

## مدل سازی فرسایش پذیری خاک در منطقه خور و بیابانک

سید علی موسوی<sup>۱\*</sup>، ابوالفضل رنجبر فردوئی<sup>۲</sup>، سید حجت موسوی<sup>۳</sup> و سید جواد ساداتی نژاد<sup>۴</sup>

\*۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، گروه مهندسی علوم بیابان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه ایران

پست الکترونیک: mosaviali5@gmail.com

۲- دانشیار، گروه مهندسی علوم بیابان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، ایران

۳- استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا و اکوتوریسم، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، ایران

۴- دانشیار، گروه اکوهیدرولوژی و مهندسی طبیعت، دانشکده انرژی‌های نو و محیط‌زیست، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۷/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱/۱۷

### چکیده

فرسایش خاک متأثر از عوامل فرسایش‌پذیر و فرساینده است و مدل‌سازی منطقه‌ای فرسایش‌پذیری می‌تواند معیاری برای برآورد میزان هدررفت خاک و تخریب اراضی محسوب شود. هدف از این پژوهش مدل‌سازی فرسایش‌پذیری در منطقه خور و بیابانک با استفاده از مؤلفه‌های فیزیکی خاک، فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی از طریق روش‌های تحلیل آماری است. بدین منظور ابتدا تعداد ۳۳ نمونه خاک در امتداد سه ترانسکت از واحدهای پلایا تا کوهستان از عمق ۰ تا ۵۰ سانتیمتر برداشت شد. سپس از طریق تجزیه و تحلیل‌های آزمایشگاهی مقادیر عناصر ماسه، رس، سیلت، کربن و ماده آلی اندازه‌گیری شد و مقادیر عامل فرسایش‌پذیری (K) و شاخص فرسایش‌پذیری خاک (SEI) محاسبه گردید. علاوه بر این در این نقاط پارامترهای فیزیونومی زمین مانند مقادیر شیب، ارتفاع و جهت شیب و همچنین پوشش گیاهی برآورد شد. در نهایت با استفاده از رگرسیون ساده و چند متغیره مبادرت به رابطه‌سنجی بین مؤلفه‌های مذکور گردید و از میان آنها مناسبترین روابط با بالاترین ارزش رجحانی انتخاب شد. نتایج مدل‌سازی حکایت از حداکثر ارتباط معنی‌دار خطی SEI با عناصر سیلت، رس و ماسه به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۸۴۷، ۰/۸۳۰ و K با مؤلفه‌های ماسه، رس و سیلت به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۸۴، ۰/۹۸۱ و ۰/۸۶۶ داشت. نتایج رگرسیون چندگانه نیز بیانگر بیشترین ارتباط معنی‌دار SEI و K با مجموعه پارامترهای فیزیکی خاک، فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۵۹ و ۰/۹۹۲ و خطای برآورد ۰/۰۰۰۷ و ۰/۰۰۱ در سطح معنی‌داری ۹۹٪ می‌باشد. بنابراین نتایج امکان تخمین سریع و نسبتاً دقیق فرسایش‌پذیری را در قالب محاسبه SEI و K از طریق مؤلفه‌های فیزیکی خاک، فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی با بهره‌گیری از مدل‌های آماری تک‌متغیره و چندمتغیره فراهم می‌آورد. بدیهی است در صورت دستیابی به مؤلفه‌های مذکور می‌توان میزان فرسایش‌پذیری خاک را در حوضه خور و بیابانک با استفاده از مدل‌های خطی و غیرخطی برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش‌پذیری، مدل‌سازی، تحلیل رگرسیون، مؤلفه فیزیکی خاک، خور و بیابانک.

### مقدمه

نتیجه آن از بین رفتن منابع تجدیدشونده است (احمدی، ۱۳۸۳). بیابان‌زایی مشتمل بر فرایندهایی است که در نتیجه عوامل طبیعی و عملکرد نادرست انسان ایجاد می‌شود

در حال حاضر بیابان‌زایی به‌عنوان یک معضل محیط‌زیستی گریبان‌گیر بسیاری از مناطق جهان می‌باشد که

مکانی از فرسایش پذیری خاک در اقدامات مدیریتی، کنترل فرسایش و مدیریت حوضه‌های آبخیز نقش مؤثری دارد (Prasannakumar, 2001). همچنین با شناخت و ارزیابی این عوامل، می‌توان از طریق راهکارهای اصولی از زیان‌های مختلف فرسایش جلوگیری کرد و یا آن را به حداقل ممکن رساند.

مدلسازی در زمینه‌های مختلف علوم منابع طبیعی در مواردی که اندازه‌گیری مستقیم یک پارامتر دشوار است، امری اجتناب‌ناپذیر است. فرسایش بادی به سبب وجود پیچیدگی‌هایی که در فرایند انجام آن از مرحله کنده شدن، انتقال، سایش، دانه‌بندی و در نهایت رسوب دارد (عظیم‌زاده و همکاران، ۱۳۸۱)، از این امر مستثنی نیست. البته تاکنون روش‌های مختلفی به صورت مستقیم (اندازه‌گیری) یا غیرمستقیم (استفاده از مدل) برای مدلسازی و تعیین عامل فرسایش‌پذیری به عنوان جزء جدانشدنی فرسایش خاک معرفی شده است. روش‌های مستقیم با وجود دقت مناسب، به سبب وقت‌گیر بودن و جنبه‌های اقتصادی کمتر مورد توجه هستند، اما استفاده از مدل‌ها در این مورد هر روز توسعه بیشتری پیدا کرده است. مهمترین ویژگی این مدل‌ها این است که می‌توان با برآورد واقعی از طبیعت، در راستای مدیریت هر چه بهتر منابع طبیعی برنامه‌ریزی و از پیامدهای منفی در این زمینه جلوگیری کرد (Fotoohi et al., 2011).

برای ارزیابی فرسایش خاک، پژوهش‌های متعددی انجام شده است. رابطه جهانی فرسایش خاک (مدل USLE: Universal Soil Loss Equation)، برای پیش‌بینی متوسط سالانه تلفات خاک حاصل از فرسایش ورقه‌ای و شیاری در یک قطعه زمین، از طریق جمع‌آوری اطلاعات فرسایش خاک از ۳۶ ایستگاه تحقیقاتی در ۲۶ ایالت امریکا طراحی شد. این مدل فرسایش را به صورت ترکیبی از شش فاکتور که نشان‌دهنده نیروی فرساینده باران، فرسایش‌پذیری خاک، طول و درجه شیب، سیستم کشت و عملیات مدیریتی است، تخمین زده و برای پیش‌بینی تلفات خاک در اراضی کشاورزی به کار می‌رود (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸). تحقیقات و مطالعات انجام‌شده در سال‌های بعد منجر به

(Reynolds, 2008). فرسایش خاک به عنوان یکی از پیامدهای بیابان‌زایی و تخریب اراضی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، باعث تغییرات مخرب اکولوژیکی در بسیاری از حوضه‌ها شده، و سیر فزاینده آن تهدیدی برای منابع طبیعی، کشاورزی و محیط‌زیست به‌شمار می‌رود (Rahman et al., 2009). بنابراین می‌توان از فرسایش خاک به عنوان یکی از مهمترین موانع دستیابی به توسعه پایدار کشاورزی و منابع طبیعی نام برد (Schwab et al., 1993). فرسایش خاک به صورت آبی، بادی، یخچالی و ... رخ می‌دهد. در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک فرسایش بادی دارای شدت بیشتری بوده و با قدرت زیادتری منجر به تخریب اراضی می‌شود. قابل‌ذکر است که در ایجاد فرسایش بادی و تخریب حاصل از آن عوامل متعددی از جمله شدت و مدت وزش باد، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، توپوگرافی منطقه، وضعیت پوشش گیاهی و برخی عوامل دیگر دخالت دارند که کلیه این عوامل در ارتباط با هم بوده و منجر به افزایش یا کاهش شدت فرسایش می‌شوند (احمدی، ۱۳۷۷). آنچه مسلم است اینکه عوامل دخیل در فرسایش بادی را می‌توان در دو دسته فرسایش‌زا و فرسایش‌پذیر تقسیم‌بندی کرد. فرسایش‌زایی ارتباط با فیزیک باد و ویژگی‌هایی مانند سرعت، تداوم، جهت و انرژی آن دارد. عوامل فرسایش‌پذیری به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شیوه‌های خاک‌ورزی و همچنین کاربری اراضی وابسته است (Hudson, 1981). بنابراین یکی از عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش بادی، فرسایش‌پذیری خاک است که وابستگی زیادی به ویژگی‌های ذاتی خاک دارد. فرسایش‌پذیری خاک عبارت است از مقدار هدررفت خاک به ازای یک واحد  $EL_{30}$  که در پلات استاندارد (پلاتی با طول ۲۲ متر و شیب متوسط ۹ درصد) اندازه‌گیری می‌شود. به علت تغییر عوامل مؤثر در شکل‌گیری خاک، فرسایش‌پذیری دارای تغییرات مکانی و زمانی است که بیشترین مقدار آن در فصل بهار و کمترین مقدار آن نیز در فصل‌های پاییز و زمستان برآورد شده است (Ferreira & Renard, 1993). از این‌رو اطلاعات زمانی و

روابط آماری مورد تأکید بوده و از اهمیت بسیار زیادی در زمینه مدیریت و برنامه‌ریزی زیست‌محیطی، پایش و حفاظت از عرصه‌های منابع طبیعی برخوردار است. بنابراین هدف این پژوهش این است تا با استفاده از پایگاه داده‌های میدانی و بهره‌گیری از روش‌ها و تجزیه و تحلیل‌های آماری به مدل‌سازی فرسایش‌پذیری خاک بر مبنای عوامل مؤثر در منطقه خور و بیابانک بپردازد.

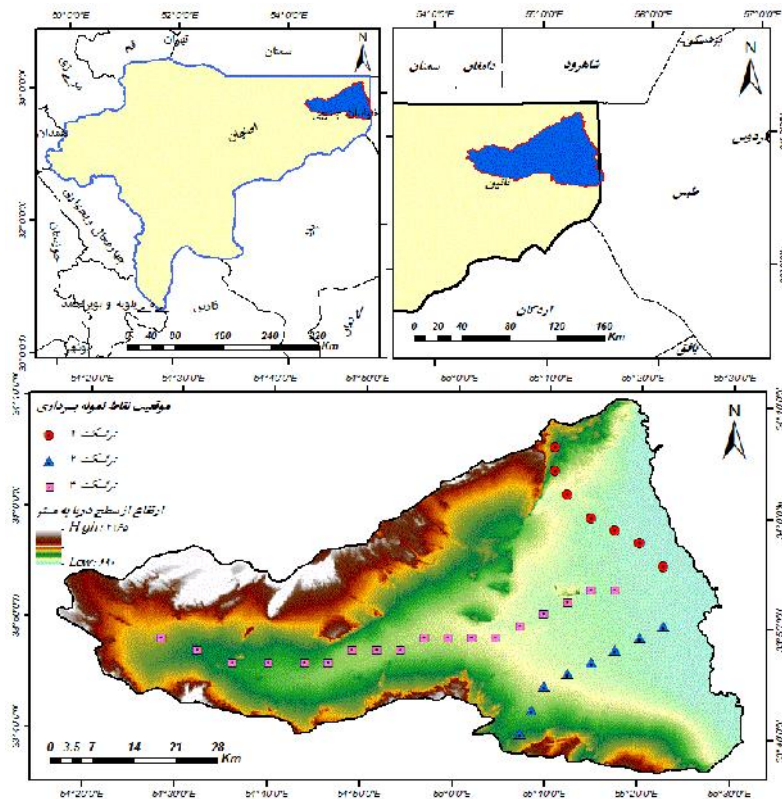
### مواد و روش‌ها

#### معرفی منطقه مطالعاتی

خور و بیابانک، منطقه‌ای خشک و بیابانی از توابع استان اصفهان است که در جنوب‌غربی کویر بزرگ نمک قرار دارد. این منطقه با وسعت  $3794/273$  کیلومتر مربع، در مختصات جغرافیایی  $33$  درجه و  $37$  دقیقه تا  $34$  درجه و  $11$  دقیقه عرض شمالی و  $54$  درجه و  $16$  دقیقه تا  $55$  درجه و  $14$  دقیقه طول شرقی گسترده شده است (شکل ۱). زمین‌های منطقه گچی، نمکی، آهکی و با افق سطحی کلسیک می‌باشد. کوه‌های آن جزو کوه‌های ایران مرکزی است که به چین‌خوردگی‌های آلپی تعلق دارد. خور و بیابانک در کمربند بیابانی نیمکره شمالی قرار دارد و اقلیم آن طبق روش طبقه‌بندی دومارتن فراخشک گرم است. طبق داده‌های اداره هواشناسی خور و بیابانک حداقل و حداکثر دمای مطلق منطقه به ترتیب  $14-$  و  $46/6$  درجه سانتی‌گراد و همچنین میانگین بلندمدت بارش آن  $83/9$  میلی‌متر است. پوشش گیاهی غالب منطقه درمنه دشتی و قیچ بوده و قسمت عمده‌ای از آن بدون پوشش است که شامل کویر و تپه‌های ماسه‌ای می‌باشد.

توسعه رابطه جهانی تلفات خاک اصلاح‌شده (مدل: *RUSLE*: Revised *USLE*) گردید (*Renard et al.*, 1997). این مدل شش فاکتور مشابه *USLE* داشته، اما برآوردهای دقیق‌تری از فاکتورهای فرساینده‌گی باران، فرسایش‌پذیری خاک، پوشش گیاهی و عملیات حفاظتی دارد (*Laflen et al.*, 1991)، همچنین برای پیش‌بینی تلفات خاک در مناطق گسترده‌تر و در شرایط مختلف پوشش مانند اراضی زراعی، جنگل، مرتع و جنگل‌های آسیب‌دیده توسعه‌یافته است از این رو فرسایش‌پذیری از عوامل کلیدی دخیل در مدل‌های تخمین فرسایش و رسوب از جمله *USLE*، *RUSLE*، *MUSLE* و *MPSIAC* (Modified Pacific South-West Inter Agency Committee) و تابعی از توزیع اندازه ذرات، ماده آلی، ساختمان و نفوذپذیری است. *Rahman* و همکاران (۱۹۹۶) به وجود همبستگی مکانی در مورد مواد آلی و فرسایش‌پذیری اشاره کردند. *Miller* و همکاران (۱۹۸۸) به وجود ساختار مکانی برای توزیع اندازه ذرات در فرسایش‌پذیری پی بردند. *Wang* و همکاران (۲۰۰۱) در تعیین فاکتور فرسایش‌پذیری خاک تمام متغیرها را همسانگرد ذکر کردند. *Veihe* (۲۰۰۲) در بررسی تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری خاک، مدل نمایی را برای متغیر رس به‌عنوان یک مدل بهینه معرفی کرد.

منطقه خور و بیابانک به‌عنوان یکی از مهمترین کانون‌های بحران فرسایش در اثر فرایندهای بادی و آبی در مناطق خشک ایران مرکزی مطرح است. به‌دلیل عواملی مانند ضعف پوشش گیاهی، تداوم خشکی و مواد آلی اندک، فرسایش‌پذیری در این منطقه زیاد بوده و به‌طورکلی فرایند باد بیشترین تأثیرگذاری را بر فرسایش خاک دارد. از این رو مطالعه فرسایش خاک در قالب بررسی و ارزیابی عوامل فرسایش‌پذیری و همچنین مدل‌سازی مقدار آن از طریق



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی و نقاط نمونه برداری

(شکل ۱). ساختمان سطحی خاک نیز به عنوان یک عامل مؤثر در فرسایش پذیری به صورت مستقیم مورد بررسی قرار گرفت و بر اساس راهنمای ویشمایر، نوع ساختمان تعیین شد. نمونه برداری خاک در عمق ۰ تا ۵۰ سانتیمتری خاک انجام و بعد نمونه ها به آزمایشگاه منتقل و پارامترهای درصد کربن آلی، رس، سیلت و ماسه اندازه گیری شد (شکل ۲). تعیین بافت خاک و توزیع اندازه ذرات به روش هیدرومتری (Klute, 1986) انجام شد. کلاس نفوذپذیری به صورت غیرمستقیم و با استفاده از روش SCS تعیین گردید و برای تعیین مقدار شن ریز از روش الک تر استفاده شد. به منظور تعیین میزان ماده آلی نیز از روش والکلی بلاک (Nelson & Sommer, 1982) بهره گیری شد.

این پژوهش از نوع کاربردی بوده و روش شناسی آن تلفیقی از نمونه برداری های میدانی، تجزیه و تحلیل های آزمایشگاهی و مدل سازی های آماری است. در این مورد ابتدا موقعیت منطقه مطالعاتی با استفاده از تصاویر ماهواره ای گوگل ارث، نقشه های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ و توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰۰ مشخص شد. سپس با مراجعات میدانی به منطقه، نمونه های خاک از قسمت های مختلف واحدهای پلایا، دشت سر و کوهستان برداشت گردید. در مجموع، با توجه به وسعت منطقه و متناسب با نوع خاک، تعداد ۳۳ نمونه برداشت شد. روش نمونه برداری از نوع طولی بوده و در امتداد سه ترانسکت از مناطق کم ارتفاع در واحد پلایا آغاز و به مناطق تپه ماهوری در واحد کوهستان ختم گردید



شکل ۲- تصاویر نحوه برداشت نمونه در منطقه مطالعاتی و تجزیه و تحلیل‌های آزمایشگاهی

مبادرت به محاسبه و تخمین مقادیر فرسایش‌پذیری خاک از طریق روابط (۱) و (۳) (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸، ۵۸؛ وب و گون، ۲۰۰۹، ۵۸۷) گردید.

نظر به اهمیت پارامترهای بافت خاک، درصد کربن و ماده آلی در برآورد میزان فرسایش‌پذیری، پس از اندازه‌گیری پارامترهای مزبور در محیط آزمایشگاهی،

$$K = \frac{[(2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} (12 - OM) + 3.25 (S_t - 2) + 2.25 (P_t - 3)]}{100} \times 0.1317 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$M = (Msilt + Mvfs) \times (100 - Mc) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$M_{silt}$ : درصد محتوای سیلت،  $M_{vfs}$ : درصد محتوای شن و ماسه بسیار ریز،  $OM$ : درصد محتوای مواد آلی،  $P_t$ : کلاس نفوذپذیری و  $S_t$ : کلاس ساختمان خاک می‌باشد.

در این روابط مؤلفه‌های  $K$ : عامل فرسایش‌پذیری خاک برحسب  $(t h MJ^{-1} mm^{-1})$ ،  $M$ : عامل بافت خاک است که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.  $Mc$ : درصد محتوای رس،

$$SEI = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[ -0.025 \left( 1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} \times \left( \frac{S_i}{Cl + S_i} \right)^{0.3} \times \left[ 1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 295C)} \right] \times \left[ 1 - \frac{0.75S_n}{S_n + \exp(-5.51 - 229S_n)} \right] \quad \text{رابطه (۳)}$$

فرسایش‌پذیری به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین کاربری اراضی، عوامل فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی وابسته است. بنابراین علاوه بر شاخص‌های خاک‌شناسی، مشخصات شاخص‌های فیزیونومی زمین مانند ارتفاع، شیب، جهت شیب و پوشش گیاهی نیز تهیه شد و به‌علت تأثیر قابل توجه این شاخص‌ها در مدل‌سازی از آنها استفاده گردید و در نهایت پایگاه داده برای مدل‌سازی کامل شد (جدول ۱).

در این رابطه  $SEI$ : شاخص فرسایش‌پذیری خاک،  $S_a$ : درصد ذرات ماسه بین  $(0.05 - 2.0 mm)$ ،  $S_i$ : درصد ذرات سیلت بین  $(0.05 - 0.02 mm)$ ،  $C_i$ : درصد ذرات رس  $(> 2.0 mm)$ ،  $C$ : درصد محتوای کربن آلی و  $S_n$ : برابر با  $(1 - S_a/100)$  می‌باشد.

با استفاده از روابط یادشده و سه عامل درصد ماده آلی، درصد رس، سیلت و ماسه، فاکتورهای فرسایش‌پذیری خاک در قالب محاسبه عامل  $K$  و شاخص  $SEI$  برای نمونه‌های مطالعاتی برآورد گردید. علاوه‌براین، فاکتور

جدول ۱- آمار توصیفی پایگاه داده پارامترهای فرسایش پذیری خاک، فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی

| پارامتر         | دامنه  | حداقل | حداکثر | میانگین | انحراف معیار | واریانس  | چولگی  | کشیدگی |
|-----------------|--------|-------|--------|---------|--------------|----------|--------|--------|
| رس (درصد)       | ۴۶     | ۳۳    | ۶۹     | ۴۷/۸۴   | ۱۵/۳۸        | ۲۳۶/۶۶   | -۰/۶۵  | -۱/۱۳  |
| سیلت (درصد)     | ۸      | ۲۶    | ۳۴     | ۳۰/۷    | ۲/۳۱         | ۵/۳۷     | -۰/۱۲۵ | -۰/۸۸  |
| ماسه (درصد)     | ۳۸     | ۵     | ۴۳     | ۲۱/۴۶   | ۱۳/۳         | ۱۷۷/۱۵   | ۰/۷۳   | -۱/۱۳  |
| کربن آلی (درصد) | ۱/۴    | ۰     | ۱/۴    | ۰/۷۳    | ۰/۴۴         | ۰/۱۹     | ۰/۰۷   | -۰/۸۸  |
| ماده آلی (درصد) | ۲/۴۴   | ۰     | ۲/۴۴   | ۱/۲۷    | ۰/۷۶         | ۰/۵۸     | ۰/۰۷   | -۰/۸۸  |
| ارتفاع (متر)    | ۱۴۱۷   | ۷۰۰   | ۲۱۱۷   | ۹۴۲/۴۹  | ۲۲۰/۶۲       | ۴۸۶۷۴/۶۲ | ۱/۵۷   | ۲/۹۱   |
| شیب (درصد)      | ۱۲۷/۸۴ | ۰     | ۱۲۷/۸۴ | ۶/۷     | ۱۱/۸۲        | ۱۳۹/۸۸   | ۳/۵۳   | ۱۵/۵   |
| جهت شیب (درجه)  | ۳۶۰/۷  | -۱    | ۳۵۹/۷  | ۱۴۸/۸   | ۱۰۲/۷۵       | ۱۰۵۵۸/۹۹ | ۰/۴۷۲  | -۰/۷۸۲ |
| شاخص NDVI       | ۰/۱۴۹  | ۰     | ۰/۱۴۹  | ۰/۰۷۴   | ۰/۰۲۴        | ۰/۰۰۱    | -۰/۱۶۱ | -۰/۵۱۳ |
| عامل K          | ۰/۰۴   | ۰/۰۳  | ۰/۰۷   | ۰/۰۴    | ۰/۰۱۲        | ۰        | ۰/۶۱   | -۱/۰۹  |
| شاخص SEI        | ۰/۰۲   | ۰/۰۳  | ۰/۰۵   | ۰/۰۳    | ۰/۰۰۴۴       | ۰        | -۰/۱۱  | -۰/۴۸  |

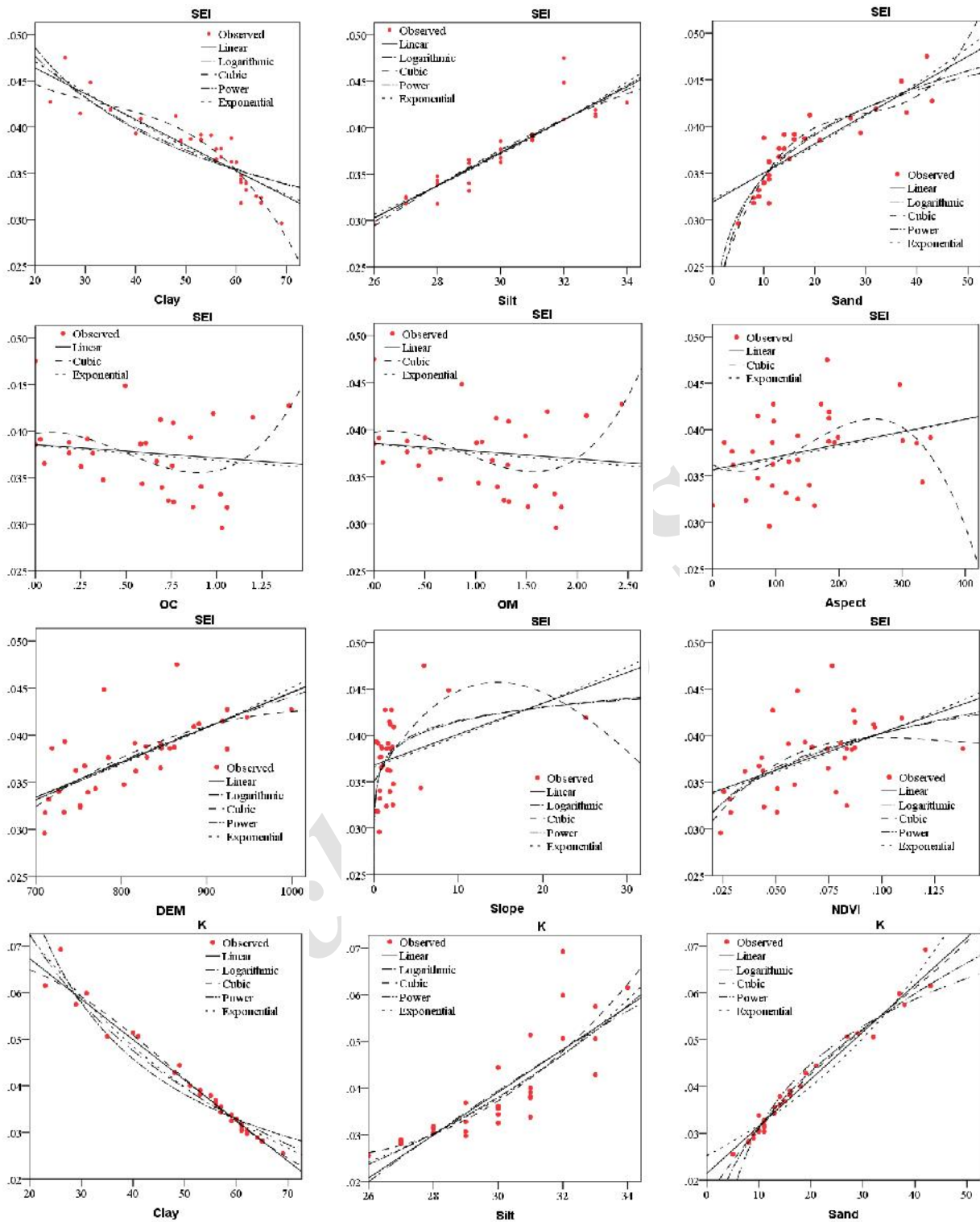
مناسب با ضریب همبستگی بالا و برای متغیرهای مستقل به صورت چندتایی، یک مدل غیرخطی به روش یکجا (Enter) ارائه شد.

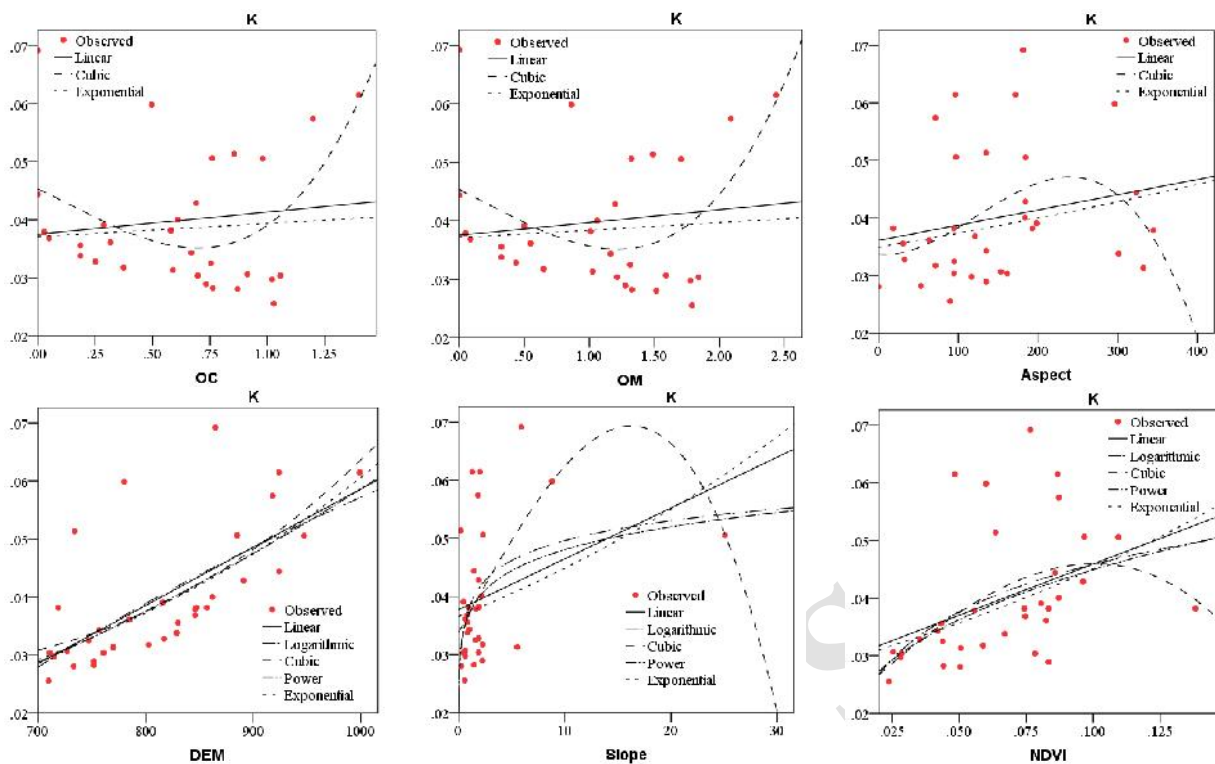
### نتایج

در این پژوهش انواع روش‌های رگرسیون ساده خطی و غیرخطی و رگرسیون چند متغیره برای مدل‌سازی فرسایش‌پذیری خاک منطقه خور و بیابانک آزمون گردید و از میان آنها روابطی با ارزش رجحانی بالاتر انتخاب شد. نتایج حاصل از رابطه‌سنجی تک‌متغیره فرسایش‌پذیری بر مبنای مؤلفه‌های فیزیکی خاک، شاخص‌های ناهمواری و پوشش گیاهی در شکل ۳ ارائه شده است. این نتایج حکایت از ارتباط قوی بین شاخص SEI و فاکتور K با مؤلفه‌های مختلف عناصر فیزیکی خاک و همچنین عوامل فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی داشته و نمایانگر حداکثر ارتباط معنی‌دار این عوامل با یکدیگر در سطح معنی‌داری ۹۹ درصد بود، به طوری که بهترین روابط از توابع خطی و مکعبی تبعیت می‌کنند (شکل ۳).

روش مدل‌سازی به کمک تحلیل‌های آماری در محیط نرم‌افزار SPSS و با استفاده از تکنیک آنالیز رگرسیون انجام شد. بدین منظور ابتدا روش‌های رگرسیون ساده خطی و غیرخطی (توانی، نمایی، لگاریتمی، مکعبی و ...) بین مؤلفه‌های مزبور آزمون شد و از بین آنها، روابطی با ارزش رجحانی بالاتر انتخاب گردید. سپس روش‌های رگرسیون غیرخطی چندگانه برای کشف مدل‌های مناسب برآورد فرسایش‌پذیری به کار گرفته شد و با استفاده از پارامترهای سنجش مدل، مناسب‌ترین مدل‌ها شناسایی گردید. در نهایت با مقایسه میزان اعتبار آنها، صحت مدل‌های مناسب بر اساس ارزش رجحانی تعیین شد. معیار ارزش رجحانی سنجش و انتخاب روابط بر اساس پارامترهای حداکثر ضریب همبستگی (R)، ضریب تبیین (R Square)، ضریب تبیین تعدیل‌شده (Adjusted R Square) و سطح معنی‌داری (Sig) و حداقل انحراف معیار خطای برآورد (STD Error of Estimate) در سطح احتمال خطای کمتر یا مساوی یک درصد ( $\alpha \leq 0/01$ ) می‌باشد. در نهایت برای تمامی متغیرهای مستقل به صورت مجزا یک رابطه تک‌متغیره







شکل ۳- نتایج رابطه سنجی بین مؤلفه‌های SEI و K با عناصر فیزیکی خاک، عوامل فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی

و ۸۳٪ تغییرات شاخص SEI به ترتیب توسط مؤلفه‌های رس، سیلت و ماسه کنترل می‌شود. همچنین در روابط فاکتور K نیز بیشترین رابطه معنی‌دار بین K با عنصر رس، سیلت و ماسه در قالب رابطه خطی، به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۸۱، ۰/۸۶۶ و ۰/۹۸۴ در سطح معنی‌داری ۹۹٪ وجود دارد، بدین معنی که ۹۸/۱٪، ۸۶/۶٪ و ۹۸/۴٪ تغییرات فاکتور K به ترتیب توسط مؤلفه‌های رس، سیلت و ماسه کنترل می‌شود.

خلاصه روابط و ضرایب آماری به دست آمده از تحلیل ارتباطات بین مؤلفه‌های SEI و K با عناصر مختلف رس، سیلت، ماسه، کربن آلی، ماده آلی، شیب، جهت شیب، ارتفاع و پوشش گیاهی در محدوده مطالعاتی به صورت جدول (۲) می‌باشد. طبق این نتایج بیشترین رابطه معنی‌دار بین SEI با عنصر رس، سیلت و ماسه به صورت رابطه خطی، به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۸۴۷، ۰/۸۶۸ و ۰/۸۳۰، در سطح معنی‌داری ۹۹٪ وجود دارد، بدین معنی که ۸۴/۷٪، ۸۶/۸٪



جدول ۲- روابط و ضرایب حاصل از رابطه‌سنجی بین مؤلفه‌های SEI و K با عناصر فیزیکی خاک، عوامل فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی

| متغیر وابسته | متغیر مستقل | نوع رابطه | ضریب همبستگی | ضریب تبیین | ضریب تبیین تعدیل‌شده | انحراف معیار خطای برآورد | سطح معنی‌داری |
|--------------|-------------|-----------|--------------|------------|----------------------|--------------------------|---------------|
| شاخص SEI     | رس          | خطی       | ۰/۹۲۰        | ۰/۸۴۷      | ۰/۸۴۷                | ۰/۰۰۱                    | ۰/۰۰۰         |
|              | سیلت        | خطی       | ۰/۹۳۲        | ۰/۸۶۸      | ۰/۸۶۸                | ۰/۰۰۱                    | ۰/۰۰۰         |
|              | ماسه        | خطی       | ۰/۹۱۱        | ۰/۸۳۰      | ۰/۸۳۰                | ۰/۰۰۱                    | ۰/۰۰۰         |
|              | کربن آلی    | مکعبی     | ۰/۴۷۸        | ۰/۲۲۸      | ۰/۲۲۸                | ۰/۰۰۳                    | ۰/۰۰۰         |
|              | ماده آلی    | مکعبی     | ۰/۴۷۸        | ۰/۲۲۹      | ۰/۲۲۸                | ۰/۰۰۳                    | ۰/۰۰۰         |
|              | جهت شیب     | خطی       | ۰/۰۸۸        | ۰/۰۰۸      | ۰/۰۰۸                | ۰/۰۰۳                    | ۰/۰۰۰         |
|              | ارتفاع      | مکعبی     | ۰/۷۶۵        | ۰/۵۸۶      | ۰/۵۸۶                | ۰/۰۰۲                    | ۰/۰۰۰         |
|              | شیب         | مکعبی     | ۰/۴۴۲        | ۰/۱۹۶      | ۰/۱۹۶                | ۰/۰۰۳                    | ۰/۰۰۰         |
|              | پوشش گیاهی  | خطی       | ۰/۶۴۶        | ۰/۴۱۷      | ۰/۴۱۷                | ۰/۰۰۳                    | ۰/۰۰۰         |
|              | رس          | خطی       | ۰/۹۹۱        | ۰/۹۸۱      | ۰/۹۸۱                | ۰/۰۰۲                    | ۰/۰۰۰         |
| فاکتور K     | سیلت        | خطی       | ۰/۹۳۰        | ۰/۸۶۶      | ۰/۸۶۶                | ۰/۰۰۴                    | ۰/۰۰۰         |
|              | ماسه        | خطی       | ۰/۹۹۲        | ۰/۹۸۴      | ۰/۹۸۴                | ۰/۰۰۱                    | ۰/۰۰۰         |
|              | کربن آلی    | مکعبی     | ۰/۶۶۴        | ۰/۴۴۱      | ۰/۴۴۱                | ۰/۰۰۹                    | ۰/۰۰۰         |
|              | ماده آلی    | مکعبی     | ۰/۶۶۵        | ۰/۴۴۲      | ۰/۴۴۲                | ۰/۰۰۹                    | ۰/۰۰۰         |
|              | جهت شیب     | مکعبی     | ۰/۳۳۰        | ۰/۱۰۹      | ۰/۱۰۹                | ۰/۰۱۱                    | ۰/۰۰۰         |
|              | ارتفاع      | مکعبی     | ۰/۷۶۱        | ۰/۵۸۰      | ۰/۵۸۰                | ۰/۰۰۷                    | ۰/۰۰۰         |
|              | شیب         | مکعبی     | ۰/۴۸۸        | ۰/۲۳۸      | ۰/۲۳۸                | ۰/۰۱۰                    | ۰/۰۰۰         |
|              | پوشش گیاهی  | خطی       | ۰/۶۱۸        | ۰/۳۸۲      | ۰/۳۸۲                | ۰/۰۰۹                    | ۰/۰۰۰         |

و ضرایب روابط کشف‌شده بین مؤلفه‌های SEI و K با عناصر فیزیکی خاک، عوامل فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی و همچنین انحراف معیار، مقدار t و سطح معنی‌داری ضرایب مزبور در جدول ۳ گزارش شده است.

بر اساس شکل کلی معادلات خطی و مکعبی، برای ارائه مدل خطی پارامترهای عرض از مبدأ و شیب خط (رابطه ۴)، و برای ارائه مدل مکعبی مؤلفه‌های مقدار ثابت، ضریب و توان معادله (رابطه ۵) مورد نیاز است. نتایج این معادلات

$$Y = b_0 + b_1 X \tag{۴} \text{ رابطه}$$

$$Y = b_0 + b_1 X^{b_2} + b_3 X^{b_4} + b_5 X^{b_6} \tag{۵} \text{ رابطه}$$

در رابطه ۴  $b_0$ : مقدار ثابت و  $b_1$ : شیب خط و در رابطه  $b_2, b_4, b_6$ : ضریب و  $b_3, b_5$ : ضریب ثابت،  $b_0$  (۵) مقدار ثابت،  $b_1, b_3, b_5$ : ضریب و  $b_2, b_4, b_6$ : توان رابطه می‌باشد.

جدول ۳- ضرایب روابط موجود بین مؤلفه‌های فرسایش‌پذیری  $K$  و  $SEI$  با عناصر فیزیکی خاک، عوامل فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی

| متغیر وابسته | متغیر مستقل | نوع رابطه | ضرایب رابطه | مقدار ضرایب | خطای استاندارد | بتا     | مقدار $t$ | سطح معنی‌داری |        |
|--------------|-------------|-----------|-------------|-------------|----------------|---------|-----------|---------------|--------|
| شاخص $SEI$   | رس          | خطی       | شیب         | -۰/۰۰۰۲۲    | ۰/۰۰۰          | -۹/۲۰   | -۲۸۹/۸۲۴  | ۰/۰۰۰         |        |
|              | سیلت        | خطی       | مقدار ثابت  | ۰/۰۰۲       | ۰/۰۰۰          | ---     | ۱۳۸۷/۹۴۶  | ۰/۰۰۰         |        |
|              | ماسه        | خطی       | شیب         | -۰/۰۱       | ۰/۰۰۰          | ---     | ۳۱۵/۹۸۱   | ۰/۰۰۰         |        |
|              | کربن آلی    | ماده آلی  | مکعبی       | شیب         | ۰/۰۰۰۲۵۳       | ۰/۰۰۰   | ۰/۹۱۱     | ۲۷۲/۱۲۲       | ۰/۰۰۰  |
|              |             |           |             | مقدار ثابت  | ۰/۰۳۳          | ۰/۰۰۰   | ---       | ۱۲۷۰/۲۴۸      | ۰/۰۰۰  |
|              |             |           |             | ضریب یک     | ۰/۰۳۲          | ۰/۰۰۲   | ۲/۳۶۸     | ۱۵/۸۲۳        | ۰/۰۰۰  |
|              |             |           |             | ضریب دو     | -۰/۰۵۳         | ۰/۰۰۳   | -۶/۲۰۰    | -۱۸/۴۹۱       | ۰/۰۰۰  |
|              | فاکتور $K$  | جهت شیب   | خطی         | شیب         | ۳/۰۰۹E-۰۰۶     | ۰/۰۰۰   | ۰/۰۸۸     | ۱۰/۹۱۰        | ۰/۰۰۰  |
|              |             | ارتفاع    | مکعبی       | مقدار ثابت  | ۰/۰۳۲          | ۰/۰۰۰   | ---       | ۷۷/۶۰۳        | ۰/۰۰۰  |
|              |             |           |             |             | ضریب یک        | ۰/۰۱۸   | ۰/۰۰۱     | ۲/۳۶۲         | ۱۵/۷۸۲ |
|              |             |           |             | ضریب دو     | -۰/۰۱۸         | ۰/۰۰۱   | -۶/۱۸۷    | -۱۸/۴۵۱       | ۰/۰۰۰  |
|              |             |           |             | ضریب سه     | ۰/۰۰۵          | ۰/۰۰۰   | ۴/۳۳۳     | ۲۲/۴۴۰        | ۰/۰۰۰  |
| پوشش گیاهی   |             | مکعبی     | مقدار ثابت  | ۰/۰۳۲       | ۰/۰۰۰          | ---     | ---       | ۷۷/۶۰۳        | ۰/۰۰۰  |
|              |             |           |             | ضریب دو     | -۱/۱۵۸E-۰۰۷    | ۰/۰۰۰   | -۱۶/۴۳۷   | ---           | ۰/۰۰۰  |
|              |             |           |             | ضریب سه     | ۲/۷۲۹E-۰۱۱     | ۰/۰۰۰   | ۷/۰۷۱     | ---           | ۰/۰۰۰  |
|              |             |           |             | مقدار ثابت  | -۰/۰۳۱         | ۰/۰۰۱   | ---       | -۲۷/۹۰۳       | ۰/۰۰۰  |
|              |             |           |             | ضریب یک     | ۰/۰۰۰۲۴۵       | ۰/۰۰۰   | ۱/۴۴۵     | ۵۰/۷۶۰        | ۰/۰۰۰  |
|              |             |           | ضریب دو     | -۹/۶۸۴E-۰۰۶ | ۰/۰۰۰          | -۲/۰۶۸  | -۳۶/۶۳۳   | ۰/۰۰۰         |        |
| پوشش گیاهی   | مکعبی       | ضریب سه   | ۵/۷۱۱E-۰۰۸  | ۰/۰۰۰       | ۱/۰۲۳          | ---     | ---       | ۰/۰۰۰         |        |
|              |             |           | مقدار ثابت  | ۰/۰۳۸       | ۰/۰۰۰          | ---     | ۱۰۱۸/۰۱۶  | ۰/۰۰۰         |        |
|              |             |           | شیب         | ۰/۰۹۳       | ۰/۰۰۱          | ۰/۶۴۶   | ۱۰۳/۷۳۵   | ۰/۰۰۰         |        |
|              |             |           | مقدار ثابت  | ۰/۰۳۲       | ۰/۰۰۰          | ۴۵۷/۳۱۰ | ۰/۰۰۰     | ---           |        |
| فاکتور $K$   | رس          | خطی       | شیب         | -۰/۰۰۱      | ۰/۰۰۰          | -۰/۹۹۱  | -۸۸۹/۸۷۲  | ۰/۰۰۰         |        |
|              |             |           | مقدار ثابت  | ۰/۰۷۹       | ۰/۰۰۰          | ---     | ۱۹۷۲/۲۵۲  | ۰/۰۰۰         |        |

| متغیر وابسته | متغیر مستقل | نوع رابطه  | ضرایب رابطه | مقدار ضرایب | خطای استاندارد | بتا      | مقدار t | سطح معنی‌داری |
|--------------|-------------|------------|-------------|-------------|----------------|----------|---------|---------------|
| سیلت         | خطی         | شیب        | ۰/۰۰۵       | ۰/۰۰۰       | ۰/۹۳۰          | ۳۱۲/۲۱۷  | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | مقدار ثابت | -۰/۱۱۶      | ۰/۰۰۱       | ---            | -۲۳۳/۰۳۸ | ۰/۰۰۰   |               |
| ماسه         | خطی         | شیب        | ۰/۰۰۱       | ۰/۰۰۰       | ۰/۹۹۲          | ۹۵۶/۵۵۸  | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | مقدار ثابت | ۰/۰۲۳       | ۰/۰۰۰       | ---            | ۸۸۳/۲۷۵  | ۰/۰۰۰   |               |
| کربن آلی     | مکعبی       | ضریب یک    | ۰/۰۶۱       | ۰/۰۰۶       | ۱/۴۰۵          | ۱۱/۰۳۴   | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | ضریب دو    | -۰/۱۰۴      | ۰/۰۰۸       | -۳/۶۸۲         | -۱۲/۹۰۴  | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | ضریب سه    | -۰/۰۶۵      | ۰/۰۰۴       | ۲/۹۷۱          | ۱۸/۰۸۳   | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | مقدار ثابت | ۰/۰۲۷       | ۰/۰۰۱       | ---            | ۲۳/۰۸۹   | ۰/۰۰۰   |               |
| ماده آلی     | مکعبی       | ضریب یک    | ۰/۰۳۵       | ۰/۰۰۳       | ۱/۳۹۹          | ۱۰/۹۹۳   | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | ضریب دو    | -۰/۰۳۴      | ۰/۰۰۳       | -۳/۶۷۰         | -۱۲/۸۶۴  | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | ضریب سه    | ۰/۰۱۲       | ۰/۰۰۱       | ۲/۹۶۵          | ۱۸/۰۴۶   | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | مقدار ثابت | ۰/۰۲۷       | ۰/۰۰۱       | ---            | ۲۳/۱۲۹   | ۰/۰۰۰   |               |
| جهت شیب      | مکعبی       | ضریب دو    | -۱/۲۷۳E-۰۰۷ | ۰/۰۰۰       | -۰/۴۱۳         | -۲/۳۹۲   | ۰/۰۱۷   |               |
|              |             | ضریب سه    | -۴/۱۲۸E-۰۱۰ | ۰/۰۰۰       | -۰/۴۵۹         | ---      | ---     |               |
| ارتفاع       | مکعبی       | مقدار ثابت | ۰/۰۳۸       | ---         | ---            | ۱۳۷/۳۹۲  | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | ضریب یک    | ۰/۰۰۰۲۴۸    | ۰/۰۰۰       | ۴/۷۶۶          | ۲۴/۶۲۰   | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | ضریب دو    | -۱/۴۰۵E-۰۰۷ | ۰/۰۰۰       | -۶/۱۰۵         | ---      | ---     |               |
|              |             | ضریب سه    | ۲/۵۸۵E-۰۱۱  | ۰/۰۰۰       | ۲/۰۵۱          | ---      | ---     |               |
| شیب          | مکعبی       | مقدار ثابت | -۰/۰۸۲      | ۰/۰۰۴       | ---            | -۲۲/۲۲۶  | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | ضریب یک    | ۰/۰۰۱       | ۰/۰۰۰       | ۱/۵۱۹          | ۵۴/۸۱۶   | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | ضریب دو    | -۳/۱۷۷E-۰۰۵ | ۰/۰۰۰       | -۲/۰۷۸         | -۳۷/۸۱۲  | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | ضریب سه    | ۱/۸۳۳E-۰۰۷  | ۰/۰۰۰       | ۱/۰۰۶          | ---      | ۰/۰۰۰   |               |
| پوشش گیاهی   | خطی         | شیب        | ۰/۲۹۰       | ۰/۰۰۳       | ۰/۶۱۸          | ۹۶/۴۱۰   | ۰/۰۰۰   |               |
|              |             | مقدار ثابت | ۰/۰۲۴       | ۰/۰۰۰       | ---            | ۱۰۰/۴۹۹  | ۰/۰۰۰   |               |

می‌باشد، که با توجه به آماره‌های ارزش رجحانی مدل‌های مذکور برای محاسبه میزان فرسایش‌پذیری براساس روابط ارائه شده مناسب‌ترین مدل‌های تک‌متغیره برای برآورد عامل SEI روابط ۶، ۷ و ۸ به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۸۴۷، ۰/۸۶۸، ۰/۸۳۰ و مناسب‌ترین مدل تک‌متغیره

با توجه به جدول‌های ۲ و ۳، خلاصه مناسبترین مدل‌های به‌دست‌آمده از تحلیل‌های آماری ساده تک‌متغیره بین مؤلفه‌های SEI و K با عناصر رس، سیلت، ماسه، درصد کربن آلی، درصد ماده آلی و پارامترهای جهت شیب، ارتفاع، شیب و پوشش گیاهی به صورت روابط ۶ تا ۱۱

- برآورد عامل K روابط ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب با ضریب تبیین  
 رابطه (۶)  $SEI = 0.049 - 0.00022 C$
- رابطه (۷)  $SEI = 0.01 - 0.002 Si$
- رابطه (۸)  $SEI = 0.033 - 0.000253 Sa$
- رابطه (۹)  $K = 0.079 - 0.001 C$
- رابطه (۱۰)  $K = -0.116 + 0.005 Si$
- رابطه (۱۱)  $K = -0.023 + 0.001 Sa$

نیز به صورت مجموع تمامی متغیرهای مزبور مورد سنجش قرار گرفت. همان‌گونه که در جدول ۴ دیده می‌شود، نتایج رگرسیون چندگانه، حکایت از وجود روابط معنی‌دار گروه‌های متعدد با ضرایب تبیین بالا دارد، به طوری که رابطه مؤلفه‌های SEI و K با مجموعه‌های گروهی تمامی متغیرهای فیزیکی خاک، فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی بالاترین ضرایب تبیین به ترتیب با مقادیر ۰/۹۵۹ و ۰/۹۹۲ را در سطح معنی‌داری ۹۹ درصد نشان می‌دهد. این در حالی است که سایر روابط نیز معنی‌دار بوده و ضرایب تبیین قابل قبول (۰/۷)  $R^2$  را ارائه می‌دهند. البته مؤلفه کرین آلی نیز به علت عدم تأثیر در فاکتورهای K و SEI از معادلات خارج شده است.

در این روابط C: درصد رس، Si: درصد سیلت، Sa: درصد ماسه، OM: درصد ماده آلی، As: آزیموت جهت شیب، EI: ارتفاع به متر، SI: درصد شیب و V: شاخص پوشش گیاهی (مقدار NDVI) می‌باشد.

در این پژوهش علاوه بر روابط تک‌متغیره بین متغیرهای مزبور، برای مدل‌سازی گروهی از روابط چندگانه و روش رگرسیون چند متغیره به روش یکجا نیز استفاده شد. برای این منظور گشتاور متغیری ایجاد کرده و به صورت گروهی، شاخص‌های فرسایش‌پذیری خاک شامل SEI و K یکبار با گروه متغیرهای فیزیکی خاک مانند رس، ماسه، سیلت و ماده آلی، یکبار با متغیرهای فیزیونومی زمین شامل شیب، جهت شیب، ارتفاع و پوشش گیاهی (NDVI) و یک مرتبه

جدول ۴- نتایج رگرسیون چندگانه به روش یکجا بین مؤلفه‌های K و SEI با عناصر فیزیکی، فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی

| متغیر وابسته | متغیرهای مستقل  | ضریب همبستگی | ضریب تبیین | ضریب تعدیل‌شده | انحراف معیار | سطح معنی‌داری |
|--------------|---|--------------|------------|----------------|--------------|---------------|
| شاخص SEI     | رس، ماسه، سیلت، ماده آلی                              | ۰/۹۷۷        | ۰/۹۵۴      | ۰/۹۵۴          | ۰/۰۰۰۷۵۰۹    | ۰/۰۰۰         |
|              | شیب، جهت شیب، ارتفاع، پوشش گیاهی                      | ۰/۷۲۰        | ۰/۵۱۸      | ۰/۵۱۸          | ۰/۰۰۲۴۳۹۳    | ۰/۰۰۰         |
| فاکتور K     | رس، ماسه، سیلت، ماده آلی، جهت شیب، ارتفاع، پوشش گیاهی | ۰/۹۸۰        | ۰/۹۵۹      | ۰/۹۵۹          | ۰/۰۰۰۷۰۷۵    | ۰/۰۰۰         |
|              | رس، ماسه، سیلت، ماده آلی                              | ۰/۹۹۶        | ۰/۹۹۱      | ۰/۹۹۱          | ۰/۰۰۱۰۷۶۸    | ۰/۰۰۰         |
| متغیر وابسته | شیب، جهت شیب، ارتفاع، پوشش گیاهی                      | ۰/۷۴۱        | ۰/۵۴۹      | ۰/۵۴۹          | ۰/۰۰۷۶۹۵۱    | ۰/۰۰۰         |
|              | رس، ماسه، سیلت، ماده آلی، جهت شیب، ارتفاع، پوشش گیاهی | ۰/۹۹۶        | ۰/۹۹۲      | ۰/۹۹۲          | ۰/۰۰۱۰۳۸۴    | ۰/۰۰۰         |

برای تمامی متغیرهای مستقل به جز شیب و جهت شیب دارد. در این روابط جهت شیب معنی‌دار نبوده و شیب نیز در سطح ۹۰ درصد معنی‌دار است.

نتایج حاصل از ضرایب روابط چندگانه بین شاخص‌های فرسایش‌پذیری SEI و K با عناصر فیزیکی، فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی به صورت جدول ۵ می‌باشد. نتایج حکایت از معنی‌داری ضرایب مزبور در سطح ۹۹ درصد

جدول ۵- ضرایب روابط چندگانه بین شاخص‌های SEI و K با عناصر فیزیکی، فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی

| متغیر وابسته | شماره گروه | متغیر مستقل | ضرایب غیراستاندارد |                | ضرایب استاندارد | مقدار t  | معنی‌داری |
|--------------|------------|-------------|--------------------|----------------|-----------------|----------|-----------|
|              |            |             | مقدار B            | خطای استاندارد |                 |          |           |
| شاخص SEI     | گروه اول   | ثابت        | -۰/۰۱۳             | ۰/۰۰۱          | ۰/۰۰۰           | -۹/۵۲۷   | ۰/۰۰۰     |
|              |            | رس          | ۰/۰۰۰              | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۱۷/۶۲۸   | ۰/۰۰۰     |
|              |            | سیلت        | ۰/۰۰۱              | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۷۰/۲۸۵   | ۰/۰۰۰     |
|              | گروه دوم   | ماسه        | ۰/۰۰۰              | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۳۱/۱۱۸   | ۰/۰۰۰     |
|              |            | ماده آلی    | -۰/۰۰۳             | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | -۱۴۶/۴۸۵ | ۰/۰۰۰     |
|              |            | ثابت        | ۰/۰۲۸              | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۲۵۶/۶۷۷  | ۰/۰۰۰     |
|              |            | جهت شیب     | -۴/۲۶۴E-۰۰۸        | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | -۰/۲۱۸   | ۰/۸۲۷     |
|              |            | ارتفاع      | ۷/۶۰۱E-۰۰۶         | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۵۳/۰۹۶   | ۰/۰۰۰     |
|              |            | شیب         | -۴/۲۲۹E-۰۰۵        | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | -۱۸/۶۰۳  | ۰/۰۰۰     |
|              |            | پوشش گیاهی  | ۰/۰۵۹              | ۰/۰۰۱          | ۰/۰۰۰           | ۵۷/۴۸۷   | ۰/۰۰۰     |
| گروه سوم     | ثابت       | ضریب ثابت   | -۰/۰۱۰             | ۰/۰۰۱          | ۰/۰۰۰           | -۷/۲۴۰   | ۰/۰۰۰     |
|              |            | جهت شیب     | -۵/۴۸۷E-۰۰۸        | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | -۰/۹۶۸   | ۰/۳۳۳     |
|              | گروه اول   | ارتفاع      | -۱/۶۶۲E-۰۰۶        | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | -۳۳/۵۳۱  | ۰/۰۰۰     |
|              |            | شیب         | -۱/۲۳۱E-۰۰۶        | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | -۱/۸۳۷   | ۰/۰۶۶     |
|              |            | پوشش گیاهی  | ۰/۰۰۴              | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۱۰/۳۵۵   | ۰/۰۰۰     |
|              |            | رس          | ۰/۰۰۰              | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۱۴/۹۳۲   | ۰/۰۰۰     |
|              |            | سیلت        | ۰/۰۰۱              | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۷۰/۹۹۷   | ۰/۰۰۰     |
|              |            | ماسه        | ۰/۰۰۰              | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۲۸/۸۹۷   | ۰/۰۰۰     |
|              |            | ماده آلی    | -۰/۰۰۳             | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | -۱۴۵/۶۵۵ | ۰/۰۰۰     |
|              |            | ثابت        | -۰/۰۷۸             | ۰/۰۰۲          | ۰/۰۰۰           | -۳۹/۵۰۶  | ۰/۰۰۰     |
| گروه اول     | گروه اول   | رس          | ۰/۰۰۱              | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۴۷/۱۶۵   | ۰/۰۰۰     |
|              |            | سیلت        | ۰/۰۰۱              | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۵۸/۴۲۵   | ۰/۰۰۰     |
|              |            | ماسه        | ۰/۰۰۲              | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۹۲/۷۷۱   | ۰/۰۰۰     |
|              | گروه دوم   | ماده آلی    | -۰/۰۰۲             | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | -۸۴/۲۱۸  | ۰/۰۰۰     |
|              |            | ثابت        | ۰/۰۰۶              | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۱۸/۹۷۳   | ۰/۰۰۰     |
|              |            | جهت شیب     | ۶/۸۸۹E-۰۰۸         | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۰/۱۱۲    | ۰/۹۱۱     |
|              |            | ارتفاع      | ۳/۰۷۰E-۰۰۵         | ۰/۰۰۰          | ۰/۰۰۰           | ۶۷/۹۷۹   | ۰/۰۰۰     |

| متغیر وابسته | شماره گروه | متغیر مستقل | ضرایب غیراستاندارد |                | مقدار t | معنی داری |
|--------------|------------|-------------|--------------------|----------------|---------|-----------|
|              |            |             | مقدار B            | خطای استاندارد |         |           |
|              |            |             | بتا                |                |         |           |
| شیب          | گروه سوم   |             | ۰/۰۰۰              | ۰/۰۰۰          | -۱۷/۷۰۵ | ۰/۰۰۰     |
| پوشش گیاهی   |            |             | ۰/۱۴۵              | ۰/۰۰۳          | ۴۴/۸۹۵  | ۰/۰۰۰     |
| ثابت         |            |             | -۰/۰۸۳             | ۰/۰۰۲          | -۴۱/۱۵۷ | ۰/۰۰۰     |
| جهت شیب      |            |             | ۴/۴۰۷E-۰۰۷         | ۰/۰۰۰          | ۵/۲۹۷   | ۰/۰۰۰     |
| ارتفاع       |            |             | -۱/۸۶۲E-۰۰۶        | ۰/۰۰۰          | -۲۵/۶۰۰ | ۰/۰۰۰     |
| شیب          |            |             | ۲/۵۰۳E-۰۰۶         | ۰/۰۰۰          | ۲/۵۴۵   | ۰/۰۱۱     |
| پوشش گیاهی   |            |             | -۰/۰۰۳             | ۰/۰۰۱          | -۴/۹۹۰  | ۰/۰۰۰     |
| رس           |            |             | ۰/۰۰۱              | ۰/۰۰۰          | ۴۸/۲۷۸  | ۰/۰۰۰     |
| سیلت         |            |             | ۰/۰۰۱              | ۰/۰۰۰          | ۶۲/۰۴۳  | ۰/۰۰۰     |
| ماسه         |            |             | ۰/۰۰۲              | ۰/۰۰۰          | ۹۳/۲۲۷  | ۰/۰۰۰     |
| ماده آلی     |            | -۰/۰۰۲      | ۰/۰۰۰              | -۸۴/۵۳۲        | ۰/۰۰۰   |           |

بین مدل‌های چند متغیره برای برآورد عامل SEI رابطه ۱۴ با ضریب تبیین ۰/۹۵۹ و خطای برآورد ۰/۰۰۰۷ و برای برآورد عامل K رابطه ۱۷ با ضریب تبیین ۰/۹۹۲ و خطای برآورد ۰/۰۰۱ در سطح معنی داری ۹۹ درصد مناسب‌ترین مدل‌ها می‌باشد.

نتایج مدل‌سازی حاصل از تحلیل‌های آماری چند متغیره بین مؤلفه‌های SEI و K با عناصر رس، سیلت، ماسه، درصد کربن آلی، درصد ماده آلی و پارامترهای جهت شیب، ارتفاع، شیب و پوشش گیاهی نیز در روابط ۱۲ تا ۱۷ گزارش شده است. بنابراین برای محاسبه فرسایش‌پذیری از

$$SEI = 0.013 - 0.000238 C + 0.001 Si + 0.000423 Sa - 0.003 OM \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$SEI = 0.028 - 4.264 E - 0.008 As + 7.601 E - 0.006 EI - 4.229 E - 0.005 SI + 0.059 V \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$SEI = 0.010 + 0.000238 C + 0.001 Si + 0.00423 Sa - 0.003 OM - 5.478 E - 0.008 As - 1.662 E - 0.006 EI - 1.231 E - 0.006 SI + 0.004 V \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$K = -0.078 + 0.001 C + 0.001 Si + 0.002 Sa - 0.002 OM \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$K = 0.006 + 6.889 E - 0.008 As + 3.070 E - 0.005 EI - 4.229 E - 0.005 SI + 0.145 V \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$\text{رابطه (۱۷)}$$

$$K = -0.083 + 0.001 C + 0.001 Si + 0.002 Sa - 0.002 OM + 4.407 E - 0.007 As - 1.862 E - 0.006 EI + 2.503 E - 0.006 SI - 0.003 V$$

ارتفاع به متر، Si: درصد شیب و V: پوشش گیاهی (مقدار NDVI) می‌باشد.

در این روابط C: درصد رس، Si: درصد سیلت، Sa: درصد ماسه، OM: درصد ماده آلی، As: جهت شیب، EI:



## بحث

نتایج این پژوهش برآورد نسبتاً دقیق و ساده مؤلفه‌های فرسایش‌پذیری خاک را از طریق روابط آماری امکان‌پذیر می‌سازد. نتایج حاصل از رابطه‌سنجی بین مؤلفه‌های SEI و K با عناصر فیزیکی خاک، عوامل فیزیونومی و پوشش گیاهی نشان داد که بالاترین ضریب تبیین بین مؤلفه فرسایش‌پذیری SEI و K بصورت یک رابطه خطی ساده با عناصر رس، سیلت و ماسه می‌باشد که این امر بدلیل تأثیر مستقیم این عناصر در بافت خاک و میزان حساسیت آنها نسبت به فرسایش‌پذیری و عوامل فرسایش‌زا می‌باشد. این یافته با نتایج پژوهش‌های Charman و Murphy (۲۰۰۰) و Zang و همکاران (۲۰۰۴) هماهنگی دارد. رس با وجود افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه، به دلیل کاهش نفوذپذیری موجب کاهش فرسایش‌پذیری خاک می‌شود. رابطه مقادیر ماسه و عامل K و SEI نیز رابطه مثبت و معنی‌داری است که این یافته با نتایج Santos و همکاران (۲۰۰۳) و نیز Vaezi و همکاران (۲۰۰۸) همخوانی دارد. بین میزان سیلت نیز با عامل K و SEI همبستگی مثبت و معنی‌دار وجود دارد، که اثر آن بر افزایش فرسایش‌پذیری با نتایج Vaezi و همکاران (۲۰۰۸) و Ghasemi و همکاران (۲۰۰۳) منطبق است. همچنین کمترین ضریب تبیین بین شاخص SEI و عامل جهت شیب وجود دارد که نشان‌دهنده حداقل ارتباط عوامل فرسایش‌پذیری خاک با این مؤلفه است. این فاکتور بستگی به جهت دامنه دارد. بدین معنی که شیب‌های آفتاب‌گیر معمولاً نسبت به شیب‌های سایه‌گیر فرسایش بیشتری ایجاد می‌کنند، زیرا شیب‌های آفتاب‌گیر نسبت به شیب‌های سایه‌گیر گرم‌تر بوده و تبخیر بیشتری دارند، بنابراین ذخیره آب خاک کم شده، رشد پوشش گیاهی کمتر است و همین‌طور خاک نیز از تکامل پروفیلی کمتری برخوردار است. علاوه بر آن در شیب‌های آفتاب‌گیر تابش شدید خورشید با تجزیه مواد آلی هوموس را از بین می‌برد، در نتیجه خاک چسبندگی خود را از دست داده، مستعد فرسایش می‌شود. این نیز با نتایج Renard و Ferreira (۱۹۹۳) که ویژگی‌های

ذاتی خاک را یکی از عوامل مؤثر در ایجاد فرسایش بادی می‌دانند، همسان است. مناسب‌ترین مدل‌های تک‌متغیره برای برآورد عامل SEI و K مدل‌هایی هستند که در روابط بدست‌آمده آنها عناصر رس، سیلت و ماسه به‌عنوان ضریب ثابت وجود دارد، که دلیل آن، وجود بالاترین ضریب تبیین و همبستگی بین این عناصر و عامل فرسایش‌پذیری خاک است. این نیز با نتایج Hudson (۱۹۸۱) که مهمترین عوامل فرسایش‌پذیری را ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و کاربری اراضی می‌داند، همسویی دارد. فرمول‌های بدست‌آمده از طریق روابط چندگانه و روش رگرسیون چند متغیره اینتر، نشان‌دهنده این است که مؤلفه‌های SEI و K با مجموعه گروهی تمامی متغیرهای فیزیکی خاک، فیزیونومی زمین و پوشش گیاهی بالاترین ضرایب تبیین و همبستگی را دارند. به این دلیل که متغیرهای مزبور بصورت مجزا نمی‌توانند تبیین وضعیت فرسایش‌پذیری یک منطقه باشند، بلکه این مؤلفه‌ها بصورت یکجا و گروهی بخوبی وضعیت فرسایش‌پذیری خاک یک منطقه را نمایش می‌دهند. برای محاسبه فرسایش‌پذیری از بین مدل‌های چند متغیره برای برآورد عامل SEI و K، نیز روابطی با بالاترین ضریب تبیین و کمترین خطای برآورد و با سطح معنی‌داری ۹۹ درصد، مناسب‌ترین مدل‌ها بودند که همان مدل‌های اجماعی شامل تمامی مؤلفه‌های فیزیکی، فیزیونومی خاک و پوشش گیاهی هستند. نتیجه به‌دست آمده در این بخش با نتایج Rodriguez و همکاران (۲۰۰۶)، Ghaderi و Ghodoosi (۲۰۰۵) و نیز Schwab و همکاران (۱۹۸۱) همخوانی دارد. روابط ذکر شده به‌عنوان مناسبترین مدل‌ها، به علت دارا بودن حداکثر ضریب تبیین و حداقل خطای برآورد نسبت به دیگر معادلات ارجحیت دارند و مطلوبترین مدل‌های تخمین میزان عامل SEI و K با استفاده از روش‌های تک‌متغیره و غیرخطی چندگانه محسوب می‌شوند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان از طریق پارامترهای درصد رس، سیلت، ماسه، ماده آلی و مؤلفه‌های فیزیونومی زمین مانند جهت شیب، ارتفاع، شیب و پوشش گیاهی به سادگی میزان

- Fotoohi, F., Azimzadeh, H. R., Talebi, A. and Ekhtesasi, M. R., 2011, The effect of pavement surface on soil erosion using geostatistics. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 16: 1-12
- Ghaderi, M. and Ghodoosi, G., 2005. Evaluation of soil erodibility in land units in Talvarchay watershed. *Proceedings of the Third National Conference of erosion and deposition, the Soil Conservation and Watershed Management*, Tehran, 367- 372.
- Ghasemi, A. and Mohammadi, J., 2003. Evaluation of soil erodibility spatial change, Case Study, choghakhor Watershed in the province of Chaharmahal and Bakhtiari. *Proceedings of the Eighth Congress of Soil Science*, University of Guilan, Iran, 846 -865.
- Hudson, N. W., 1981. *Soil conservation*. Bastford. London and Cornell University. Press, Ithaca, NY. 230p.
- Klute, A., 1986. *Methods of soil analysis part I. Physical and mineralogical methods*. Soil Science Society of America. 1188p.
- Lafren, J. M., Lane, L. J. and Foster, G. R., 1991. WEPP: a new generation of erosion prediction technology, *Journal of Soil and Water Conservation*, 46(1): 34-38.
- Miller, M. P.; Singer, M. J. and Nielsen, D. R., 1988. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 52:1133-1141.
- Nelson, D. W. and Sommer, L. E., 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. 539- 579. In: A.L. Page (Eds.) *Methods of Soil Analysis*. ASA Monogr. Amer. Society Agronomy Madison.
- Prasannakumar, V., Vijith, H., Geetha, N., 2011. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience Frontiers*, 3: 209-215.
- Rahman, M. R., Shi, Z. H. and Chongf, C., 2009, Soil erosion hazard evaluation: an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. *Ecology Modelling*, 220: 1724-1734.
- Rahman, S., Munn, L. C., Zhang, R. and Vance, G. F., 1996. Wyoming Rocky Mountain forest soils: Evaluating spatial variability using statistics and geostatistics. *Canadian Journal of Soil Science*, 76:501- 507.
- Renard, K. G. and V. A. Ferreira., 1993. RUSLE model description and database sensitivity. *Journal of Environment Quality*, 22(3):458-466.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K. and Yoder, D. C., 1997. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning* فرسایش پذیری را برآورد کرد که نیازی به معادلات پیچیده ریاضی ندارد.
- شناخت مؤلفه‌های فرسایش‌پذیری که در بحث فرسایش بادی بسیار حائز اهمیت می‌باشد، ارزیابی دقیقی را از میزان تهدید و خطرات نابودی خاک در اراضی تحت تأثیر فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک بیان می‌کند. از این رو شناسایی و برآورد دقیق میزان فرسایش خاک در این مناطق می‌تواند به‌عنوان شاخص مهمی برای تعیین دامنه تهدیدات، میزان فرسایش خاک و تخریب اراضی در یک بازه زمانی خاص و در نهایت تعیین روند بیابان‌زایی آن منطقه عمل کند. بنابراین نتایج حاصل از این پژوهش در درجه اول، آگاهی‌بخشی از وضعیت فرسایش‌پذیری خاک بنفع مدیریت محیط است. در درجه دوم این مؤلفه‌ها به‌عنوان یک مدل و ابزاری در بازه زمانی مختلف بیانگر روند و گرایش میزان فرسایش، تلفات خاک و تخریب سرزمین در مناطق با وضعیت اقلیمی مشابه می‌باشد. به‌طور مسلم اگر فرسایش با توجه به عناصر موجود در خاک و عوامل توپوگرافی مؤثر توسط مدیران منابع طبیعی و عوامل انسانی دخیل در آن کنترل شود، مطلوب و مفید خواهد بود؛ اما اگر پیشرفت کند و عوامل مختلف در این زمینه سیستم را به سمت فرسایش بیشتر سوق دهند، نامطلوب و مضر خواهد بود و منجر به گسترش بیابان و توسعه بیابان‌زایی می‌شود.

### منابع مورد استفاده

- Ahmadi, H., 2004, *Applied Geomorphology (Desert-Wind Erosion)*, University of Tehran Press, Tehran, Iran, 706p.
- Ahmadi, H., 2004. Risk factors of desertification. *Forest and Pasture Magazine*, 62: 66-70.
- Azimzadeh, H. R., Ekhtesasi, M. R., Hatami, M. and Akhavan Ghalibaf, M., 2002, study of the effects the physical and chemical properties of soil erodibility index and Offering the model to predict the wind erosion in Yazd-Ardakan plain. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 9(1):139-151.
- Charman, P. E. V. and Murphy, B. W., 2000. *Soils (their properties and management)*. Second edition, Land and Water Conservation, New South Wales, Oxford, 206-212.

- New York, 100-103.
- Vaezi, A., Bahrami, H., Sadeghi, S, H, R. and Mahdian M, H., 2008. Determining estimation error of USLE erodibility factor the in calcareous soils in northwest Iran, *Journal of water and soil (Science and AgriculturalTechnology)*, 22(2): 62 -71.
- Veihe, A., 2002. The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a Veihe, a study from Northern Ghana. *Geoderma*, 106: 101-120.
- Wang, G., Gertner, G. Z., Liu, X. and Anderson. A. B., 2001. Uncertainty Assessment of Soil Erodibility Factor for Revised Universal Soil Loss Equation. *Catena*. 46: 1-14.
- Webb, N. P, McGowan, H. A., 2009. Approaches to modelling land erodibility by wind. *Progress in Physical Geography*, 33(5): 587-613
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D., 1978. predicting rainfall erosion. Losses: a guide to conservation planning, *Agriculture Handbook*. US Department of Agriculture, Washington, DC, 537:58.
- Zang, K., S. Li, W. Peng. and Yu. B., 2004. erodibility of agriculture soils and loess plateau of China. *Soil and Tillage Research*, 76:157-165.
- with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), *Agriculture Handbook*, 703, USDA-ARS.
- Reynolds, J. F., 2008. Cutting through the confusion: Desertification, an old problem viewed through the lens of a new framework, the Dry Lands Development Paradigm (DDP). *Dry lands, Deserts & Desertification Conference* December 14-17. Sede Boque Campus.
- Rodriguez, R. R., Arbelo, C. D., Guerra, J. A., Natario, M. J. S. and Armas, C. M., 2006. Organic carbon stocks and soil erodibility in Canary Islands Andosols. *Catena*, 66: 228-235
- Santos, F. L., Reis, J. L., Martins, O. C, Castanheria, N. L. and Serralherio, R. P., 2003. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigation soils. *Biosystems Engineering*, 86(3), 355-364.
- Schwab, G. O., Fangmeper, D. D, Elliot, W. J. and Frevert, R. K., 1993. *Soil and Water Conservation Engineering*, 9-113.
- Schwab, G. O., Frevert, R. K., Edminster T. W. and Barnes, K. K., 1981. *Soil and water conservation engineering*. Third edition, John Willey and Sons,

Archive of SID

## Modeling of soil erodibility in the Khor and Biabanak region

S. A. Mousavi<sup>1\*</sup>, A. Ranjbar Fodoie<sup>2</sup>, S. H. Mousavi<sup>3</sup> and S. J. Sadatinejd<sup>4</sup>

1\*-Corresponding author, Ph.D Student in Combat Desertification, Department of Desert Engineering, Faculty of Natural Resources and Geo Sciences, University of Kashan, Iran, E-mail: [mosaviali5@gmail.com](mailto:mosaviali5@gmail.com)

2-Associate Professor, Department of Desert Engineering, Faculty of Natural Resources and Geo Sciences, University of Kashan, Iran

3-Assistant Professor, Department of Geography and Ecotourism, Faculty of Natural Resources and Geo Sciences, University of Kashan, Iran

4-Associate Professor, Faculty of Renewable Energies and Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

Received:7/4/2016

Accepted:3/14/2017

### Abstract

Soil erosion is influenced by erosivity and erodibility factors and regional modeling of erodibility could be a criterion for estimating soil loss and land degradation. This research was aimed to modeling the erodibility in the Khoyobanabank region using physical soil components and land and vegetation physiognomy through statistical analysis methods. For this purpose, first, 33 soil samples were taken along three transects from playa to the mountain units at a depth of 0 to 50 centimeters. Then through laboratory analysis, the content of sand, clay, silt, carbon and organic matter were measured and erodibility (K) and soil erosion index (SEI) were calculated. In addition, physiognomic parameters such as slope, elevation and slope direction, as well as vegetation cover, were estimated at these points. Finally, the relationship between the above components was determined by simple and multivariate regression, and the most suitable relations were selected. Modeling results show maximum linear relationship between SEI and silt, clay and sand as well as between K and sand, clay and silt. Multiple regression results indicate the most significant relationship between SEI and K with soil physical parameters and land and vegetation physiognomy ( $P < 0.01$ ). These results could provide the possibility of quick and relatively accurate estimation of erodibility in the form of calculating SEI and K through physical soil components and land and vegetation physiognomy using one-way and multivariate statistical models. Obviously, in the case of achieving the mentioned components, soil erodibility could be estimated in Khobibanbak Basin using linear and nonlinear models.

**Keywords:** Erodibility, modeling, regression analysis, soil physical component, Khor and Biabanak.