

کاهش استحکام سنگ‌ها و پیشرفت شکل فرسایش بعد فراکتال افزایش می‌یابد. در نتیجه جنس سنگ مارن با شکل فرسایش بدلند بیش‌ترین مقدار بعد فراکتال و فرسایش سطحی کم‌ترین مقدار بعد فراکتال را به خود اختصاص می‌دهد. علاوه بر این بعد فراکتال با شاخص MWD و AS همبستگی مثبت و با PAD همبستگی منفی داشت. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به سهولت محاسبه بعد فراکتال خاک و رابطه مناسب آن با فرسایش از این شاخص می‌توان در ارزیابی کمی و کیفی فرسایش خاک استفاده نمود.

واژگان کلیدی: اندازه خاک دانه، اندازه ذرات، انواع فرسایش، پایداری خاکدانه، جنس سنگ

#### مقدمه

فرسایش خاک در مقیاس جهانی به دلیل وسعت جغرافیایی و اثرات زیست‌محیطی، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین فرآیندهای تخریب اراضی در سطح جهان مطرح می‌گردد که هم کشورهای توسعه‌یافته و هم کشورهای درحال توسعه، به‌عنوان مخاطره‌ای که حاصل تعامل عوامل انسانی و طبیعی است، با آن روبه‌رو هستند [۱۶]. مجموعه این عوامل سبب تبدیل فرسایش به یک بحران مهم محیط‌زیستی شده که آثار سوء مستقیم و غیرمستقیمی نظیر کاهش خاک‌های حاصلخیز، از بین رفتن مواد آلی خاک، کاهش تولیدات زراعی، افزایش سیلاب، کاهش تولید برق و کاهش کیفیت آب را به دنبال خواهد داشت [۱۲]. لذا، ارزیابی مناسب عوامل اصلی فرسایش را می‌توان اولین مرحله در انتخاب راهکارهای کاهش و کنترل این پدیده مخرب دانست.

تدوین و اجرای مؤثر برنامه‌های کنترل و مهار فرسایش، نیاز به درک کامل فرآیندهای آن، توانایی در اندازه‌گیری و برآورد دقیق شدت فرسایش و شناخت عمیق مسئله و اعمال روش‌های علمی در کنترل آن دارد [۷، ۱۶ و ۲۷]. در همین راستا می‌توان گفت که پارامترهای مختلفی از قبیل خاک، توپوگرافی، اقلیم و پوشش گیاهی بر این فرآیند اجتناب‌ناپذیر تأثیرگذار هستند. از پارامترهای مهم و قابل‌مطالعه در این بحث، بافت خاک و درصد اجزاء اصلی تشکیل‌دهنده توده خاک است [۱، ۴]. بافت خاک، اندازه و کیفیت خاکدانه‌ها از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های خاک هستند که بر سایر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و هیدرولوژیکی خاک اثر گذاشته

## بررسی ارتباط بین بعد فراکتال ذرات خاک با اشکال مختلف فرسایش و مواد مادری مختلف

نسترن صادق‌زاده یزدی<sup>۱</sup>، علی گل‌کاریان<sup>۲\*</sup>، محمد جهانی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت ۱۴۰۲/۱۲/۰۳ تاریخ پذیرش ۱۴۰۳/۰۱/۱۶

DOI:10.22034/wmji.2024.2023585.1055

#### چکیده

فرسایش خاک یک مشکل جهانی است که قدرت باروری خاک و کیفیت آب را کاهش می‌دهد. ارزیابی مناسب عوامل مؤثر بر فرسایش، اولین مرحله در انتخاب راهکارهای کنترل و مدیریت این پدیده مخرب است. از پارامترهای مهم و قابل‌مطالعه در این بحث بافت خاک، اندازه، کیفیت خاکدانه‌ها و جنس سنگ‌بستر است که می‌تواند عامل فرسایش‌پذیری خاک را تحت تأثیر قرار دهد. بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات خاک و خاکدانه‌ها به‌عنوان ابزار مناسبی جهت تخمین خصوصیات مرتبط با خاک با حداقل تعداد مؤلفه‌های موردنیاز معرفی شده است. هدف از این تحقیق بررسی ارتباط بعد فراکتال با اشکال مختلف فرسایش از جمله فرسایش سطحی، شیاری و بدلند و هم‌چنین بررسی بعد فراکتال جنس سنگ‌های مختلف، شامل؛ آهک، فیولیت، گرانیت، شیل و مارن و بررسی شاخص‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، درصد پایداری خاکدانه‌ها (AS) و درصد تخریب خاکدانه‌ها (PAD) بود. در این راستا بعد فراکتال به کمک رابطه یانگ و کرافورد با استفاده از داده‌های آزمایشات توزیع اندازه ذرات به روش الک تر و الک خشک و توزیع اندازه خاکدانه‌ها به روش الک مستغرق و هم‌چنین محاسبه وزن مخصوص به روش وزنی و سطح ویژه به روش اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر، برای اشکال فرسایشی و جنس سنگ‌های مختلف تعیین شد. نتایج آزمون‌های آماری نشان می‌دهد که اشکال فرسایشی و جنس سنگ‌های مختلف با بعد فراکتال در ارتباط است. به‌نحوی که با

۱- دانش آموخته رشته علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد و نویسنده مسئول: Email: golkarian@um.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

و می‌توانند فرسایش‌پذیری خاک را تحت تأثیر قرار دهند [۶]؛ و از آنجاکه بین اندازه‌گیری‌های مستقیم و برآوردهای انجام‌شده این ویژگی‌ها اختلاف‌های زیادی مشاهده می‌گردد؛ بنابراین ضروری است تا از روش‌های غیرمستقیم همچون کاربرد هندسه فراکتال در برآورد آن‌ها استفاده نمود.

بشر از دیرباز از طبیعت پیرامون خود برای پیشبرد علوم مختلف بهره گرفته است. نظم و تکرار موجود در بسیاری از پدیده‌های طبیعی مانند شکل ابرها، رشته‌کوه‌ها و شبکه رودخانه‌ها او را بر آن داشته است تا با مطالعه این موارد، روابط ریاضی موجود میان این الگوهای جالب و تکرارشونده را کشف کند. این مطالعات باعث پیدایش هندسه فراکتالی شد که برای رفع ضعف‌های هندسه اقلیدسی در بیان و مدل‌سازی از پدیده‌های طبیعی، بسط و گسترش یافته است [۶ و ۲۲]. بعد فراکتالی، پارامتری برای بررسی میزان پیچیدگی بین داده‌ها است و برخلاف بعد اقلیدسی که یک عدد طبیعی است، می‌تواند به صورت یک عدد حقیقی باشد. هدف هندسه فراکتالی، محاسبه و یافتن بعد فراکتال برای مطالعه بهتر و پیش‌بینی رفتار آینده مجموعه‌ای از داده‌ها می‌باشد [۱۹]. بدین منظور از آنجاکه رفتار فرسایشی خاک می‌تواند با بی‌نظمی‌های هندسی آن خاک مرتبط باشد. این بی‌نظمی هندسی را می‌توان به صورت بعد فراکتال بررسی کرد که مقادیر بالای بعد فراکتال نشان‌دهنده بی‌نظمی هندسی بیش‌تر و توزیع بیش‌تر پدیده موردنظر و طبیعت خود تشابهی در توزیع پدیده می‌باشد [۴ و ۶].

هندسه فراکتالی به علت دید تیزبینانه‌تر نسبت به محیط پیرامون و در نظر گرفتن ویژگی‌های غیر اقلیدسی به تدریج در عصر حاضر در علوم مختلف از جمله علم مهندسی خاک مورداستفاده قرار گرفته است و پژوهشگران زیادی مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام داده‌اند. در همین راستا نتایج گزارش‌شده توسط پژوهشگران، حاکی از قابلیت و پتانسیل نظریه فراکتال در تبیین و مدل‌سازی ساختار سامانه خاک و درک و تخمین فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن است [۸ و ۱۷] بعد فراکتال توزیع اندازه ذرات خاک و بعد فراکتال توزیع اندازه خاکدانه‌ها به‌عنوان ابزار مناسبی جهت تخمین خصوصیات مرتبط با بافت خاک معرفی شده است. بسیاری از ویژگی‌های خاک به صورت مستقیم و غیرمستقیم تحت تأثیر توزیع اندازه‌ای ذرات خاک است. بعد فراکتال شاخص مناسبی برای درک بهتر و بیان چگونگی این ویژگی با حداقل تعداد مؤلفه‌های موردنیاز برای تعیین آن است [۱]. هم‌چنین ماحصل پژوهش‌های تاگوار و همکاران [۲۳] و چی و همکاران [۱۸] نشان دادند که مقدار نظری این شاخص بین صفر تا سه تغییر می‌کند. مقادیر کم بعد فراکتال اندازه ذرات بیانگر حکم‌فرما بودن تعداد کم ذرات ریز و تعداد زیاد ذرات بزرگ در توزیع اندازه ذرات می‌باشد. به عبارت دیگر هرچه بافت خاک سبک‌تر باشد، مقدار بعد فراکتال اندازه ذرات کمتر خواهد بود و بالعکس [۲۵]. بعد فراکتال بافت خاک با افزایش درصد رس و گاهی سیلت خاک به صورت غیرخطی افزایش و با افزایش درصد شن خاک به صورت خطی کاهش می‌یابد [۲۸]. خاک‌شناسان از بعد

فراکتال بافت خاک برای ارزیابی تخریب و کیفیت ساختمان خاک در اثر کاربری‌های مختلف [۱۰]، بررسی پایداری خاکدانه تحت شرایط متفاوت خاک‌ورزی [۲۴]، تخلخل و نفوذپذیری خاک [۱۷]، تعیین سطح ویژه‌ی خاک [۲۱]، برآورد منحنی رطوبتی [۶، ۲۲] و برآورد هدایت آبی اشباع [۱۳] استفاده نموده‌اند.

از آنجایی‌که بسیاری از فاکتورهای فوق در فرسایش خاک دارای اهمیت می‌باشند، هدف از این تحقیق بررسی ارتباط ابعاد فراکتال خاک با اشکال مختلف فرسایش از جمله فرسایش سطحی، شیاری و بدلند بر روی سنگ‌بستر مارن و هم‌چنین بررسی بعد فراکتال سایر جنس سنگ‌ها از قبیل، آهک، شیل، افیولیت و گرانیت و بررسی شاخص‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها ( $MWD^1$ )، درصد پایداری خاکدانه‌ها ( $AS^2$ ) و درصد تخریب خاکدانه‌ها ( $PAD^3$ ) و تعیین روند شاخص‌های مذکور با بعد فراکتال و ارزیابی سه روش الک خشک، الک تر و الک مستغرق است.

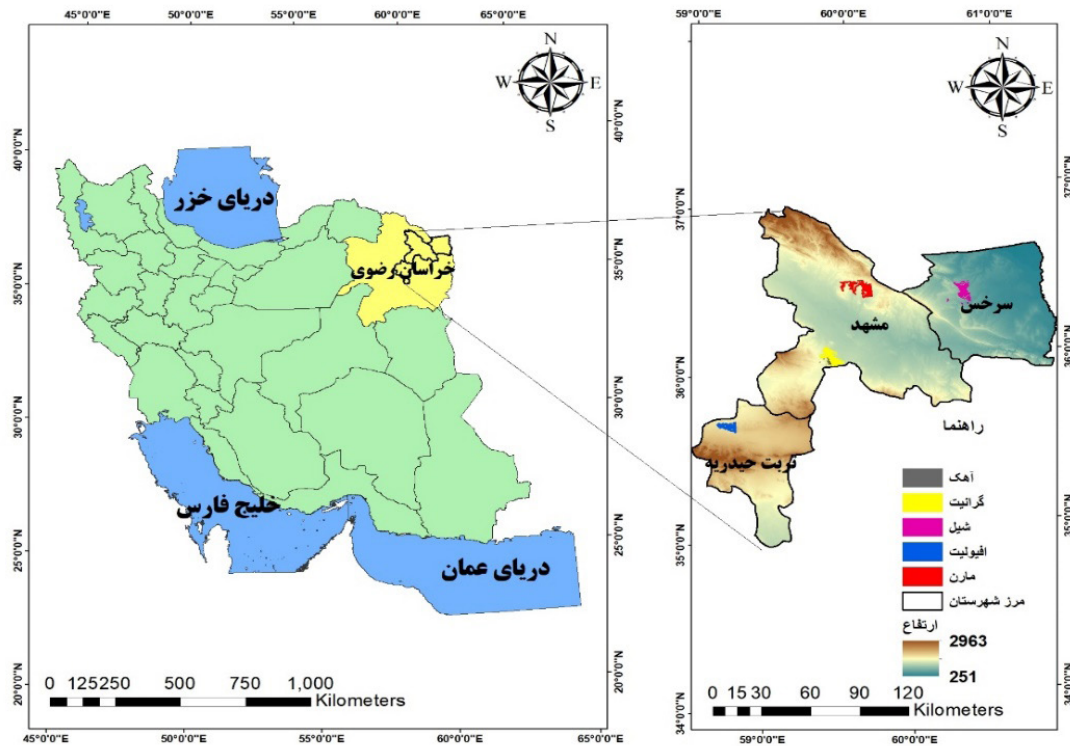
### مواد و روش‌ها

#### معرفی منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، نمونه‌برداری‌ها به روش تصادفی-سیستماتیک از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری صورت گرفته است. بدین صورت که نمونه‌برداری از جنس سنگ‌بستر مارن با اشکال فرسایشی متفاوت، از روستای هندل آباد اطراف منطقه تبادکان در فاصله ۴۹ کیلومتری شمال شرق مشهد انجام شد. هم‌چنین نمونه‌برداری از آهک پالئوزوئیک، آهک کرتاسه و گرانیت از حد فاصله ملک‌آباد و نیشابور در فاصله ۱۰۰ کیلومتری جنوب غربی مشهد، شیل از شمال بزنگان توابع بخش مرزداران شهرستان سرخس، در فاصله ۱۳۳ کیلومتری شمال شرقی

مشهد و افیولیت از روستای تلخ بخش از توابع بخش کدکن شهرستان تربیت‌حیدریه در فاصله ۱۳۸ کیلومتری جنوب غربی مشهد، انجام گرفت (شکل ۱). لازم به ذکر است اقلیم منطقه مورد مطالعه گرم و نیمه‌خشک بوده و میانگین درجه حرارت آن ۱۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. دامنه ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه بین ۲۷۰ تا ۲۹۵۰ متر است. هم‌چنین میانگین نزولات جوی در منطقه موردنظر اختلاف زیادی دارد، به طوری‌که میانگین بارندگی در ارتفاعات ۸۰۰ میلی‌متر و در مناطق دشتی چیزی در حدود ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد. شکل‌های ۲ و ۳ مربوط به مناطق مورد مطالعه می‌باشد.

1. Mean weight diameter
2. Aggregate stability
3. Percentage of aggregate destruction



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه



شکل ۳: اراضی با جنس سنگ بستر شیل واقع در بزنگان



شکل ۲: اراضی مارنی واقع در روستای هندل آباد

جدول ۱: روش محاسبه بعد فراکتال

| بعد فراکتال        | تعداد ذرات                           | وزن خاک (گرم) | میانگین قطر صفحات الک (میلی متر) |
|--------------------|--------------------------------------|---------------|----------------------------------|
| $\ln(N_1)$         | $N_1 = \frac{w_1}{d_1^3 c_1 \rho_1}$ | $w_1$         | $d_1$                            |
| $\ln(N_1+N_2)$     | $N_2 = \frac{w_2}{d_2^3 c_2 \rho_2}$ | $w_2$         | $d_2$                            |
| $\ln(N_1+N_2+N_3)$ | $N_3 = \frac{w_3}{d_3^3 c_3 \rho_3}$ | $w_3$         | $d_3$                            |
| $D_f$              |                                      |               |                                  |



شکل ۵: صفحات الک همراه با خاک مرطوب

[۲۴]. قطر ذرات باقی مانده بر روی هر صفحه الک از میانگین الک بالایی و پایینی محاسبه می شود.

### روش الک تر

پس از انجام آزمایش الک خشک، به منظور به دست آوردن توزیع اندازه ذرات به روش الک تر، خاک توسط آب از اولین طبقه الک، با دست شسته شده و عبور داده می شود، درحالی که ظرفی در زیر آن برای جمع آوری آب و رسوبات قرار دارد، محتویات داخل ظرف را از الک بعدی عبور داده و تا آخرین صفحه الک این کار ادامه پیدا می کند. رسوبات باقی مانده بر روی الکها پس از خشک کردن در کوره حرارت، وزن می شوند [۲۲]. آب و رسوباتی که از ریزترین شماره الک عبور کرده اند به مدت ۷۲ ساعت کنار گذاشته می شوند. پس از ته نشین شدن رسوبات، آب ظرف به آرامی تخلیه شده و رسوبات کف ظرف در بشر ریخته می شود. بشرهای حاوی آب و رسوب در فضای آزاد قرار گرفته و پس از خشک شدن به صورت طبیعی، برای خارج کردن کلیه رطوبت موجود در آن به مدت ۲۴ ساعت در داخل کوره حرارت گذاشته شد.

### به دست آوردن توزیع اندازه خاکدانه ها

#### روش الک مستغرق

به منظور به دست آوردن توزیع اندازه خاکدانه از روش الک مستغرق استفاده گردید. این روش سبب تفکیک خاکدانه های پایدار در آب، با اندازه های مختلف می شود، بدین منظور از وسیله ای به نام شیکر مستغرق استفاده می شود.

برای به دست آوردن توزیع اندازه خاکدانه ها ابتدا نمونه خاک باید به آرامی مرطوب شود [۲۱]. در همین راستا ۵۰۰ گرم خاک را وزن کرده، در ظرفی ریخته و بشر محتوای آب را در سطحی بالاتر از ظرف خاک قرار داده و با استفاده از نخ پنبه که یکسر آن داخل آب و سر دیگر در تماس با خاک است، خاک به آرامی مرطوب می گردد (شکل ۴). سری الک با ابعاد مشابه آزمایش الک خشک را همراه



شکل ۴: مرطوب کردن تدریجی خاک

### روش تحقیق

#### محاسبه بعد فراکتال

جهت محاسبه بعد فراکتال در مطالعه حاضر از رابطه یانگ و کرافورد [۲۶] استفاده شده است (جدول ۱).

در این رابطه  $d$  میانگین قطر صفحات الک برحسب  $w$ ،  $(mm)$ ، مقدار خاک باقی مانده بر روی صفحات الک برحسب  $(g)$ ،  $c$  ضریب شکل (سطح ویژه خاک) بر حسب  $(m^2/g)$  و  $\rho$  وزن مخصوص ذرات بر حسب  $(g/cm^3)$  است. پارامتر تعداد ذرات و خاکدانه ها  $(N)$  طبق رابطه داخل جدول ۱ برای هر صفحه الک به طور مجزا محاسبه می شود. سپس با محاسبه  $Ln$  مجموع تجمعی  $N$ ، بعد فراکتال خاک برای اشکال فرسایشی و جنس سنگ های مختلف به دست می آید.

### به دست آوردن توزیع اندازه ذرات

برای به دست آوردن توزیع اندازه ذرات در نمونه خاک، از روش الک خشک و تر استفاده گردید.

### روش الک خشک

برای آزمایش الک خشک از الک های ویژه مورد تأیید انجمن مواد و آزمون آمریکا<sup>۱</sup> (ASTM) که شبکه کف آنها از سیم فولادی است استفاده می شود، در مش های مختلف اندازه منافذ کف الکها همگی دقیق و مشخص اند. برای این منظور مجموعه الکها با ابعاد ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵ و ۰/۰۶۳ میلی متر بر روی یکدیگر قرار می گیرند، الک های با سوراخ بزرگ تر در بالا و الک های ریزتر در پایین و در زیر آخرین صفحه الک، سینی برای جمع آوری ریزترین ذرات خاک قرار می گیرد. پس از آن نمونه خاک خشک با وزن ۵۰۰ گرم را بر روی الک بالایی ریخته و برای مدت ۴۵ دقیقه شیک می شوند. سپس خاک باقی مانده بر روی هر صفحه الک وزن می شود

1. American Society for Testing and Materials

سینی به ترتیب بر روی یکدیگر قرار داده، خاک مرطوب بدون دخالت دست بر روی بالایی‌ترین صفحه الک ریخته شده و داخل مخزن دستگاه شیکر مستغرق قرار داده می‌شود (شکل ۵). سپس به مدت ۱۵ دقیقه نمونه شیک می‌شود. سپس صفحات الک را بیرون آورده و پس از خشک کردن در کوره حرارت، وزن می‌شوند.

#### محاسبه وزن مخصوص خاک

وزن واحد حجم خاک خشک را وزن مخصوص خاک گویند که واحد آن گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. تعیین وزن مخصوص به روش وزنی (استوانه مدرج) انجام گرفت. ابتدا ۲۰ سی‌سی آب مقطر درون استوانه مدرج ۲۵ سی‌سی ریخته سپس ۵ گرم خاک خشک الک شده را وزن کرده و داخل استوانه مدرج ریخته و اختلاف ارتفاع ایجادشده یا حجم جابجا شده قرائت می‌شود. سپس وزن خاک خشک را بر اختلاف ارتفاع ایجادشده تقسیم کرده و وزن مخصوص خاک به دست می‌آید [۲].

#### محاسبه سطح ویژه خاک

به سطح کل ذرات تشکیل‌دهنده خاک در هر واحد جرم، سطح ویژه ذرات خاک می‌گویند. مقدار عددی سطح ویژه هر خاک ثابت بوده و به عواملی مانند؛ مقدار و نوع رس خاک، اندازه ذرات خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، مقدار ماده آلی، جرم مخصوص و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک بستگی دارد.

میگودا و همکاران [۱۵] یک روش برای تعیین سطح ویژه معرفی کردند. این روش بر مبنای آغشته کردن نمونه با اتیلن گلیکول و سپس از بین بردن محلول اضافه به روش تخلیه استوار است. این روش برای محدوده وسیعی از ذرات خاک نتایج خوبی به دست می‌دهد و تاکنون توسط محققان زیادی استفاده شده است؛ اما این روش بسیار وقت‌گیر است. زو و همکاران [۲۸] برای غلبه بر این مشکل استفاده از مایعی بنام اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر<sup>۱</sup> (EGME) (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O<sub>2</sub>) را پیشنهاد کردند. این مایع قطبی در درجه حرارت اتاق دارای فشار بخار بیشتر از اتیلن گلیکول است و تبخیر آن سریع‌تر صورت می‌گیرد.

طی پژوهشی توسط مارشالکو و همکاران [۱۴] چهار روش مختلف اندازه‌گیری سطح ویژه ذرات خاک با یکدیگر مقایسه شد. روش‌ها شامل جذب متیلن بلو، جذب اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر، جذب نیتروژن، نفوذ جیوه و جذب هوا بود. پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که روش جذب اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر نسبت به سایر روش‌ها کم‌هزینه‌تر، دارای دقت بیشتر و به زمان کم‌تری نیاز دارد.

اندازه‌گیری جذب EGME بیش‌تر برای خاک‌ها و رسوبات کاربرد دارد؛ زیرا محلول قابلیت نفوذ به لایه‌های درونی را ندارد و در نتیجه مقادیر خطای اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. اساس این روش قرارگیری EGME به شکل تک لایه‌ای روی سطح نمونه است و با دانستن

سطحی که به وسیله یک مولکول مایع اشغال می‌شود، می‌توان سطح ویژه را محاسبه کرد. در این آزمایش ابتدا یک گرم خاک خشک وزن می‌گردد و به همراه ۳ میلی‌لیتر اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر در ظرف آلومینیومی به ارتفاع ۲۰ میلی‌متر و قطر ۷۶ میلی‌متر ریخته می‌شود. سپس ظرف به صورت دورانی تکان داده شده تا خاک به‌طور کامل با الک آغشته شود. وزن ظرف حاوی خاک و الک توسط اندازه‌گیری شده و به دسیکاتور منتقل می‌شود. سپس ظرفی آلومینیومی حاوی ۱۰۰ گرم کلسیم کلرید (CaCl<sub>2</sub>) به همراه ۲۰ میلی‌لیتر اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر به قسمت زیرین دسیکاتور منتقل شده و دستگاه به پمپ خلأ وصل می‌گردد. کلسیم کلرید به علت خاصیت آب‌دوستی فراوان، رطوبت را جذب و نگهداری می‌کند. قرار دادن ظرف حاوی کلسیم کلرید و اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر به‌منظور ثابت نگه‌داشتن فشار بخار EGME برای جذب سطحی می‌باشد [۲۸]. در آخر وزن ظرف حاوی خاک پس از ۱۶، ۸ و ۲۴ ساعت اندازه‌گیری می‌شود. چنانچه وزن نمونه در دو اندازه‌گیری آخر کم‌تر از ۰/۰۰۱ گرم کند آزمایش متوقف می‌شود. [۲۸]. در این روش پس از گذشت زمان موردنیاز تنها یک‌لایه مولکول از EGME بر روی ذرات خاک قرار خواهد داشت. سطح ویژه از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$SSA = \frac{w_a}{w_s + 0.000286} \quad (1)$$

که در آن  $W_a$  وزن اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر برحسب گرم،  $W_s$  وزن خاک خشک‌شده برحسب گرم و  $SSA$  سطح ویژه ذرات خاک برحسب  $m^2/g$  می‌باشد.

#### بررسی شکل ذرات و خاکدانه‌ها

شکل ذرات و خاکدانه‌ها توصیف فرم هندسی آن‌هاست. در شکل دانه دو پدیده کرویت و گرد شدگی موردبررسی قرار می‌گیرد [۱۹]. شکل هندسی ذرات و خاکدانه‌های اشکال فرسایشی و جنس سنگ‌های مختلف به‌منظور مقایسه با نتایج آزمایش سطح ویژه، در آزمایشگاه توسط میکروسکوپ بررسی شد.

#### تعیین شاخص‌های پایداری

واژه پایداری ساختمان خاک به توانایی خاک در نگهداری آرایش ذرات جامد و فضای بین آن‌ها در هنگام مواجه شدن با تنش‌های مختلف مربوط می‌شود [۱۰]. بنا به نظر مارشالکو و همکاران [۱۴] شاخص پایداری برای توصیف حساسیت خاک‌ها به فرسایش آبی بسیار حائز اهمیت است. سنسی و لئوفردو [۲۰] عدم پایداری خاکدانه‌ها را عامل افزایش حساسیت خاک‌ها به فرسایش آبی معرفی کردند. شاخص‌های گوناگونی برای ارزیابی پایداری خاکدانه پیشنهاد شده است. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، شاخص پایداری خاکدانه‌ها و شاخص تخریب خاکدانه‌ها اشاره کرد.

1. Ethylene Glycol Monoethyl Ether

## محاسبه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

بودن تفاوت بین میانگین‌ها می‌توان نتیجه گرفت که بعد فراکتال خاک با اشکال فرسایشی و جنس سنگ‌های مختلف در ارتباط است. هم‌چنین برای تعیین روند شاخص‌های پایداری و بعد فراکتال از روابط رگرسیونی و ضریب تبیین استفاده شد.

### نتایج و بحث

#### نتایج آزمایشات توزیع اندازه ذرات و خاکدانه‌ها

پس از انجام آزمایشات توزیع اندازه ذرات به روش الک خشک و الک تر و توزیع اندازه خاکدانه‌ها به روش الک مستغرق، برای اشکال فرسایشی و جنس سنگ‌های مختلف، نتایج نشان داد که روش الک خشک نسبت به دو روش دیگر بیش‌ترین درصد خاکدانه‌های درشت را در همه اشکال فرسایشی و جنس سنگ‌ها، به خود اختصاص می‌دهد. نتایج آزمایش الک تر نشان داد، این روش بیش‌ترین درصد ذرات ریز را به خود اختصاص می‌دهد. هم‌چنین در بین اشکال فرسایشی مارن، فرسایش بدلند بیش‌ترین و فرسایش سطحی کم‌ترین درصد ذرات ریزتر از  $0.63$  میلی‌متر را دارا هستند و در بین جنس سنگ‌های مختلف مارن بیش‌ترین و آهک پالئوزوئیک کم‌ترین درصد خاکدانه‌های ریز را در بر می‌گیرند. نتایج الک مستغرق نیز نشان‌دهنده این بود که در بین اشکال فرسایشی مارن، فرسایش سطحی دارای بیش‌ترین و فرسایش بدلند دارای کم‌ترین درصد خاکدانه‌های درشت و پایدار در برابر آب می‌باشند و در بین جنس سنگ‌های مختلف مارن دارای کم‌ترین و آهک پالئوزوئیک دارای بیش‌ترین درصد خاکدانه‌های پایدار را در برابر تنش‌های آبی دارند.

#### بررسی استحکام سنگ‌های مورد مطالعه

واحدهای مختلف سنگ‌شناسی دارای پتانسیل‌های متفاوتی هستند و میزان استحکام و فرسایش‌پذیری آن‌ها به ویژگی‌های بافت سنگ بستگی دارد. روند کاهش استحکام و افزایش حساسیت به فرسایش در بین جنس سنگ‌های مورد مطالعه به شرح زیر است [۱۹ و ۲۲]:

آهک > گرانیت > افیولیت > شیل > مارن

در نتیجه از بین جنس سنگ‌های مورد مطالعه، مارن مقاومت کم و حساسیت بالا و آهک بیش‌ترین استحکام و کم‌ترین حساسیت به فرسایش را دارد.

#### نتایج آزمایش تعیین سطح ویژه

محاسبه سطح ویژه خاکدانه‌ها به روش اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر انجام شد. با توجه به شکل ۶ و روند افزایش حساسیت به فرسایش در بین جنس سنگ‌های مختلف، می‌توان گفت که افزایش استحکام و کاهش فرسایش‌پذیری سنگ‌ها با کاهش سطح ویژه آن‌ها همراه است. در نتیجه مارن با بیش‌ترین حساسیت به فرسایش و کم‌ترین استحکام در بین جنس سنگ‌های مورد مطالعه، دارای بیش‌ترین و

جهت اندازه‌گیری میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در حالت الک خشک ( $MWD_{dry}$ )، تر ( $MWD_{wet}$ ) و مستغرق ( $MWD_{submerged}$ )، بر اساس روش لی بیسونا [۹] با استفاده از سری الک‌های ۴، ۲، ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵ خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک در آون در دمای ۱۰۵ درجه خشک و بعد از وزن کردن بر اساس رابطه ۲ میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هر سه حالت تر و خشک و مستغرق محاسبه شد.

$$MWD = \sum_{i=1}^k w_i x_i \quad (2)$$

که در آن  $w_i$  نسبت جرم خاک باقی‌مانده بر روی هر الک به جرم کل خاک و  $x_i$  میانگین قطر دو الک متوالی است. هر چه میانگین قطر خاکدانه‌ها بیش‌تر باشد، استحکام و پایداری آن‌ها نیز بیش‌تر خواهد بود.

#### محاسبه درصد پایداری خاکدانه‌ها

شاخص پایداری خاکدانه‌ها (AS)، با استفاده از داده‌های روش الک تر بر اساس رابطه ۳ محاسبه شد [۹].

$$\%AS = \frac{WSA - Msand}{Msample - Msand} * 100 \quad (3)$$

که در آن WSA جرم خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی الک ۰/۲۵ میلی‌متری، Msand جرم شن و Msample جرم نمونه خاک می‌باشد. هر چه میزان AS بیش‌تر باشد پایداری خاکدانه‌ها نیز بیش‌تر خواهد بود.

#### محاسبه درصد تخریب خاکدانه‌ها

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 برای تعیین آن جرم خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر در دو حالت الک خشک (md) و تر (mw) تعیین و PAD بر اساس رابطه ۴ محاسبه شد [۹].

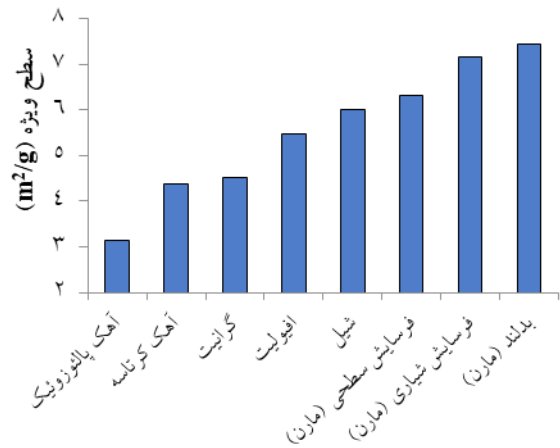
$$\%PAD = \frac{md - mw}{md} * 100 \quad (4)$$

هر چه میزان PAD کم‌تر باشد نشان‌دهنده پایدار بودن بیش‌تر خاکدانه‌ها است.

#### تجزیه و تحلیل آماری

در ابتدا برای تعیین نرمال بودن توزیع متغیرها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده گردید و در گام بعدی پس از آن که این آزمون توزیع داده‌ها را نرمال نشان داد، به منظور برقراری ارتباط بین بعد فراکتال خاک با اشکال مختلف فرسایش و جنس سنگ‌های مختلف و نیز ارزیابی سه روش الک تر، الک خشک و الک مستغرق، مقایسه میانگین‌ها به روش LSD انجام شد که در صورت معنی‌دار

آهک پالئوزوئیک با کمترین حساسیت به فرسایش و بیشترین استحکام دارای کمترین سطح ویژه می‌باشد. همچنین در بین اشکال فرسایش مارن، بدلند با شدیدترین درجه فرسایش دارای بیشترین و فرسایش سطحی دارای کمترین سطح ویژه می‌باشد.



شکل ۶: روند تغییرات سطح ویژه برای اشکال فرسایشی مارن و جنس سنگ‌های مختلف

نتایج بررسی شکل ذرات و خاکدانه‌ها

بررسی شکل ذرات و خاکدانه‌های اشکال فرسایشی و جنس سنگ‌های مختلف توسط میکروسکوپ نشان می‌دهد، در بین اشکال فرسایشی، خاکدانه‌های فرسایش سطحی گرد شده‌تر و منظم‌تر و خاکدانه‌های فرسایش بدلند گوشه‌دارتر و نامنظم‌تر است. همچنین در بین جنس سنگ‌های مورد مطالعه آهک دارای گردشگری و نظم بیش‌تر و مارن (فرسایش سطحی) گوشه‌دارتر و نامنظم‌تر است. روند افزایش گرد شدگی در بین اشکال فرسایشی و جنس سنگ‌های مختلف به شرح زیر است:

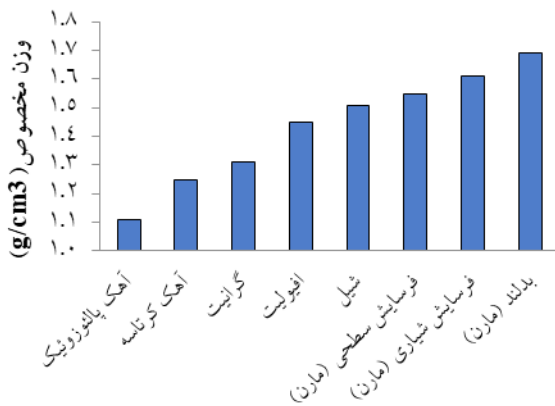
<فرسایش سطحی> (مارن) > شیل > افیولیت > گرانیت > آهک بدلند (مارن) > فرسایش شیبی (مارن)

با توجه به تعریف سطح ویژه، می‌توان گفت در یک اندازه ثابت یا به عبارت دیگر در شماره الک‌های یکسان هرچه ذرات گوشه‌دارتر و نامنظم‌تر باشند، سطح ویژه نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. با توجه به شکل ۶ بیش‌ترین سطح ویژه مربوط به آهک و کمترین مربوط به جنس سنگ مارن با شکل فرسایش بدلند می‌باشد.

#### نتایج آزمایش تعیین وزن مخصوص خاک

محاسبه وزن مخصوص خاک به روش وزنی (استوانه مدرج) برای اشکال فرسایشی و جنس سنگ‌های مختلف انجام شد نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد که با پیشرفت شکل فرسایش وزن مخصوص خاک نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه فرسایش سطحی کمترین و فرسایش بدلند

بیش‌ترین وزن مخصوص خاک را دارا است؛ زیرا ذرات با چگالی کم‌تر راحت‌تر توسط جریان‌های سطحی حرکت داده شده و جابجا می‌شوند و ذرات بجا مانده از چگالی بالاتری برخوردار هستند. همچنین بررسی وزن مخصوص خاک برای جنس سنگ‌های مختلف نشان می‌دهد با کاهش استحکام و افزایش حساسیت به فرسایش، وزن مخصوص نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه آهک پالئوزوئیک با بیش‌ترین استحکام و کمترین حساسیت به فرسایش، کمترین و مارن (فرسایش سطحی) با کمترین استحکام و بیش‌ترین حساسیت به فرسایش، بیش‌ترین وزن مخصوص را دارد.



شکل ۷: روند تغییرات وزن مخصوص خاک برای جنس سنگ‌های مختلف و اشکال فرسایشی

#### نتایج محاسبه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

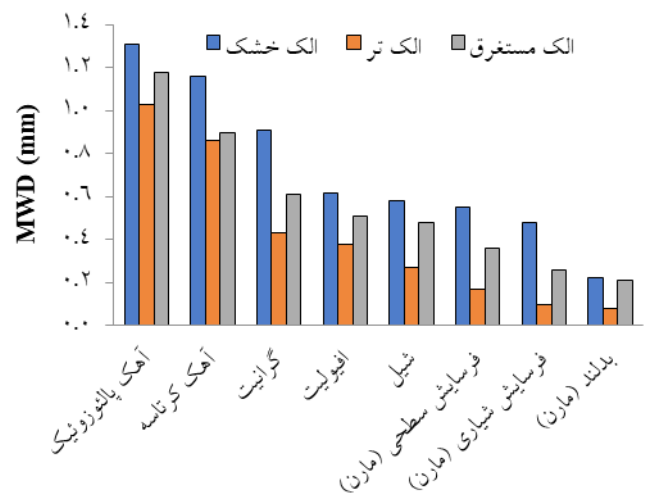
شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) برای سه شکل فرسایش سطحی، شیبی و بدلند و جنس سنگ‌های مختلف، در حالت الک خشک، الک تر و الک مستغرق محاسبه شد که با توجه به نتایج، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها برای هر سه شکل فرسایش و برای تمامی جنس سنگ‌ها، در روش الک خشک بیش‌ترین مقدار و در روش الک تر کمترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد؛ زیرا در روش الک خشک نمونه خاک تنها توسط دستگاه لرزانده می‌شود و هیچ نیروی خارجی دیگری باعث از هم پاشیده شدن خاکدانه‌ها نمی‌شود. در نتیجه قطر خاکدانه‌ها در این روش بیش‌تر از دو روش دیگر است. در روش الک تر مقدار خاک باقی مانده بر روی هر صفحه الک توسط دست شسته شده، در نتیجه خاکدانه‌ها از هم پاشیده شده و به علت افزایش ذرات ریز، کمترین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها مربوط به این روش خواهد بود.

در بین اشکال مختلف فرسایش (شکل ۸)، فرسایش سطحی بیش‌ترین و فرسایش بدلند کمترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها را در هر سه روش الک داراست. به عبارت دیگر، همان‌طور که از شکل فرسایش پیداست، فرسایش سطحی با بیش‌ترین میانگین

وزنی قطر خاکدانه‌ها نسبت به دو شکل فرسایشی دیگر کم‌ترین حساسیت به فرسایش را داراست.

با توجه به شکل ۸ در بین جنس سنگ‌های مختلف، آهک پالئوزوئیک دارای بیش‌ترین و مارن (فرسایش سطحی) دارای کم‌ترین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها می‌باشد. با توجه به روند افزایش حساسیت به فرسایش و استحکام سنگ‌ها، ارائه‌شده توسط محلاتی [۱۳]، سعدی‌خانی [۱۹] و شعبانی [۲۲] می‌توان نتیجه گرفت، با کاهش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، استحکام سنگ‌ها کاهش و حساسیت به فرسایش افزایش می‌یابد.

هم‌چنین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در روش الک مستغرق که نشان‌دهنده خاکدانه‌های پایدار در برابر تنش‌های آبی است، در جنس سنگ آهک پالئوزوئیک بیش‌ترین مقدار و در جنس سنگ مارن با شکل فرسایش بدلند کم‌ترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد.



جنس سنگ‌های مختلف و اشکال فرسایشی

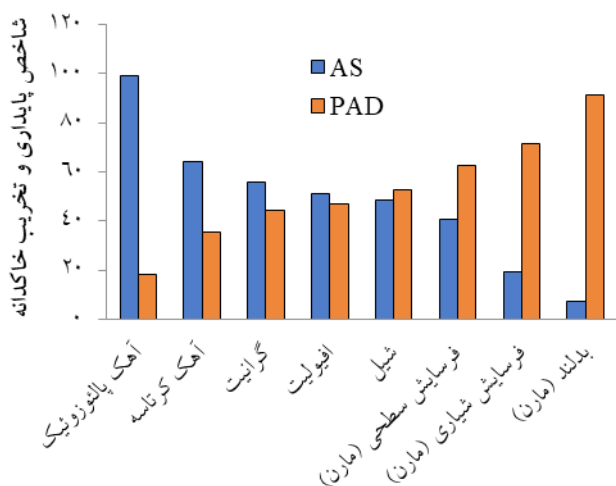
شکل ۸: روند تغییرات MWD برای جنس سنگ‌های مختلف و اشکال فرسایشی مارن

علاوه بر این با توجه به شکل ۸ افزایش میانگین قطر خاکدانه‌ها با کاهش وزن مخصوص آن‌ها همراه است [۱۰ و ۲۴]. در نتیجه آهک پالئوزوئیک با بیش‌ترین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، کم‌ترین و بدلند (مارن) با کم‌ترین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، بیش‌ترین وزن مخصوص را دارا است.

**نتایج محاسبه شاخص‌های پایداری و تخریب خاکدانه‌ها**  
 شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها (AS) و تخریب خاکدانه‌ها (PAD) برای اشکال فرسایشی و جنس سنگ‌های مختلف محاسبه شد. با توجه به شکل ۵ شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها (AS) و

تخریب خاکدانه‌ها (PAD) در مورد فرسایش سطحی به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار را در بین اشکال مختلف فرسایش به خود اختصاص می‌دهد. به‌طورکلی خاکدانه‌های بزرگ‌تر، پایدارتر و استحکام بیش‌تر ساختمان خاک مربوط به فرسایش سطحی می‌باشد. مقدار شاخص پایداری خاکدانه‌ها در مورد فرسایش شیبی کم‌تر از فرسایش سطحی و در مورد فرسایش بدلند کم‌ترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد. در نتیجه کوچک‌ترین و ناپایدارترین خاکدانه‌ها مربوط به فرسایش بدلند خواهد بود. هم‌چنین شاخص تخریب خاکدانه‌ها در حالت فرسایش شیبی بیش‌تر از فرسایش سطحی و در حالت فرسایش بدلند بیش‌ترین مقدار را داراست که نشان‌دهنده کم‌ترین پایداری خاکدانه‌ها است [۸].

بررسی شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها (AS) و تخریب خاکدانه‌ها (PAD) برای جنس سنگ‌های مختلف (شکل ۹) نشان می‌دهد که آهک پالئوزوئیک دارای بیش‌ترین درصد پایداری خاکدانه‌ها و کم‌ترین درصد تخریب خاکدانه‌ها و مارن با شکل فرسایش سطحی دارای بیش‌ترین درصد تخریب و کم‌ترین درصد پایداری خاکدانه‌ها می‌باشد. در نتیجه خاکدانه‌های بزرگ‌تر، پایدارتر و استحکام بیش‌تر ساختمان خاک در بین جنس سنگ‌های مورد مطالعه مربوط به آهک است.



جنس سنگ‌های مختلف و اشکال فرسایشی

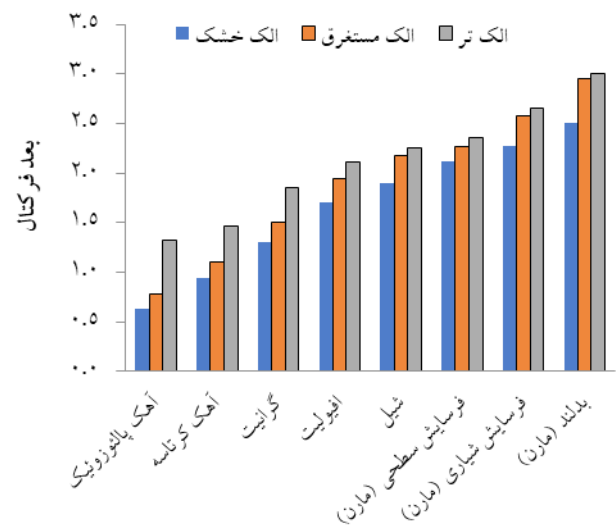
شکل ۹: روند تغییرات شاخص پایداری و تخریب خاکدانه برای جنس سنگ‌های مختلف و اشکال فرسایشی مارن

#### نتایج محاسبه بعد فراکتال

با استفاده از داده‌های آزمایشات توزیع اندازه ذرات به روش الک تر و الک خشک و توزیع اندازه خاکدانه‌ها به روش الک مستغرق و هم‌چنین محاسبه وزن مخصوص به روش وزنی (استوانه مدرج) و سطح ویژه به روش اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر، بعد فراکتال خاک به

کمک رابطه یانگ و کرافورد [۲۶] برای جنس سنگ‌های مورد مطالعه و اشکال فرسایشی مارن محاسبه شده که نتایج آن در شکل ۱۰ آورده شده است.

با توجه به نتایج آزمون LSD که حاکی از معنی دار بودن تفاوت بین اعداد بعد فراکتال به دست آمده برای اشکال مختلف فرسایش و جنس سنگ‌های مختلف است، می‌توان نتیجه گرفت که اشکال فرسایشی و جنس سنگ‌های مختلف بر بعد فراکتال خاک تأثیرگذار است. جدول ۲ نتایج آزمون LSD و شکل ۱۰ ارتباط بعد فراکتال خاک با جنس سنگ‌های مختلف و اشکال فرسایشی را نشان می‌دهد.



جنس سنگ های مختلف و اشکال فرسایشی

شکل ۱۰: ارتباط بعد فراکتال خاک با جنس سنگ‌های مختلف و اشکال فرسایشی

نتایج در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با تشدید شکل فرسایش از حالت سطحی به بدلند بعد فراکتال خاک نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در میان اشکال فرسایشی مورد مطالعه، فرسایش سطحی دارای کم‌ترین و فرسایش بدلند دارای بیش‌ترین بعد فراکتال است.

هم‌چنین در میان جنس سنگ‌های مورد مطالعه آهک پالئوزوئیک دارای کم‌ترین و مارن (فرسایش سطحی) دارای بیش‌ترین بعد فراکتال می‌باشد. با توجه به روند فرسایش پذیری سنگ‌های مختلف ارائه شده توسط محلاتی [۱۳] و شعبانی [۲۲]، می‌توان نتیجه گرفت از بین جنس سنگ‌های مورد مطالعه، مارن مقاومت کم و حساسیت بالا و آهک بیش‌ترین استحکام و کم‌ترین حساسیت به فرسایش را دارد و با توجه به اعداد فراکتال محاسبه شده، بیش‌ترین بعد فراکتال مربوط به مارن و کم‌ترین آن مربوط به آهک است. به عبارت دیگر، هرچه استحکام سنگ‌ها کم‌تر و حساسیت

به فرسایش پذیری بیش‌تر شود بعد فراکتال نیز افزایش می‌یابد و بالعکس [۲۴].

جدول ۲: مقایسه میانگین بعد فراکتال ( $D_f$ ) برای جنس سنگ‌های مختلف و اشکال فرسایشی

| الک تر  | بعد فراکتال |            | جنس سنگ و اشکال فرسایشی |
|---------|-------------|------------|-------------------------|
|         | الک خشک     | الک مستغرق |                         |
| ۱/۳۳ b  | ۰/۷۸ a      | ۰/۶۳ a     | آهک پالئوزوئیک          |
| ۱/۴۷ c  | ۱/۱ ab      | ۰/۹۴ a     | آهک کرتاسه              |
| ۱/۸۶ c  | ۱/۵ b       | ۱/۳ b      | گرانیت                  |
| ۲/۱۱ cd | ۱/۹۵ c      | ۱/۷ b      | افیولیت                 |
| ۲/۲۵ d  | ۲/۱۸ d      | ۱/۹ c      | شیل                     |
| ۲/۳۶ de | ۲/۲۷ e      | ۲/۱۲ d     | فرسایش سطحی (مارن)      |
| ۲/۶۶ de | ۲/۵۸ f      | ۲/۲۷ e     | فرسایش شیبی (مارن)      |
| ۳ fg    | ۲/۹۵ g      | ۲/۵۱ f     | بدلند (مارن)            |

اعداد با حروف مشابه از لحاظ آماری اختلاف معناداری ندارند.

با توجه به زمان بندی‌های زمین‌شناسی، دوران دیرینه زیستی یا پالئوزوئیک نسبت به دوره کرتاسه که سومین دوره از دوران میانه زیستی یا مزوزوئیک می‌باشد، قدمت بیش‌تری دارد. علاوه بر این، طبق گفته ونگ [۲۴] افزایش سن سنگ‌های رسوبی باعث افزایش استحکام آن‌ها می‌شود. پس با توجه به اعداد بعد فراکتال محاسبه شده برای آهک پالئوزوئیک و آهک کرتاسه، می‌توان نتیجه گرفت، افزایش سن سنگ‌های رسوبی باعث افزایش استحکام و کاهش بعد فراکتال می‌شود. از آنجاکه مقادیر بزرگ‌تر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و شاخص پایداری خاکدانه‌ها و مقادیر کوچک‌تر شاخص تخریب خاکدانه‌ها و بعد فراکتال بیان‌کننده خاک‌های پایدارتر است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در خاک‌هایی با پایداری خاکدانه بالا، فرسایش به میزان کم‌تری رخ می‌دهد [۲۷]. پس در میان اشکال فرسایشی مورد مطالعه فرسایش سطحی، دارای بیش‌ترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و شاخص پایداری خاکدانه‌ها و کم‌ترین مقدار شاخص تخریب خاکدانه‌ها و بعد فراکتال، می‌باشد و شدیدترین شکل فرسایش (بدلند) دارای کم‌ترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و شاخص پایداری خاکدانه‌ها و بیش‌ترین مقدار شاخص تخریب خاکدانه‌ها و بعد فراکتال می‌باشد. هم‌چنین در میان جنس سنگ‌های مورد مطالعه، آهک با دارا بودن بیش‌ترین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و شاخص پایداری خاکدانه‌ها و کم‌ترین مقدار شاخص تخریب خاکدانه‌ها، پایدارترین و مقاوم‌ترین جنس سنگ نسبت به فرسایش است.

### ارتباط بعد فراکتال خاک با پارامترهای مختلف

با استفاده از نرم افزار JASP رابطه رگرسیونی خطی بین بعد فراکتال (D) جنس سنگ‌های مختلف و اشکال فرسایشی با شاخص‌های پایداری خاکدانه، تخریب خاکدانه، میانگین وزنی قطر خاکدانه، وزن مخصوص و سطح ویژه به‌طور مجزا برقرار شد که نتایج به‌دست آمده در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: روابط رگرسیونی بین بعد فراکتال و شاخص‌های AS, PAD, MWD, SSA و  $\rho$

| شاخص پایداری | ضریب تبیین | رابطه رگرسیونی        |
|--------------|------------|-----------------------|
| AS           | ۰/۹۳       | $D=2/721-0/01248AS$   |
| PAD          | ۰/۹۶       | $D=0/9937+0/01873PAD$ |
| MWD          | ۰/۷۰       | $D=2/967-1/673MWD$    |
| SSA          | ۰/۹۰       | $D=1/919+0/04114SSA$  |
| $\rho$       | ۰/۸۵       | $D=1/158+0/9641\rho$  |

به‌طور کلی هرچه میانگین قطر خاکدانه‌ها و درصد پایداری آن‌ها کاهش یابد، وزن مخصوص، سطح ویژه خاکدانه‌ها، درصد تخریب و بعد فراکتال افزایش می‌یابد [۲۵]. به عبارت دیگر در میان اشکال فرسایشی مورد مطالعه، خاک‌ها با فرسایش سطحی دارای خاکدانه‌های بزرگ‌تر، پایداری و سطح ویژه و وزن مخصوص کم‌تر و در نهایت بعد فراکتال کم‌تر خواهند بود و بالعکس؛ خاک‌ها با شکل فرسایش بدندند دارای خاکدانه‌های ریزتر، ناپایداری و وزن مخصوص، سطح ویژه و بعد فراکتال بیش‌تر خواهند بود. هم‌چنین در میان جنس سنگ‌های مورد مطالعه، آهک دارای بزرگ‌ترین و پایداری‌ترین خاکدانه‌ها و کم‌ترین سطح ویژه، وزن مخصوص و بعد فراکتال می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، بیش‌ترین بعد فراکتال در تمام جنس سنگ‌ها و اشکال فرسایشی مربوط به داده‌های روش الک تر و بعد از آن الک مستغرق و در انتها الک خشک است. علت آن است که در روش الک تر مقدار خاک باقی‌مانده بر روی هر صفحه الک توسط دست‌شسته شده، در نتیجه خاکدانه‌ها از هم پاشیده شده و مقدار ذرات ریز افزایش و میانگین قطر خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر بعد فراکتال به علت افزایش ذرات ریز و کاهش خاکدانه‌های درشت، افزایش می‌یابد؛ اما در روش الک خشک که کم‌ترین بعد فراکتال را داراست، نمونه‌ها تنها توسط دستگاه شیک شده و هیچ نیروی خارجی باعث ازهم پاشیده شدن خاکدانه‌ها نمی‌شود. در نتیجه افزایش تعداد خاکدانه‌های درشت، کم‌ترین بعد فراکتال را به همراه خواهد داشت. در مورد روش الک مستغرق که اندازه و تعداد خاکدانه‌های پایدار مانده در آب را مشخص می‌کند، مقدار بعد فراکتال آن بین دو روش الک خشک و تر است.

هم‌چنین با توجه به شکل ۱۰ بیش‌ترین بعد فراکتال حاصل از الک مستغرق در میان اشکال فرسایشی مورد مطالعه مربوط به

فرسایش بدندند و کم‌ترین مقدار مربوط به فرسایش سطحی است که نشان می‌دهد خاکدانه‌های فرسایش سطحی بیش‌ترین مقاومت در برابر تنش‌های آبی را به خود اختصاص می‌دهند، در نتیجه خاکدانه‌ها پایداری و حساسیت کم‌تری نسبت به فرسایش دارند. در حالی که خاکدانه‌های فرسایش بدندند کم‌ترین مقاومت را در برابر تنش‌های آبی از خود نشان می‌دهند پس دارای استحکام کم‌تر و حساسیت بیش‌تر نسبت به فرسایش‌اند.

علاوه بر این در میان جنس سنگ‌های مورد مطالعه، بیش‌ترین بعد فراکتال حاصل از داده‌های الک مستغرق مربوط به مارن و کم‌ترین مقدار مربوط به آهک پالئوزوئیک است. این موضوع نشان می‌دهد خاکدانه‌های آهک در برابر تنش‌های آبی مقاومت بیش‌تری دارند. در نتیجه خاک‌هایی با جنس سنگ‌بستر آهکی مقاومت بیش‌تری به فرسایش دارند در حالی که خاک‌های مارنی بیش‌ترین حساسیت پذیری به فرسایش را دارند.

بزرگ‌تر بودن بعد فراکتال در داده‌های حاصل از الک مستغرق نسبت به الک خشک نشان می‌دهد که شمار زیادی از خاکدانه‌های ناپایدار در آب، پس از غوطه‌وری در آب به خاکدانه‌های ریز، خرد می‌شوند و تعداد خاکدانه‌های ریز افزایش می‌یابد [۵]. پس می‌توان نتیجه گرفت، مقادیر زیاد بعد فراکتال خاک بیانگر حکم فرما بودن تعداد زیاد ذرات ریز و تعداد کم ذرات بزرگ در بافت خاک می‌باشد که با نتیجه کار تاگار و همکاران [۲۳]، یانگ و همکاران [۲۶] و چی و همکاران [۱۸] مطابقت دارد.

با توجه به ماهیت روش‌های الک، هر چه تفاوت بین بعد فراکتال حاصل از روش الک مستغرق و بعد فراکتال حاصل از روش الک خشک زیاد باشد، بیانگر این است که بسیاری از خاکدانه‌ها در اثر رطوبت قابلیت تخریب شدن دارند و این موضوع می‌تواند در تشدید شکل فرسایش تأثیر زیادی داشته باشد [۱۷]. هم‌چنین هرچه فاصله بین الک مستغرق و الک تر بیش‌تر باشد بیانگر این است که خاکدانه‌های پایدار در آب از نظر تعداد و اندازه مناسب بوده و این موضوع در کاهش حساسیت به فرسایش می‌تواند مؤثر باشد [۱۱].

با توجه به شکل ۱۰ و مقایسه میانگین‌ها (جدول ۲)، در بین جنس سنگ‌های مورد مطالعه، بین بعد فراکتال حاصل از داده‌های الک خشک و الک مستغرق در مورد آهک و گرانیت تفاوت معناداری وجود ندارد اما در مورد افیولیت، شیل و مارن بین این دو بعد فراکتال تفاوت معناداری حاکم است که نشان می‌دهد، خاکدانه‌های افیولیت، شیل و مارن دارای استحکام کم‌تری هستند و در اثر رطوبت قابلیت بیش‌تری برای تخریب شدن دارند. هم‌چنین تفاوت بین بعد فراکتال حاصل از داده‌های الک مستغرق و تر در مورد آهک و گرانیت معنادار و در مورد افیولیت، شیل و مارن فاقد تفاوت معنادار است که نشان می‌دهد، خاکدانه‌های آهک و گرانیت در برابر تنش‌های آبی از نظر تعداد و اندازه وضعیت بهتری نسبت به افیولیت، شیل و مارن دارند.

علاوه بر این در بین اشکال فرسایشی مورد مطالعه، بدندند دارای

بیشترین تفاوت و فرسایش سطحی دارای کمترین تفاوت بین بعد فراکتال حاصل از داده‌های الک مستغرق و خشک می‌باشد. هم‌چنین تفاوت بین بعد فراکتال حاصل از داده‌های الک مستغرق و تر در مورد فرسایش سطحی معنادار و در مورد بدلند فاقد تفاوت معنادار است.

در این پژوهش به‌طورکلی به دو موضوع عمده پرداخته شد؛ بررسی بعد فراکتال اشکال مختلف فرسایش (سطحی، شیاری و بدلند) با جنس سنگ‌بستر یکسان (مارن) و بررسی بعد فراکتال جنس سنگ‌های مختلف (آهک، گرانیت، افیولیت، شیل و مارن) با شکل فرسایشی یکسان (فرسایش سطحی). هم‌چنین بررسی شاخص‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، درصد پایداری خاکدانه‌ها (AS) و درصد تخریب خاکدانه‌ها (PAD) و تعیین روند شاخص‌های مذکور با بعد فراکتال و وضعیت فرسایش و ارزیابی سه روش الک خشک، الک تر و الک مستغرق در محاسبه بعد فراکتال، از دیگر اهداف این پژوهش بود.

### نتیجه‌گیری

نتایج آزمون‌های آماری در این پژوهش نشان داد که اشکال فرسایشی با بعد فراکتال خاک در ارتباط است. به‌نحوی که با پیشرفت شکل فرسایش بعد فراکتال افزایش می‌یابد. در نتیجه در میان اشکال فرسایشی، فرسایش بدلند بیشترین مقدار بعد فراکتال و فرسایش سطحی کمترین مقدار بعد فراکتال را داراست. هم‌چنین جنس سنگ‌های مختلف نیز با بعد فراکتال خاک در ارتباط است. به‌نحوی که با کاهش استحکام سنگ‌ها و افزایش حساسیت به فرسایش، بعد فراکتال افزایش می‌شود. در نتیجه در بین جنس سنگ‌های مورد مطالعه آهک با بیشترین استحکام و مارن (فرسایش سطحی) با کمترین استحکام به ترتیب کمترین و بیشترین بعد فراکتال را به خود اختصاص داده‌اند. محاسبه شاخص‌های پایداری (MWD, AS, PAD) برای اشکال فرسایشی و جنس سنگ‌های مختلف نشان داد که خاکدانه‌های بزرگ‌تر، پایدارتر و استحکام بیش‌تر ساختمان خاک در بین اشکال فرسایشی مربوط به فرسایش سطحی (مارن) و در بین جنس سنگ‌های مختلف مربوط به آهک می‌باشد [۲۴]. در ادامه محاسبه شاخص میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) با استفاده از داده‌های روش الک خشک، تر و مستغرق برای هر سه شکل فرسایش و جنس سنگ‌های مختلف نشان داد که بیشترین میزان MWD مربوط به روش الک خشک، سپس الک مستغرق و کمترین مقدار آن مربوط به روش الک تر می‌باشد. تعیین روند شاخص‌های AS, PAD, MWD, SSA و  $p$  با بعد فراکتال، حاکی از آن است که MWD و AS با بعد فراکتال رابطه منفی و PAD, SSA و وزن مخصوص با بعد فراکتال رابطه مثبت دارد؛ یعنی هرچه میانگین قطر خاکدانه و درصد پایداری خاکدانه‌ها بیش‌تر باشد، سطح ویژه، وزن مخصوص و بعد فراکتال کاهش می‌یابد و بالعکس [۲۲]. مقایسه سه روش الک در محاسبه بعد فراکتال نیز

نشان داد که بیشترین بعد فراکتال مربوط به داده‌های الک تر، سپس الک مستغرق و در آخر الک خشک می‌باشد. علت آن است که در روش الک خشک تعداد خاکدانه‌های درشت و در روش الک تر تعداد خاکدانه‌های ریز بیش‌تر است در نتیجه بعد فراکتال به ترتیب با داده‌های الک خشک، مستغرق و تر افزایش می‌یابد [۱۸، ۲۳ و ۲۶].

با توجه به محاسبات سطح ویژه، در بین اشکال مختلف فرسایش، فرسایش سطحی کمترین و فرسایش بدلند بیشترین سطح ویژه را داراست و در میان جنس سنگ‌های مختلف آهک کمترین و مارن (فرسایش سطحی) بیشترین سطح ویژه را به خود اختصاص می‌دهد. پس می‌توان نتیجه گرفت شکل هندسی خاکدانه‌های فرسایش سطحی نسبت به بدلند، در بین اشکال فرسایشی و خاکدانه‌های آهکی و گرانیتی نسبت به مارن، در بین جنس سنگ‌های مورد مطالعه، گرد شده تر و منظم‌تر است. علاوه بر این رابطه رگرسیونی بین بعد فراکتال و سطح ویژه نشان می‌دهد که این دو پارامتر همبستگی مثبتی با یکدیگر دارند که با نتیجه پژوهش کشاورزی و همکاران [۸] که اذعان داشته‌اند؛ مقدار بعد فراکتال بیش‌تر نشان‌دهنده بی‌نظمی هندسی بیش‌تر است، صدق می‌کند. پس بیشترین بی‌نظمی هندسی از لحاظ شکل خاکدانه‌ها در بین اشکال فرسایشی مربوط به فرسایش بدلند و کمترین بی‌نظمی مربوط به فرسایش سطحی خواهد بود. هم‌چنین در بین جنس سنگ‌های مورد مطالعه، خاکدانه‌های آهک و گرانیت دارای کمترین و خاکدانه‌های مارن بیشترین بی‌نظمی هندسی از لحاظ شکل خاکدانه را دارند. هم‌چنین با توجه به ماهیت روش‌های الک، هر چه تفاوت بین بعد فراکتال حاصل از روش الک مستغرق و بعد فراکتال حاصل از روش الک خشک زیاد باشد، بیانگر این است که بسیاری از خاکدانه‌ها در اثر رطوبت قابلیت تخریب شدن دارند و این موضوع می‌تواند در تشدید شکل فرسایش تأثیر زیادی داشته باشد مانند؛ وضعیت فرسایش بدلند در میان اشکال فرسایشی و مارن (فرسایش سطحی) در میان جنس سنگ‌ها. هم‌چنین هرچه فاصله بین الک مستغرق و الک تر بیش‌تر باشد بیانگر این است که خاکدانه‌های پایدار در آب از نظر تعداد و اندازه مناسب بوده و این موضوع در کاهش حساسیت به فرسایش می‌تواند مؤثر باشد مانند؛ وضعیت فرسایش سطحی در میان اشکال فرسایشی و آهک در میان جنس سنگ‌ها [۳].

### پیشنهادها

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر، موارد زیر در جهت تکمیل مطالعات آینده پیشنهاد می‌گردد:

۱- با توجه به رابطه مناسب بعد فراکتال خاک با میزان استحکام و حساسیت به فرسایش خاک‌های مختلف می‌توان از بعد فراکتال به‌عنوان شاخصی مناسب جهت ارزیابی کمی و کیفی فرسایش خاک استفاده نمود.

۲- با توجه به تنوع زیاد روابط تعیین‌کننده بعد فراکتال و به‌منظور معرفی بهترین روش برای تعیین این پارامتر، پیشنهاد می‌شود بعد

of Soil Science, 7(2): 93-102,

9. Le Bissonnais, Y., Prieto, I., Roumet, C., Nespoulous, J., Metayer, J., Huon, S., and Stokes, A. 2018. Soil aggregate stability in Mediterranean and tropical agro-ecosystems: effect of plant roots and soil characteristics. *Plant and Soil*, 424, 303-317.

10. Li, K., Yang, H., Han, X., Xue, L., Lv, Y., Li, J., and Zhang, Y. 2018. Fractal features of soil particle size distributions and their potential as an indicator of Robinia pseudoacacia invasion. *Scientific Reports*, 8(1): 7075.

11. Liu, Y., Gong, Y. M., Wang, X., Hu, Y. K. 2013. Volume fractal dimension of soil particles and relationships with soil physical-chemical properties and plant species diversity in an alpine grassland under different disturbance degrees. *J Arid Land* 5(4):480-487.

12. Ma, X., Zhao, C., and Zhu, J. 2021. Aggravated risk of soil erosion with global warming—A global meta-analysis. *Catena*, 200, 105129.

13. Mahallati, S. Z., Pazira, E., Abbasi, F., and Babazadeh, H. 2018. Estimation of soil water retention curve using fractal dimension. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 22(2): 173-178.

14. Marschalko, M., Zięba, Z., Niemiec, D., Neuman, D., Mońka, J., and Dąbrowska, J. 2021. Suitability of engineering-geological environment on the basis of its permeability coefficient: Four case studies of fine-grained soils. *Materials*, 14(21): 6411.

15. Meegoda, J. N., and Martin, L. 2019. In-situ determination of specific surface area of clays. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37, 465-474.

16. Mezbani, M., Rezaei Moghadam, M., and Hejazi, A. 2021. Assessment of soil erosion risk in land uses using Revised Universal Soil Loss Equation (Case Study: Sikan Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 10(1): 41-63. (In Persian).

17. Mohammad Mahdi, C., and Dahmardeh Ghaleno, M. R. 2020. Evaluating fractal dimension of the soil particle size distributions and soil water retention curve obtained from soil texture components. *Archives of*

فراکتال به کمک سایر روابط نیز تعیین و نتایج با یکدیگر مقایسه شود.

۳- به منظور دستیابی به نتایج جامع‌تر، پیشنهاد می‌شود بعد فراکتال تمامی اشکال فرسایشی و تمامی جنس سنگ‌های موجود در مناطق مختلف تعیین و با یکدیگر مقایسه شود.

#### منابع

1. Amirinejad, A., and Ghotbi, S. 2018. The impact of land use change on soil physical quality in Gilan-e-Gharb region. *Journal of Water and Soil Science*, 22(2). (In Persian).

2. Bottomley, P. J., Angle, J. S., and Weaver, R. W. (Eds.). 2020. *Methods of soil analysis, Part 2: Microbiological and biochemical properties* (Vol. 12). John Wiley & Sons.

3. Davari, M., Zalvae, Z., and Mahmoodi, M. A. 2019. A Comparison Between Empirical and Fractal Models Fitted to the Measured Soil Moisture Characteristic Curve Data. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(4): 862-847. (In Persian).

4. Esmali Ouri, A., and Kateb, F. 2020. Study of Soil Erosion Potential Using Landscape Measurements (Case Study: Sharif Beiglou Watershed, Ardabil Province). *Hydrogeomorphology*, 7(24): 145-164. (In Persian).

5. Fu, X., Ding, H., Sheng, Q., Zhang, Z., Yin, D., and Chen, F. 2022. Fractal analysis of particle distribution and scale effect in a soil-rock mixture. *Fractal and Fractional*, 6(2): 120.

6. Gao, Z., Niu, F., Lin, Z., and Luo, J. 2021. Fractal and multifractal analysis of soil particle-size distribution and correlation with soil hydrological properties in active layer of Qinghai-Tibet Plateau, China. *Catena*, 203, 105373.

7. Hasanzadeh, N., Gholami, L., Khaledi, Darvishan A., and Yonesi, H. 2021. Effect of Various Rates of Montmorillonite Nanoclay on Changing Runoff and Soil Loss. *Journal of Water and Soil Science*, 25 (1): 219-230. (In Persian).

8. Keshavarzi, A., Tuffour, H. O., Bagherzadeh, A., and Duraisamy, V. A. S. U. 2018. Spatial and fractal characterization of soil properties across soil depth in an agricultural field, Northeast Iran. *Eurasian Journal*

24. Wang, Z., Hasi, E., Han, X., and Qingda, M. 2024. Fractal characterization of soil particle size distribution under different land use patterns on the north slope of Wula Mountain in China. *Journal of Soils and Sediments*, 1-17.
25. Xiaodan, W., and Mai-He, Li. 2006. Fractal characteristics of soils under different land-use patterns in the arid and semiarid regions of the Tibetan Plateau, China, *Geoderma* 134:56– 61.
26. Young, I., and J. Crawford, 1993. The fractal structure of soil aggregates: its measurement, and interpretation. *Journal of Soil Science* 42: 187-192.
27. Zambon, N., Johannsen, L. L., Strauss, P., Dostal, T., Zumr, D., Cochrane, T. A., and Klik, A. 2021. Splash erosion affected by initial soil moisture and surface conditions under simulated rainfall. *Catena*, 196, 104827.
28. Zhu, X., Cai, J., Wang, G., and Ji, J. 2020. The influence of organic matter on mineral surface area measurement of mudrocks by ethylene glycol monoethyl ether adsorption. *Applied Clay Science*, 193, 105666.
- Agronomy and Soil Science, 66(12):1668-1678.
18. Qi, F., Zhang, R., Liu, X., Niu, Y., Zhang, H., Li, H., and Zhang, G. 2018. Soil particle size distribution characteristics of different land-use types in the Funiu mountainous region. *Soil and Tillage Research*, 184, 45-51.
19. Sadikhani, M. R. 2019. Prediction of Cation Exchange Capacity using fractal dimension of soil particle size distribution. *Applied Soil Research*, 7(2): 56-66. (In Persian).
20. Senesi, N., and Loffredo, E. 2018. The chemistry of soil organic matter. In *Soil physical chemistry* (pp. 239-370). CRC press.
21. Sepaskhah, A. R. and Tafteh, A. 2011. Pedotransfer function for estimation of soil-specific surface area using soil fractal dimension of improved particle-size distribution. *Archives of Agronomy and Soil Science* 1-11.
22. Shabani, S., Zeinalzadeh, K., and Rezaei, E. 2021. The performance of fractal models in estimating soil particle size distribution. *Applied Soil Research*, 8(4): 158-168. (In Persian).
23. Tagar, A. A., Adamowski, J., Memon, M. S., Do, M. C., Mashori, A. S., Soomro, A. S., and Bhayo, W. A. 2020. Soil fragmentation and aggregate stability as affected by conventional tillage implements and relations with fractal dimensions. *Soil and Tillage Research*, 197, 104494.



## Abstract

## Investigation the Relationship Between the Fractal Dimension of Soil Particles with Different Types of Erosion and Different Parent Materials

N. Sadeghzadeh yazdi<sup>1</sup>, A. Golkarian<sup>\*2</sup> and M. Jahani<sup>3</sup>

Received: 2024/02/22 Accepted: 2024/04/04

Soil erosion is a global problem that reduce soil fertility and water quality Proper evaluation of the factor's affecting erosion is the first step in choosing solution to reduce and control this destructive phenomenon. Important parameters that can be examined in this issue are soil texture, size and quality soil grains and type of bedrock, which can affect the soil erodibility coefficient. Fractal dimension (Df) of particle size distribution (PSD) and fractal dimension of aggregate size distribution (ASD) have been introduced as a predictor of soil texture-related properties. The purposes of this study were to investigate the relations between fractal dimension and various forms of erosion, including surface erosion, rill and badland, also to investigate the relations between fractal dimension and various forms of bedrock and to study the mean weight diameter (MWD), aggregate stability (AS) and aggregate degradation (PAD). Fractal dimension was computed by Yong and Crawford model using the data of particle size distribution experiments by the method of wet and dry sieve and aggregate size distribution by submerged sieve method. Bulk density by weighted method and specific surface area by EGME method were determined. The results of statistical analysis showed that different forms of erosion and bedrock are related to the fractal dimension. In other words, with the development of the erosion form, the fractal dimension increased, so badland had the highest and surface erosion had the smallest fractal dimension. Also, among various bedrocks, with decrease in resistance and increase in erodibility, Df was increased. In addition, fractal dimension had a positive correlation with MWD and AS and negative correlation with PAD. Finally, it can be concluded that due to the ease of calculating the fractal dimension of soil and its proper relationship with erosion, this index can be used in the quantitative and qualitative assessment of soil erosion.

**Keywords:** Particle size, Rock type, Soil erosion types, Soil grain size, Soil grain stability.

1. M. Sc. in Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad, Iran.
2. Corresponding author, Associate professor, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad, Iran, Email: Golkarian@um.ac.ir
3. M. Sc. Student in Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad. Mashhad, Iran.