود که دلایل زیادی دارد ولی مهم‌ترین دلایل آن عبارت است از اینکه: ماده آلی عامل اتصال دهنده اصلی نبود، فقط بخشی از ماده آلی عامل خاکدانه‌ای شدن خاک است، ماده آلی تا یک مقدار مشخص روی خاکدانه‌ای شدن خاک تأثیر دارد و بالاتر از آن مقدار آستانه، اثری بر خاکدانه‌ای شدن ندارد و علاوه بر این‌ها، عامل مهم حالت^۱ ماده آلی است نه نوع ماده آلی. بعلاوه اثر ماده آلی در خاک‌های با درصد زیادی رس کم می‌شود [۶۳].

نتایج جدول (۱۰) نشان دهنده همبستگی منفی بین شاخص‌های MWD-Fw، MWD-Sw و MWD-Ws با مقدار رس است. این یافته با نتایج سای محققان همخوانی دارد [۴۵]. برای وجود این روابط منفی می‌توان دو علت را بیان کرد. اول این‌که شاید در این منطقه کانی‌های رسی غالب از نوع انبساط‌پذیر هستند و بنابراین نقش خاکدانه‌سازی ندارند که اثبات این موضوع مستلزم آزمایش‌های مینرالوژی و استفاده از شاخص‌های مرتبط جهت تعیین نوع رس است. دلیل دیگر وجود همبستگی منفی بین مقدار رس و پایداری خاکدانه‌ها را باید در اثر متقابل رس و سایر ویژگی‌های خاک جستجو کرد. همان‌طور که در جدول (۱۱) مشاهده می‌شود رابطه معنی‌دار مستقیمی بین مقدار رس و کاتیون سدیم وجود دارد. بنابراین، در این منطقه کاتیون سدیم باعث پراکنده شدن رس و ناپایداری خاکدانه‌ها می‌شود. در تحقیقاتی

در جدول (۱۲) $MWD - Fw$ میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار خیس شدن سریع به میلی‌متر، $FSand$ درصد ذرات شن ریز نمونه خاک، $CaCo_3$ درصد آهک خاک، $MWD - Sw$ میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار خیس شدن آهسته به میلی‌متر، $VFSand$ درصد ذرات شن خیلی ریز نمونه خاک، Om درصد ماده آلی و $MWD - Ws$ میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در تیمار شکستگی مکانیکی بعد از خیس کردن اولیه به میلی‌متر است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج جدول (۱۰) نشان می‌دهد که بین میزان مواد آلی خاک با شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها نظیر $MWD - Ws$ و $MWD - Sw$ رابطه مستقیم معنی‌داری وجود دارد ولی بین میزان مواد آلی و شاخص پایداری $MWD - Fw$ همبستگی یافت نشد که این یافته برخلاف یافته سایر محققان [۴۵] است. در توجیه این‌که همبستگی معنی‌داری بین شاخص $MWD - Fw$ و ماده آلی یافت نشد، باید گفت که محققان دیگر [۸ و ۵۷] نیز روابط آماری معنی‌داری بین مقدار ماده آلی و شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها پیدا نکردند. البته محققان دیگری یافتند که با افزایش مقدار ماده آلی شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد [۵۳ و ۶۳]. می‌توان توجیه دیگری راجع به عدم تأثیرگذاری ماده آلی بر شاخص پایداری $MWD - Fw$ ارائه کرد، باوجودی که مواد آلی ممکن است ویژگی‌های آبدوستی از خود نشان دهد و سرعت خیس شدن و واریختگی خاک را کاهش دهد [۳۴، ۴۳، ۶۱] اما در خاک‌های طالقان از یک‌طرف میزان مواد آلی به‌اندازه‌ای نیست که بتواند سرعت خیس شدن و واریختگی ناشی از خیس شدن سریع خاکدانه‌ها را کاهش دهد و از طرف دیگر این خاک‌ها حاوی تخلخل زیادی هستند و لذا فشار ناشی از هوای محبوس شده در هنگام خیس شدن سریع خاکدانه‌ها هم خیلی زیاد است.

¹ Disposition

از تحقیقات دیگر که در آن‌ها به نقش متفاوت آهک و کربنات‌ها اشاره شده به صورت زیر است. بعضی محققین معتقدند که اثر کربنات‌ها به‌ویژه در خاک‌های قرمز و زرد گرمسیری و نیمه‌خشک که ماده آلی کم است و آهک به‌عنوان یک ماده سیمانی کننده عمل می‌کند، ضروری‌تر است [۳]. همچنین محققان دیگری بیان می‌کنند که به نظر می‌رسد نقش کربنات‌ها بستگی به اندازه ذرات آن‌ها دارد [۱۵]. در همین زمینه گزارش شده که درصد زیادی از کربنات‌های خیلی ریز منجر به خصوصیات فیزیکی نامطلوب خاک می‌شود [۲۸]. در تحقیقی بیان می‌شود که باید اثرات کلسیم روی خاکدانه‌ای شدن را در خاک‌های قلیایی (اثرات متقابل کلسیم و سدیم) و خاک‌های اسیدی (اثرات متقابل هیدروژن و کلسیم) تفکیک کرد [۱۵]. این محققان گزارش می‌کنند که به نظر می‌رسد، نقش یون کلسیم در طی مرحله اولیه شکل‌گیری خاکدانه‌ها که به‌عنوان یک پل ارتباطی بین ذرات رس عمل می‌کند، مهم است. درحالی‌که نقش کربنات‌ها در مراحل بعدی هنگامی که خاکدانه‌های خاک شکل گرفته‌اند، ظاهر می‌شود. در این تحقیق که بر روی مارن‌ها و نهشته‌های آهکی ترشیاری و آبرفتی کواترنری در یونان انجام شد، رابطه معنی‌داری بین آهک و پایداری خاکدانه‌ها پیدا نشد. این محققان با بررسی جزئی‌تر نمونه خاک‌های با سنگ بستر مارن به این نتیجه رسیدند که با افزایش کربنات کلسیم پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد که این یافته با نتایج این مطالعه همخوانی دارد. این محققان با بررسی نسبت بین کربنات کلسیم و مقدار سیلت در خاک‌های مارنی به این نتیجه رسیدند که اثر کربنات‌ها به‌طور غیرمستقیم عامل افزایش مقدار سیلت است و به همین دلیل است که نقش منفی در پایداری خاکدانه‌ها دارد [۲۰].

رابطه منفی بین آهک و پایداری خاکدانه‌ها را به‌گونه‌ای دیگر نیز می‌توان توجیه کرد. به این صورت که با توجه به نتایج جدول (۱۱) و وجود رابطه مثبت معنی‌دار بین درصد رس و درصد آهک، می‌توان گفت که

همبستگی معنی‌داری بین پایداری خاکدانه‌ها و درصد رس پیدا نشد [۱۵ و ۳۲]. در مطالعه دیگری همبستگی منفی بین رس و پایداری خاکدانه‌ها پیدا شد [۱۵]. در تحقیقی گزارش شد که برای شکل‌گیری خاکدانه‌های پایدار، همراه با رس مقدار مشخصی شن خیلی ریز و سیلت نیز نیاز است [۴۹]. نتایج جداول (۱۰) همچنین نشان می‌دهد که بین شاخص‌های پایداری MWD-Fw و MWD-Sw و آهک رابطه منفی معنی‌داری وجود دارد. این یافته نیز با نتایج تحقیقی مشابه همخوانی دارد [۴۵]. این مسئله نشان دهنده آن است که با افزایش مقدار آهک پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد. شاید علت این باشد که در خاک‌های شدیداً آهکی، ترکیباتی که اثر خاکدانه‌سازی بیشتری نسبت به کربنات دارند نظیر مواد آلی و سزکوئی اکسیدها^۱، اثر سیمان‌کنندگی آهک را خنثی می‌کنند یا می‌پوشانند [۲۳] که چنانچه در جدول (۱۱) نشان داده شده است بین مقدار مواد آلی و اکسید آهن با آهک رابطه منفی معنی‌داری وجود دارد که در تأیید مطلب فوق است. به‌طور کلی، محققان معتقدند که آهک و مواد آلی خصوصیات فیزیکی خاک‌ها را بهبود می‌بخشد. اثر مفید آهک بر پایداری خاکدانه‌ها ناشی از توانایی آن برای فلکوله کردن کلوئیدهای خاک است، درحالی‌که ماده آلی اثر سیمان‌کنندگی دارد [۶]. چندین تحقیق روی اثر سیمان‌کنندگی آهک بر پایداری خاکدانه‌ها و ساختمان خاک انجام شده است. محققان مختلف به نتایج متفاوتی رسیده‌اند، درحالی‌که برخی محققان [۱۳، ۳۰، ۴۱] گزارش کرده‌اند که حضور آهک در خاک، ساختمان خاک را بهبود می‌بخشد. برخی دیگر [۳۶، ۷، ۵۵، ۶۴] رابطه معنی‌داری بین میانگین وزنی قطر خاکدانه و مقدار آهک پیدا نکردند. حتی گروهی دیگر از محققان [۱۷، ۵۰، ۵۱، ۵۶] نشان دادند که وجود مقادیر زیاد آهک و یا دیگر نمک‌های کلسیمی در خاک‌ها، پایداری خاکدانه‌ها را کاهش می‌دهد. نمونه‌هایی

^۱ Sesquioxides

درصد شن ریز و شن خیلی ریز و درصد رس خاک وجود دارد. به عبارت دیگر، با افزایش درصد شن ریز و شن خیلی ریز در خاک‌های مورد مطالعه، مقدار رس کم می‌شود. یعنی نه این که شن ریز و شن ریز باعث پایداری خاکدانه‌ها می‌شوند، بلکه وجود شن ریز و شن خیلی ریز باعث کاهش مقدار رس در خاک‌های مورد مطالعه شده که نقش منفی در خاکدانه سازی دارد. در تحقیق حاضر، رابطه معنی‌داری بین اکسید آهن و پایداری خاکدانه‌ها پیدا نشد. در حالی که محققان زیادی یافتند که سزکوئی اکسیدها اثر مثبتی در پایداری خاکدانه‌ها دارند. در مطالعه‌ای مکانیسم‌های اصلی مؤثر بر شکل‌گیری خاکدانه‌ها تشریح شد و بیان شد که هیدروکسیدهای آلومینیوم و اتصالات OH-AL نقش مهمی در سیمانی شدن ذرات رس بازی می‌کنند [۳۱]. در این رابطه، محققان دیگری نیز معتقدند که اکسیدهای آهن تأثیر معنی‌داری در شکل‌گیری خاکدانه‌ها خاک دارند، اگرچه کریستالی شدن آن‌ها منجر به این می‌شود که تأثیر کمتری در مقایسه با هیدروکسیدهای آلومینیوم داشته باشند [۵۸]. مطالعه‌ای نیز روی خاک‌های یولتی سول و انتی سول در نیجریه انجام شد که یک همبستگی مثبت زیاد بین پایداری خاکدانه‌ها و اکسید آهن خاک پیدا شد [۳۳]. همچنین، گزارش شد که به‌غیر از اکسیدهای آهن و آلومینیوم، سیلیس غیرمتبلور (آمورف) نیز نقش مهمی در پایداری خاکدانه‌ها به‌ویژه در خاک‌های با مقدار مواد آلی کم دارد [۳]. در مطالعه‌ای که بر روی مارن‌ها و نهشته آهکی ترشیاری و نهشته‌های آبرفتی کواترنری در یونان انجام شد، رابطه معنی‌داری بین اکسید آهن و پایداری خاکدانه‌ها پیدا نشد [۱۵]. این محققان واضح نبودن نقش اکسید آهن در پایداری خاکدانه را کم بودن دامنه مقادیر اکسید آهن در خاک‌های مورد مطالعه دانستند. رابطه معنی‌داری بین اکسید آهن و پایداری خاکدانه‌ها در مطالعه دیگری گزارش شده است [۴]. دامنه مقدار اکسید آهن در خاک‌های مورد مطالعه آن‌ها خیلی زیاد و از ۶ تا ۱۴۰ گرم بر کیلوگرم اکسید آهن بود. در مطالعه حاضر

منفی بودن رابطه بین آهن و پایداری خاکدانه با توجه به اثرات متقابل رس و آهن قابل توجیه است. رابطه معنی‌داری بین آهن و پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌های Smectitic اسرائیل پیدا نشد [۳۸]. این ناسازگاری‌ها می‌تواند ناشی از تعداد محدود خاک‌ها یا دامنه کم تغییرات مقدار کربنات مورد استفاده در مطالعات مرتبط باشد. چنانچه در جداول (۱۰) مشاهده می‌شود، رابطه منفی معنی‌داری بین درصد رطوبت اشباع خاک و MWD-Fw، MWD-Sw و MWD-Ws وجود دارد که منفی بودن این رابطه نیز به اثر متقابل درصد رس خاک و رطوبت اشباع برمی‌گردد. چنانچه در جدول (۱۱) مشاهده می‌شود، رابطه مثبت معنی‌داری بین رس و درصد رطوبت اشباع خاک وجود دارد. به عبارت دیگر، به این صورت می‌توان گفت که هر چه درصد رطوبت اشباع بیشتر باشد بیانگر این است که در واقع درصد رس خاک بیشتر است و چون رابطه منفی بین درصد رس و شاخص‌های پایداری وجود دارد، بنابراین پایداری خاکدانه‌ها نیز کمتر است. چنانچه در جدول (۱۰) مشاهده می‌شود، رابطه مثبت معنی‌داری بین درصد شن ریز و شن خیلی ریز با شاخص‌های پایداری میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها وجود دارد. این یافته با یافته‌های محققان دیگری که دریافتند خاک‌های با مقادیر زیاد شن ریز به‌سادگی پخشیده می‌شوند مغایرت دارد [۴۲]. البته، در تحقیق دیگری رابطه مثبتی بین شن ریز و پایداری خاکدانه‌ها پیدا شد [۳۲]. بنا بر گزارش این تحقیق همبستگی بالای بین شن ریز با پایداری خاکدانه‌ها است بیشتر یک شاخصی از وضعیت پایداری خاکدانه‌ها باشد، تا این که یک عامل مؤثر در شکل‌گیری خاکدانه‌های پایدار. طی تحقیقی، نیز نشان داده شد که مقدار خاکدانه‌های ۰/۱ تا ۱ میلی‌متر همبستگی مثبتی با مقدار شن متوسط، شن ریز و شن خیلی ریز دارد [۸]. مثبت بودن رابطه بین شن ریز و پایداری خاکدانه‌ها را می‌توان به‌صورت دیگری نیز توجیه کرد، همان‌طور که در جدول (۱۱) مشاهده می‌شود، رابطه منفی معنی‌دار و قوی بین

اینکه در اتخاذ برنامه‌های مدیریتی و روش‌های حفاظت خاک با هدف کنترل و تعدیل عوامل فرسایش، این احتمال وجود دارد که ممکن است عاملی که در یک منطقه نقش کاهنده در فرسایش خاک دارد، در منطقه دیگر برعکس نقش افزایش‌دهنده داشته باشد. لذا استراتژی کنترل فرسایش منطقه کاملاً منطقه‌ای و بر اساس شرایط موجود در آن منطقه است ولی متأسفانه دیده می‌شود که برنامه‌های اجراشده در یک منطقه صرفاً بر اساس یکسری خصوصیات مشابه و کلی برای منطقه دیگر تجویز می‌شود. پیشنهاد می‌شود که این روابط در خاک‌های با خصوصیات تقریباً یکسان و خاک‌های با خصوصیات متغیر بررسی شود تا مشخص شود که آیا دامنه تغییرات خصوصیات خاک‌ها و همگنی داده‌هایی که وارد مدل‌ها می‌شوند، می‌تواند بر نوع رابطه تأثیرگذار باشد.

دامنه مقادیر اکسید آهن از ۲۶ تا ۱۳۵ گرم بر کیلوگرم است. در مقایسه با دامنه مقادیر اکسید آهن در مطالعه [۴]، به نظر می‌رسد که دامنه مقادیر اکسید آهن در مطالعه حاضر نیز زیاد بود. اما موضوع دیگری که در اینجا باید به آن توجه کرد، این است که علاوه بر در نظر گرفتن دامنه تغییرات، باید به فراوانی مقادیر هم توجه نمود. در تحقیق حاضر، اکثر نمونه‌های خاک مقادیر یکسانی از اکسید آهن داشتند که وجود ضریب تغییرات ۳۵ درصد برای مقادیر اکسید آهن تأیید کننده این مطلب است. نتایج این مطالعه نشان داد که روابط معمول و شناخته شده بین خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک و پایداری خاکدانه‌ها در خاک‌های منطقه طالقان صادق نیست که این موضوع دو مسئله را گوشزد می‌کند اول اینکه محققان باید از تعمیم نتایج مطالعه این روابط در یک منطقه به سایر مناطق به شدت خودداری کنند. دوم

References

- [1] Abu-Hamdeh, N.H., Abo-Qudais, S.A., and Othman, A.M., (2005). Effect of soil aggregate size on infiltration and erosion characteristics. *European Journal of Soil Science*, 57 (5), 609–616.
- [2] Ahmadi, A., (2009). Artificial neural networks performance in soil erosion and run off modeling using fractal dimensions, Ph.D thesis, Department of soil science, Faculty of agriculture, Tabriz university.
- [3] Allison, F.E., (1968). Soil aggregation—some facts and fallacies as seen by a microbiologist. *Soil Science*, 106,136-143.
- [4] Arca, M.N., and Weed, S.B., (1966). Soil aggregation and porosity in relation to contents of free iron oxide and clay. *Soil Science*, 101,164-170.
- [5] Barthès, B., and Roose, E., (2002). Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 47, 133–149.
- [6] Baver, L.D., Gardner, W.H., and Gardner, W.R., (1972). *Soil Physics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.
- [7] Berglund, G., (1971). Influence of lime on soil structure. (*CBDed in Soil Fert. Abstr.* 35 (4), 396-400).
- [8] Boix-Fayos, C., Calvo-Case, A.C., and Soriano-Soto, M.D., (2001). Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena*, 44, 47-67.
- [9] Bouma, J., (1990). Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*, 9, 177-213.
- [10] Bradfield, R., (1936). The value and limitation of calcium in soil structure. *American Soil Survey Association Bulletin*, V XVII, 31–32.
- [11] Cerdá, A., (1998). Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types. *Catena* 32, 73–86.
- [12] Chenu, C., (1989). Influence of a fungal polysaccharide, scleroglucan, on clay microstructure. *Soil Biology and Biochemistry*, 21, 299-305.
- [13] Childs, E. C., (1940). The use of soil moisture characteristics in soil studies. *Soil Science*, 50, 239-252.
- [14] Churchman, G.J., and Tate, K.R., (1987). Stability of aggregates of different size grades in allophonic soils from volcanic ash in New Zealand. *Journal of Soil Science*, 38, 19-27.
- [15] Dimoyiannis, D., Tsadilas, C.D., and Valmis, S., (1998). Factors affecting aggregate instability of Greek agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 29 (9-10), 1239-1251.
- [16] Dimoyiannis, D., Valmis, S., and Danalatos, N.G., (2006). Interrill erosion on cultivated Greek soils: modelling sediment delivery. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 940–949.
- [17] Emerson, W.W., and Dettmann, M.G., (1960). The effect of pH on the wet strength of soil crumbs. *Journal of Soil Science*, 11,149-158.
- [18] Emerson, W.W., (1967). A classification of soil aggregate based on their coherence in water. *Australian Journal of Soil Research*, 5, 47-57.
- [19] Emerson, W.W., and Greenland, D.J., (1990). *Soil aggregate formation and stability*. In: *Soil colloids and their association in aggregates* (eds M. De Boodt, M. Hayes, A. Herbillon), pp. 485-511. Plenum Press, New York.
- [20] Follet, R.F., and Stewart, B.A., (Eds.). (1985). *Soil Erosion and Crop Productivity*, pp. 137-162. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- [21] Frenkel, H., Goertzen, J.O., and Rhoades, J.D., (1978). Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of American Journal*, 42, 32-39.
- [22] Gee, G.W., and Bauder, J.W., (1986). *Particle-size analysis*, In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, part I. Physical and Mineralogical Methods, 2nd edition*. Agronomy 9, American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 383–411.
- [23] Goldberg, S., Kapoor, B.S., and Rhoades, J.D., (1990). Effect of aluminum and iron oxides and organic matter on flocculation and dispersion of arid zone soils. *Soil Science*, 150, 588-593.

- [24] Grieve, I.C., 1980. The magnitude and significance of soil structural stability declines under cereal cropping. *Catena*, 7, 79-85.
- [25] Hamblin, A., (1991). Sustainable agriculture systems, what are the appropriate measures for soil structure. *Australian Journal of Soil Research*, 29, 709-715.
- [26] Haynes, R.J., and Swift, R.S., (1990). Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. *Journal of Soil Science*, 41, 73-83.
- [27] Henin, S., (1938). Etude Physico-chimique de la stabilite structurale des terres. Theses de Doctorat. Universite de Paris. Henin, S., Monnier, G., Combeau, A., 1958. Method pour l'etude de la stabilite structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 9, 73-92.
- [28] Henin, S., Gras, R., and Monnier, G., (1969). Le Profile Cultural. Masson, Paris.
- [1] Henin, S., Monnier, G., and Combeau, A., (1958). Methode l'etude de la stabilite structurale des sols. *Annales Agronomiques*, 9, 73-92.
- [29] Hoyt, P.B., (1981). Improvement in soil tilth and rape seed emergence by lime application on acid soils in the Peace River region. *Canadian Journal of Soil Science*, 61, 91-98.
- [30] Hsu, P.H., (1977). *Aluminum hydroxides and oxyhydroxides*. pp. 99-138. In: J.B. Dixon et al. (eds.), *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- [31] Idowu, O.J., (2003). Relationships between aggregate stability and selected soil properties in humid tropical environment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34, 695-708.
- [32] Igwe, C.A., Akamigbo, F.O.R., and 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, 431-441.
- [33] Jouany, C., Chenu, C., and Chassin, P., (1992). Determination de la mouillabilite des constituants du sol a partir de mesures d'angles de contacts. *Revue bibliographique. Science du Sol*, 30, 33-47.
- [34] Kazman, Z., Shainberg, I., and Gal, M., (1983). Effects of low levels of exchangeable sodium and applied phosphogypsum on the infiltration rate of various soils. *Soil Science*, 135, 184-192.
- [35] Kemper, W.D., and Koch, E., (1966). *Aggregate stability of soils from Western United States and Canada*. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin. No 1355.
- [36] Kemper, W.D., and Rosenau, R.C., (1986). *Aggregate stability and size distribution*. In: *Method of Soil Analysis*, part 1, Agronomy Monographs 9 (ed. A. Klute). American Society of Agronomy, Mdison, WI.
- [37] Lado, M., Ben-Hur, M., and Shainberg, I., (2004). Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1992-1999.
- [38] Le Bissonnais, Y., (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47, 425-437.
- [39] Le Bissonnais, Y., and Singer, M.J., (1993). Seal formation, runoff and interrill erosion from seventeen California soils. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 224-229.
- [40] Mady, F., Abdel-Salam, M.A., and Elwan, A.A., (1971). Factors affecting the state of aggregation in highly calcareous soil. *Journal of Soil Science*, 10, 191-199.
- [41] Mbagwu, J.S.C., Piccolo, A., and Mbila, M.O., (1993). Water-stability of aggregates of some tropical soils treated with humic substances. *Pedologie*, 43, 269-284.
- [42] McGhie, D.A., and Posner, A.M., (1980). Water repellence of a heavy-textured western Australian surface soil. *Australian Journal of Soil Science*, 18, 309-323.
- [43] Mehra, O.P., and Jackson, M.L., (1960). Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite - CBD rate system buffered with sodium bicarbonate. *Clay Mineralogy*, 7, 317-327.
- [44] Mohammad Zadeh, Z., (2011). Cementing factors and aggregate stability indices as an estimate of the coefficient of inter-rill erodibility. Soil Science M.Sc Thesis, University of Tabriz.

- [45] Monnier, G., (1965). Action des matieres organiques sur la stabilit  structurelle des sols. *Annales Agronomiques* 16, 327-400.
- [46] Nelson, D.W., and Sommers, L.E., (1982). *Total carbon, organic carbon, and organic matter*, In: Page, L.A., Miller, R.H., Kenney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Methods*, 2nd edition. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 539-579.
- [47] Neydshabouri, M.R., Safaralizadeh, N., Oustan, S., and Tourch, M., (2007). *Effects of some soil physical and chemical attributes on three aggregate stability indices*. International Scientific Conference, Polana and Detvou, Slovakia, September 17-20.
- [48] Norhayati, M., and Verloo, M., (1984). Characterization of organic matter in four soils of peninsular Malaysia. I. Extraction, fractionation and purification of humic substances. *Journal of Rubber Research Institute of Malaysia* 32, 30-39.
- [49] Peele, T.C., (1937). The effect of lime and organic matter on the erodability of Cecil clay. *Soil Science Society American Processes*, 2, 79-84.
- [50] Peele, T.C., Beale, O.W. and Lathan, E.E., (1938). The effect of lime and organic matter on the erodability of Cecil clay. *Soil Science Society American Processes*, 3, 289-295.
- [51] Rengasamy, P., and Olsson, K.A., (1991). Sodicity and soil structure. *Australian Journal of Soil Research*, 29, 935-952.
- [52] Roberson, E.B., Sarig, S., and Firestone, M.K., (1991). Cover crop management of polysaccharides- mediated aggregation in an orchard soil. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 734-739.
- [53] Romkens, M.J.M., Roth, C.B., and Nelson, D.W., (1977). Erodibility of selected clay subsoils in relation to physical and chemical properties. *Soil Science Society of American Journal*, 41, 954-960.
- [54] Rost, C.O., and Rowles, C.A., (1940). A study of factors affecting the stability of soil aggregates. *Soil Science Society American Processes*, 5, 421-433.
- [55] Russell, E.W., and Basiniski, J.J., (1954). *The effect of heavy dressing of calcium salts on the consistency of clay soils and subsoils*. Trans. 5th Int. Congress Soil Science, Leopoldville, I.S.S.S., 166-173.
- [56] Sarah, P., and Rodeh, Y., (2004). Soil structure variations under manipulations of water and vegetation. *Journal of Arid Environment*, 58, 43-57.
- [57] Schwertmann, U., and Taylor, A., (1977). Iron oxides, pp. 145-176. In: J.B. Dixon et al. (eds.), *Minerals in Soil Environments*. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- [58] Shainberg, I., (1992). *Chemical and mineralogical components of crusting*. In: *Soil crusting: Physical and Chemical Processes* (eds M.E. Sumner and B.A. Stewart), pp. 33-54. Lewis, Boca Raton, Florida.
- [59] Statistical Package for the Social Sciences Inc., (2008). SPSS Advanced Statistics 16.0.2 SPSS Inc., Chicago.
- [60] Sullivan, L.A., (1990). Soil organic matter, air encapsulation and waterstable aggregation. *Journal of Soil Science*, 41, 529-534.
- [61] Tayel, M.Y., Abd Hady, M., and Eldardiry, E.E., (2010). Soil structure affected by some soil characteristics. *American-Eurasian Journal Agriculture and Environment Science*, 7(6), 705-712.
- [62] Tisdall, J.M., and Oades, J.M., (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- [63] Toogood, J. A., (1978). Relation of aggregate stability to properties of Alberta soils. In: W.W. Emerson.
- [64] Valmis, S., Dimoyiannis, D., and Danalatos, N.G., (2005). Assessing interrill erosion rate from soil aggregate instability index, rainfall intensity and slope angle on cultivated soils in central Greece. *Soil and Tillage Research*, 80, 139-147.
- [65] Wischmeier, W.H., and Mannering, J.R., (1969). Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Science Society American Processes*, 33, 131-137.
- [66] Yoder, R.E. (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of American Society Agronomy*, 28, 337-351.

