

برآورد و پهنه‌بندی عامل فرسایش‌پذیری خاک در حوضه آبخیز علی‌آباد رودبار، استان گیلان

معصومه زحمتکش^۱، سپیده ابریشم‌کش^{۲*}، نفیسه یغمائیان مهابادی^۳، حسین اسدی^۴

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۰۹)

چکیده

فرسایش خاک در مناطق بالادست، نقش مهمی در ورود رسوبات به سدها دارد. تجمع رسوبات موجب کاهش عمر مفید سد، مشکلات زیست‌محیطی و تشدید سیلاب می‌شود. میزان فرسایش علاوه بر اقلیم، توپوگرافی، پوشش گیاهی و مدیریت اراضی به خصوصیات خاک و فرسایش‌پذیری آن نیز بستگی دارد. در این پژوهش، عامل فرسایش‌پذیری خاک و همچنین توزیع مکانی آن در بخشی از حوضه آبخیز علی‌آباد رودبار در بالادست سد سفیدرود، با استفاده از توابع انتقالی مختلف شامل K_{USLE} ، K_{EPIC} و K_{Dg} بررسی شد. نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری برداشته و توزیع اندازه ذرات اولیه خاک، میزان کربن آلی و پایداری خاکدانه‌ها اندازه‌گیری شد. عامل فرسایش‌پذیری معادله جهانی هدررفت خاک (K_{USLE}) به دو شکل با و بدون کدهای ساختمان و نفوذپذیری محاسبه و به ترتیب K_{USLEi} و K_{USLEf} نامیده شدند. نتایج نشان داد که خاک‌های مورد مطالعه عمدتاً دارای بافت سبک بوده و K_{USLEi} در دامنه ۰/۰۱۱ تا ۰/۰۴۰ تن‌ساعت بر مگاژول میلی‌متر برآورد گردید. کم‌ترین عامل فرسایش‌پذیری به K_{Dg} تعلق داشت که به طور معنی‌دار کم‌تر از عامل فرسایش‌پذیری محاسبه‌شده با سایر توابع انتقالی بود. تمامی عوامل فرسایش‌پذیری محاسبه‌شده دارای همبستگی معنی‌دار منفی با میانگین وزنی قطر خاکدانه بودند که K_{USLEi} و K_{Dg} به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین همبستگی با MWD را داشتند. تمام عامل‌های فرسایش‌پذیری دارای وابستگی مکانی از درجه متوسط بودند اما K_{USLEi} وابستگی مکانی قوی را نشان داد. بنابراین در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که نقشه پهنه‌بندی K_{USLEi} تهیه‌شده توسط روش کریجینگ، می‌تواند شاخص مناسبی از فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه مورد مطالعه باشد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش خاک، پایداری خاکدانه، توابع انتقالی، میانگین وزنی قطر خاکدانه، وابستگی مکانی

۱- زحمتکش م، ابریشم‌کش س، یغمائیان مهابادی ن، اسدی ج، ۱۴۰۲. برآورد و پهنه‌بندی عامل فرسایش‌پذیری خاک در حوضه آبخیز علی‌آباد رودبار، استان گیلان. تحقیقات کاربردی خاک، جلد ۱۱، شماره ۴، صفحه: ۱۲۶-۱۴۱.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان (مکاتبه‌کننده)

۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۴- دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران

* پست الکترونیک: sabrishamkesh@guilan.ac.ir

مقدمه

هندسی ذرات خاک مانند روابط ارائه‌شده توسط توری و همکاران (Torri *et al.* 1997) و رامکینز و همکاران *et al.* (Römken 1997) برآورد می‌شود.

فرسایش‌پذیری علاوه بر تغییرپذیری زمانی، دارای تغییرات مکانی گسترده‌ای است. زمین‌آمار به‌عنوان بخشی از آمار مکانی، یکی از روش‌های رایج بر اساس اصل پیوستگی است که تغییرپذیری مکانی متغیرهای خاک را شناسایی و مدل‌سازی می‌کند و قادر به برآورد متغیر موردنظر در نقاط اندازه‌گیری‌نشده و تهیه نقشه‌های پراکندگی متغیرهای خاک با حداقل واریانس ممکن می‌باشد (Zhu & Lin, 2010). در دهه‌های اخیر، به دلیل توانایی زمین‌آمار در کاهش و کمی‌کردن عدم قطعیت، استفاده گسترده از آن در مطالعات تغییرات مکانی متغیرهای خاک موردتوجه قرار گرفته است (Cambule *et al.* 2014). به عنوان نمونه، نتایج یک مطالعه در حوضه آبخیز نالوچای ارومیه نشان داد که عامل فرسایش‌پذیری خاک در این منطقه دارای تغییر-پذیری متوسط است و مدل نمایی، بهترین مدل برای برازش عامل فرسایش‌پذیری و درجه وابستگی مکانی آن از نوع متوسط بود (Khosraviqdam *et al.*, 2019). همچنین در آن مطالعه، جهت پهنه‌بندی فرسایش‌پذیری خاک، بین دو مدل وزن‌دهی عکس فاصله^۴ (IDW) و کریجینگ، مدل کریجینگ، مناسب‌تر شناخته شد و عامل فرسایش‌پذیری در کلاس یک (خیلی کم) قرار گرفت (Khosraviqdam, 2019). نتایج مطالعه دیگری در مورد ارزیابی توزیع مکانی فرسایش‌پذیری در منطقه خور و بیابانک اصفهان و ارتباط آن با برخی خصوصیات فیزیکی خاک با استفاده از روش‌های زمین‌آمار نشان داد که برای توزیع مکانی شن، رس و عامل فرسایش‌پذیری، روش تابع پایه‌شعاعی و برای مولفه‌های کربن و ماده آلی، روش کریجینگ ساده و برای سیلت، روش کریجینگ معمولی، مناسب‌ترین روش‌های درون‌یابی بودند. در نهایت، کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار عامل فرسایش‌پذیری خاک، ۰/۰۲۵ و ۰/۰۷ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر به دست آمد (Mousavi *et al.* 2017a). از سوی دیگر در پژوهشی در مورد قابلیت استفاده از نقشه‌های خاک به منظور برآورد تغییرات مکانی عامل فرسایش‌پذیری، در منطقه داراب‌کلا استان مازندران با بافت خاک غالب لومی و شن‌لومی، مقدار عامل فرسایش‌پذیری ۰/۰۲ تن ساعت بر

خاک، جزء بسیار مهم محیط زیست و یک منبع طبیعی تجدیدناپذیر است. خدمات اکوسیستمی که انسان به آنها وابسته است مانند فراهمی غذا، نیازمند وجود خاک سالم برای حمایت و تنظیم آنها می‌باشد (Robinson *et al.* 2017). اما خاک در اکثر نقاط جهان در معرض تهدیدات متعدد از جمله فرسایش است. فرسایش خاک نه تنها منجر به تخریب زمین، کاهش سطح خدمات اکولوژیکی و از-دست‌رفتن تنوع زیستی می‌شود (اثرات درون‌عرصه‌ای)، بلکه می‌تواند اثرات برون‌عرصه‌ای نامطلوبی از قبیل تجمع رسوبات در منابع آبی پایین دست و در نتیجه به خطر افتادن توسعه پایدار منطقه‌ای را به دنبال داشته باشد (FAO, 2019). فرسایش همچنین در مقیاس جهانی از طریق تسریع هدررفت کربن موجب افزایش غلظت اتمسفری کربن‌دی‌اکسید می‌شود (Lal, 2019). بارندگی، پوشش گیاهی، توپوگرافی، خصوصیات خاک و کاربری اراضی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر فرسایش خاک به شمار می‌آیند (Zhang & Huang, 2015). فرسایش‌پذیری، منعکس‌کننده حساسیت خاک در برابر فرسایش و یکی از پارامتر-های کلیدی برای پیش‌بینی هدررفت خاک و ارزیابی منافع عملیات حفاظت خاک است (Wang *et al.* 2013). فرسایش‌پذیری خاک عموماً تحت عنوان عامل K معادله جهانی فرسایش خاک^۱ (USLE) و معادله بازبینی‌شده فرسایش خاک (RUSLE)^۲ توصیف می‌شود (Gao *et al.* 2017). عامل فرسایش‌پذیری را می‌توان به سه طریق تعیین کرد: ۱) در عرصه و تحت شرایط باران طبیعی، که اگرچه این روش استاندارد تعیین عامل فرسایش‌پذیری است اما به زمان زیادی برای دستیابی به داده‌های قابل‌اعتماد و کار در عرصه فشرده جهت جمع‌آوری رسوب نیاز است (۲) روشی مشابه مورد قبل اما با استفاده از شبیه‌سازهای باران برآورد عامل فرسایش‌پذیری توسط روش‌های غیر-مستقیم (Marques *et al.* 2019) که در آنها عامل K، اغلب توسط روابط رگرسیونی شامل برخی داده‌های مربوط به ویژگی‌های زودیافت خاک و تشریح پروفیل استاندارد از قبیل توابع انتقالی موجود در معادله جهانی هدررفت خاک و مدل محاسبه‌گر اثر فرسایش بر باروری خاک^۳ (Wang *et al.* 2019) و همچنین روابط بر اساس میانگین قطر

3. Erosion Production Impact Calculator

4. Inverse Distance Weighting

1. Universal Soil Loss Equation

2. Revised Universal Soil Loss Equation

مورد برآورد فرسایش پذیری خاک توسط زمین آمار در یک حوضه آبخیز نیمه خشک در برزیل نشان داد که نیم-تغییرنمای گوسی، مناسبترین مدل برای تهیه نقشه فرسایش پذیری

رگرسیون (توابع انتقالی) موجود در معادله جهانی هدررفت خاک، مدل اپیک و رابطه رگرسیونی (تابع انتقالی) بر اساس میانگین هندسی قطر ذرات خاک و همچنین ارزیابی توزیع مکانی و پهنه بندی عامل فرسایش پذیری خاک در بخشی از حوضه آبخیز علی آباد بود.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در بخشی از حوضه آبخیز علی آباد شهرستان رودبار انجام گرفت. حوضه آبخیز علی آباد در بالادست و با فاصله کمی نسبت به سد سفیدرود واقع شده است (شکل ۱ و ۲). منطقه مورد مطالعه به مساحت تقریبی ۲۰۰۰ هکتار و در محدوده جغرافیایی "۳۰' ۱۶' ۴۹° تا "۱۴' ۱۷' ۴۹° طول شرقی و "۸۹' ۴۷' ۳۶° تا "۵۹' ۴۴' ۳۶° عرض شمالی در قسمت های پایینی و میانی حوضه آبخیز علی آباد واقع شده است (شکل ۱). حوضه آبخیز علی آباد با میانگین دما ۱۴/۶ سانتی گراد و بارندگی ۳۰۶/۸ میلی متر، بر اساس سیستم طبقه بندی دوماتر اصلاح شده دارای اقلیم نیمه-خشک و رژیم حرارتی و رطوبتی خاک به ترتیب مزیک و اریدیک است.

مگاژول میلی متر برآورد شد. بهترین مدل برازش یافته بر نیم تغییرنمای عامل فرسایش پذیری خاک، مدل کروی بود و دامنه تاثیر بزرگ آن نشان از ساختار مکانی گسترده داشت (Omidvar et al. 2016). نتایج یک بررسی دیگر در حوضه آبخیز مورد مطالعه بود (Braga Pereira et al. 2017) نتایج یک پژوهش دیگر در مورد پیش بینی توزیع مکانی فرسایش پذیری خاک با استفاده از رابطه موجود در معادله جهانی هدررفت خاک در یک حوضه آبخیز کشاورزی در نیجریه نشان داد که ضریب تغییرات عامل فرسایش پذیری خاک برابر با ۰/۳۲ بود که تحت همبستگی مکانی متوسط طبقه بندی شد و صحت تخمین و بهترین برازش نیم تغییرنما توسط مدل گوسی به دست آمد (Addis & Klik, 2015).

بنابراین بررسی تغییرات مکانی فرسایش پذیری و تهیه نقشه پراکنش آن، بخش مهمی از اطلاعات مورد نیاز به منظور کمی کردن فرسایش، تعیین اولویت های حفاظتی خاک و اجرای روش های مدیریتی بهینه می باشد. اشکال مختلف فرسایش مانند فرسایش ورقه ای، شیاری، خندقی و هزاردره در جنوب استان گیلان از منجیل تا گیلوان نقش مهمی در بروز مشکلات زیست محیطی، تجمع رسوبات در سد سفیدرود و کاهش عمر مفید آن دارد. بنابراین نیاز است برای ارائه نتایج مطلوب تر و اعمال برنامه ریزی های مناسب تر در منطقه، مطالعات مربوط به عوامل موثر بر فرسایش خاک با دقت بیشتری صورت بگیرد. با توجه به موارد ذکر شده، هدف این پژوهش عبارت از: برآورد عامل فرسایش پذیری خاک توسط روابط

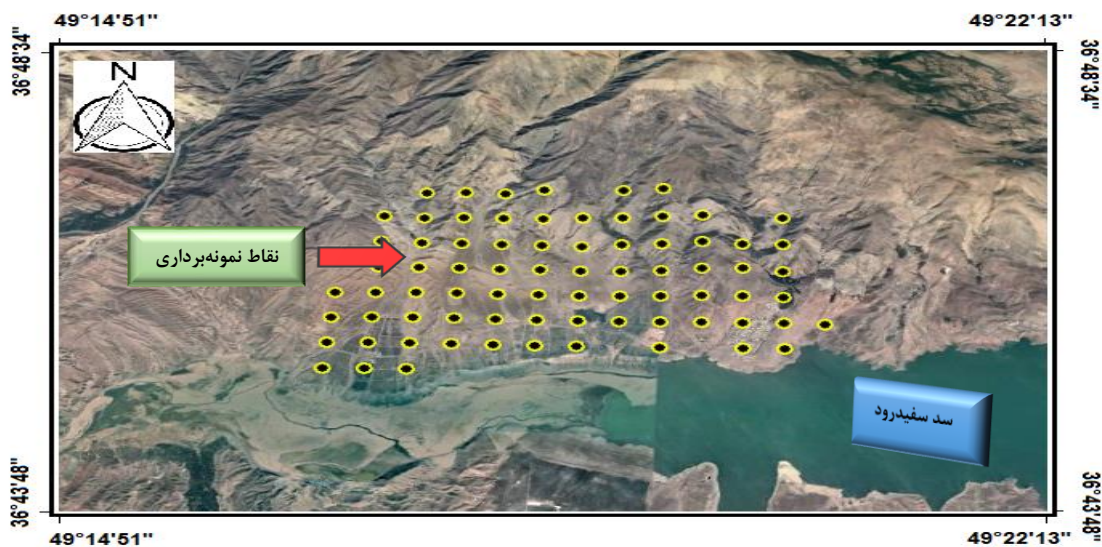


شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Figure 1. Region of study

۱۰ سانتی‌متر، با رعایت حداقل دست‌خوردگی برداشته و به آزمایشگاه منتقل شدند. درصد ذرات معدنی خاک (رس، سیلت و شن) به روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986) و کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر (Nelson & Sommers, 1996) در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. کد مربوط به اندازه، نوع و درجه‌بندی ساختمان بر اساس مشاهدات صحرایی و راهنمای مربوطه و کد مربوط به نفوذ-پذیری خاک نیز بر اساس روش پیشنهادی (Soil Survey Staff 1993) با توجه به بافت خاک تعیین شد.

نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک
در این پژوهش برای تعیین نقاط نمونه‌برداری از روش نمونه‌برداری شبکه‌ای استفاده شد. در ابتدا تعداد ۷۵ نقطه نمونه‌برداری در سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS) و گوگل ارث^۲ مشخص شد. فاصله بین نقاط ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد تا تمام منطقه مورد مطالعه از نظر تنوع واحدهای کاری تحت پوشش قرار گیرد. به کمک دستگاه GPS، نقاط نمونه‌برداری در منطقه مشخص شدند. موقعیت نقاط نمونه‌برداری در بالادست سد سفیدرود در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونه‌های خاک از سطح خاک و عمق صفر تا



شکل ۲- موقعیت نقاط نمونه‌برداری
Figure 2. Position of sampling points

دقیقه در امتداد ۳۸/۱ میلی‌متر به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. خاک باقی‌مانده بر روی هر الک در دمای °C ۱۰۵ به مدت ۲۴ ساعت خشک و توزین شد. پس از تصحیح وزن شن از وزن آون خشک خاکدانه‌ها، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) با رابطه زیر محاسبه شد:

(۱)

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i$$

روی هر الک به وزن کل خاک به کار برده شده در ابتدای آزمایش می‌باشد.

پایداری خاکدانه‌ها به روش الک تر تعیین شد (Nimmo & Perkins, 2002) بدین ترتیب که پس از هواخشک کردن و عبور خاک از الک ۴/۷۵ میلی‌متر، ۵۰ گرم خاک روی یک کاغذ صافی قرار گرفت. سپس کاغذ صافی به همراه خاک، درون یک ظرف قرار گرفت و با افزودن آب از زیر کاغذ صافی، نمونه‌ها به آرامی مرطوب شدند. بعد از گذشت ۲۴ ساعت، خاک روی کاغذ صافی به آرامی در یک ظرف محتوی آب شهر و روی یک سری الک با قطر منافذ ۱، ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵ قرار گرفت و الک کردن با ۳۵ دور در آن MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (mm) X_i ، که در آن میانگین قطر خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی هر الک (mm) n : تعداد الک‌ها و W_i : نسبت وزن خاکدانه‌های

2 Google Earth

1. Geographic Information System

$$K_{EPIC} = (0.2 + 0.3e^{-0.0256SAN(1-SIL/100)}) \times \left(\frac{SIL}{CLA + SIL}\right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + e^{(3.72-2.95C)}}\right] \times \left[1 - \frac{0.7SN}{SN + e^{(22.9SN-5.51)}}\right]$$

که در این رابطه، K_{EPIC} : عامل فرسایش‌پذیری خاک (ton. ac. in)/(100ft. ton. ac. h): SAN : درصد شن، SIL : درصد سیلت، CLA : درصد رس، C : درصد کربن آلی بوده و SN از رابطه ۴ به دست می‌آید:

(۴)

$$SN = 1 - \frac{SAN}{100}$$

در روش سوم، تخمین عامل فرسایش‌پذیری خاک (K_{Dg}) تنها با استفاده از اطلاعات بافتی خاک (Römken *et al.*, 1997) و با بهره‌گیری از رابطه زیر انجام شد:

(۵)

$$K_{Dg} = 7.594 \left\{ 0.0034 + 0.0405 e^{-1/2 \left[\frac{\log(D_g) + 1.659}{0.7101} \right]^2} \right\}$$

D_g طبق رابطه ۶ محاسبه می‌گردد:

(۶)

$$D_g = \exp \left(0.01 \times \sum_{i=1}^n f_i \ln m_i \right)$$

که در این رابطه K_{Dg} : عامل فرسایش‌پذیری خاک (ton. ac. h)/(100ft. ton. ac. in): f_i : وزن نسبی اندازه ذرات بر حسب درصد و m_i : میانگین حسابی اندازه ذرات و D_g :

در سیستم متداول آمریکایی در عدد ثابت ۰/۱۳۱۷ یا تقسیم بر ۷/۵۹۴ است.

تجزیه و تحلیل آماری

محاسبه آماره‌های توصیفی نظیر میانگین، حداقل، حداکثر، انحراف معیار و میزان همبستگی بین متغیرهای مختلف و آزمون نرمالیه توسط آزمون کلموگروف-اسمیرنوف با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد. در صورت نرمال نبودن داده‌ها، نرمال‌سازی آن‌ها با تبدیلات موجود انجام گرفت.

محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک

برای محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک از روابط رگرسیونی (توابع انتقالی) موجود در معادله جهانی هدر-رفت خاک و مدل اپیک و یک تابع انتقالی بر پایه میانگین هندسی قطر ذرات خاک استفاده شد.

برای محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش معادله جهانی هدررفت خاک از رابطه رگرسیونی ارائه‌شده توسط ویشمایر و اسمیت (Wischmeier & Smith, 1978) استفاده شد که عبارت است از:

(۲)

$$K_{USLE} = \frac{2.1 \times 10^{-4} M^{1.14} \times (12 - OM) + 3.25(S - 2) + 2.5(P - 3)}{100}$$

در این رابطه، K_{USLE} : عامل فرسایش‌پذیری خاک (ton. ac. h)/(100ft. ton. ac. in): OM : درصد مواد آلی، S : کد ساختمان خاک، P : کد نفوذپذیری و M : حاصل ضرب مجموع درصد سیلت و شن خیلی‌ریز در ۱۰۰ منهای درصد رس می‌باشد.

عامل فرسایش‌پذیری در روش معادله جهانی هدررفت خاک به دو شکل محاسبه و موردبررسی قرار گرفت: ۱- برآورد اولیه بر اساس اطلاعات توزیع اندازه ذرات اولیه خاک و میزان ماده آلی و ۲- برآورد نهائی که در آن از شکل کامل رابطه (۲) و اختصاص کدهای مربوطه به ساختمان و نفوذ-پذیری خاک استفاده شد. این دو عامل فرسایش‌پذیری به ترتیب با K_{USLE} و K_{USLEf} نشان داده شدند.

برای محاسبه عامل فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از رابطه رگرسیونی موجود در مدل اپیک (K_{EPIC}), از رابطه ارائه‌شده توسط ویلیامز (Williams, 1990) استفاده شد که عبارت است از:

(۳)

میانگین هندسی قطر ذرات بر حسب میلی‌متر است. در این مطالعه، عامل فرسایش‌پذیری محاسبه‌شده با استفاده از میانگین هندسی قطر ذرات با K_{Dg} نشان داده شد.

واحد عامل فرسایش‌پذیری در روابط ذکرشده، (ton. ac. h)/(100ft. ton. ac. in) واحد سیستم متداول آمریکایی (امپریال) است. اما در این مطالعه، واحد بین‌المللی تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر ($ton \ h \ MJ^{-1} \ mm^{-1}$) برای عامل K در نظر گرفته شد که برابر با حاصل ضرب عامل K

تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماري و میان‌یابی

برای رسم نیم‌تغییرنمای متغیرهای مورد مطالعه و عامل فرسایش‌پذیری خاک، از نرم‌افزار GS^+ استفاده شد. به منظور بررسی همسانگردی متغیرها، ابتدا نیم‌تغییرنما در جهت‌های مختلف رسم شد و نیم‌تغییرنماهای مربوط به هر جهت باهم مقایسه و تحلیل همسانگردی با استفاده از تغییرنمای رویه‌ای^۱ نیز انجام شد. همچنین جهت حصول اطمینان، بررسی همسانگردی با استفاده از نسبت نا-همسانگردی که معادل با نسبت بزرگ‌ترین دامنه (قطر بزرگ بیضی) به کوچک‌ترین دامنه (قطر کوچک بیضی) است نیز انجام شد. اگر عدد حاصل از $2/5$ کم‌تر باشد، وضعیت مجموعه داده‌ها همسانگرد بوده و در غیراین صورت، ناهمسانگرد می‌باشد (Rezaei et al. 2018). سپس میان‌یابی و تهیه نقشه پهنه‌بندی مناسب‌ترین عامل فرسایش‌پذیری جهت توصیف فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه و میانگین وزنی قطر خاکدانه در نرم‌افزار Arc. GIS 10.2 به دو روش وزن‌دهی عکس فاصله و کریجینگ انجام شد. برای بررسی دقت بررسی دقت روش‌های پهنه‌بندی و اطمینان از صحت آنها، از جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE^2$) استفاده شد.

(۷)

$$RMSE = \left[\frac{\sum Z^*(X_i) - Z(X_i)^2}{n} \right]^{1/2}$$

در این رابطه، $Z^*(X_i)$: مقدار برآوردشده متغیر موردنظر، $Z(X_i)$: مقدار اندازه‌گیری‌شده متغیر موردنظر و n : تعداد داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

خاک‌های مورد مطالعه با مقادیر میانگین شن، سیلت و رس به ترتیب $73/40$ و $18/75$ و $7/85$ عمدتاً دارای بافت سبک

شن لومی یا لوم شنی بودند (جدول ۱). خاک‌های مورد مطالعه دارای میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD^3) در دامنه $0/45$ تا $1/49$ میلی‌متر بودند. بر اساس میانگین وزنی قطر خاکدانه بر حسب میلی‌متر، می‌توان به طور کلی خاک‌ها را در پنج دسته: ۱- بسیار ناپایدار با $MWD < 0/4$ ، ۲- ناپایدار با $MWD = 0/4 - 0/8$ ، ۳- متوسط با $MWD = 0/8 - 1/3$ ، ۴- پایدار با $MWD = 1/3 - 2$ و بسیار پایدار با $MWD > 2$ طبقه‌بندی کرد (Le Bissonnais, 1996). بنابراین، این منطقه مورد مطالعه دارای خاک‌هایی با خاکدانه‌های نا-پایدار تا پایدار بود. ساختمان خاک، عمدتاً دانه‌ای و اسفنجی متوسط و درشت بود که کد ۳ بدان تعلق می‌گیرد. تنوع خاک را می‌توان از طریق آمار توصیفی از قبیل ضریب تغییرات بیان کرد (Zhang et al., 2007). با توجه به این که درصد ضریب تغییرات صفر تا 15% و 15 تا 35% و بیش از 35% به ترتیب بیان‌گر تغییرپذیری کم، متوسط و زیاد هستند. از میان متغیرهای مورد مطالعه، رس و به‌ویژه کربن آلی دارای تغییرپذیری زیاد بودند و سایر متغیرهای مورد مطالعه دارای تغییرپذیری کم تا متوسط بودند. ضریب تغییرات کربن آلی خاک حتی پس از نرمال کردن نیز عدد بالایی را نشان داد (جدول ۱). ضریب تغییرات کم یک متغیر نشان‌دهنده پراکنش طبیعی آن، ناشی از عوامل ذاتی مانند مواد مادری، توپوگرافی و یا اقلیم منطقه می‌باشد. درحالی‌که ضریب تغییرات بالا می‌تواند ناشی از تأثیر همزمان عوامل ذاتی و مدیریتی و نشان‌دهنده تنوع عوامل تأثیرگذار بر یک متغیر باشد (Ayoubi et al. 2010). بسیاری از اشکال فرسایش خاک از قبیل فرسایش پاشمانی، ورقه‌ای و بین‌شیاری از لحاظ اندازه ذرات انتخابی عمل می‌کنند و ذرات کلوئیدی رس و ماده آلی را بیش‌تر جدا و در معرض انتقال توسط عوامل فرساینده قرار می‌دهند. بنابراین تغییرپذیری زیاد رس و به ویژه کربن آلی در منطقه می‌تواند علاوه بر تأثیر سایر پارامترها از قبیل تفاوت در نوع پوشش گیاهی، توپوگرافی و غیره بیان‌گر وجود تأثیر قابل توجه فرسایش‌های انتخابی از لحاظ اندازه ذرات از قبیل بارانی، ورقه‌ای و بین‌شیاری بر پراکنش آنها باشد.

3 . Mean Weight Diameter

1 . Surface Variogram

2 . Root Mean Square Error

جدول ۱- آماره‌های توصیفی متغیرهای مورد مطالعه
Table 1. Descriptive statistics of the studied variables

	Mean	Minimum	Maximum	Median	Skewness	Coefficient of Variation (%)
Sand (%)	73.80	64.58	82.35	74.30	-0.23	6.11
Silt (%)	18.76	12.27	28.68	18.65	0.40	15.73
Clay (%)	7.86	3.03	28.74	7.15	3.91	40.68
Clay*	0.87	0.48	1.45	0.75	0.79	15.80
Vf Sand (%)	12.82	0.91	23.73	12.46	0.11	29.23
OC (%)	0.43	0.03	2.88	0.35	3.17	107.75
OC*	-0.55	-1.71	0.46	-0.46	0.62	78.90
MWD (mm)	0.88	0.45	1.49	0.86	0.47	28.68
$K_{USLEi}(ton\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1})$	0.027	0.011	0.040	0.027	-0.332	19.93
$K_{USLEf}(ton\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1})$	0.029	0.011	0.041	0.033	-0.516	18.33
$K_{EPIC}(ton\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1})$	0.028	0.009	0.046	0.028	-0.189	19.76
$K_{Dg}(ton\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1})$	0.020	0.012	0.030	0.020	0.454	22.68

Vf Sand: very fine sand, OC: organic carbon, MWD: Mean weight diameter of aggregates, K: soil erodibility factor

*Data after logarithmic transformation

همبستگی بین متغیرهای مختلف

همبستگی بین متغیرهای مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است. در میان همبستگی‌های مشاهده شده بین عامل فرسایش پذیری و متغیرهای مختلف، وجود همبستگی با میانگین وزنی قطر خاکدانه، حائز اهمیت است. زیرا، اولاً این متغیر در محاسبه عامل‌های فرسایش پذیری مورد مطالعه به طور مستقیم وارد نشده و ثانیاً، پایداری خاکدانه‌ها خود شاخصی از فرسایش پذیری خاک‌ها محسوب می‌شود. نتایج این مطالعه نشان داد که در میان عامل‌های فرسایش پذیری محاسبه شده، میانگین وزنی قطر خاکدانه، بیشترین و کمترین همبستگی را به ترتیب با K_{USLEi} و K_{Dg} دارد و به طور میانگین یک همبستگی منفی معنی دار حدوداً ۵۲ درصدی بین عامل‌های فرسایش پذیری محاسبه شده و میانگین وزنی قطر خاکدانه وجود داشت (جدول ۲). وجود روابط قابل توجه بین پایداری خاکدانه و عامل فرسایش پذیری خاک توسط محققین مختلفی گزارش شده است. به عنوان مثال در مطالعه‌ای بر روی خاک‌های مناطق کوهستانی با اقلیم مدیترانه‌ای در ایتالیا، عامل فرسایش پذیری (عامل K) با تخریب خاکدانه‌ها در آزمایش الک تر، همبستگی معنی دار مثبت نشان داد به طوری که بیشترین عامل فرسایش پذیری مطابق با هدررفت بیش تر و تخریب سریع تر خاکدانه بود (Stanchi *et al.* 2012). نتایج یک مطالعه دیگر نشان داد که حساسیت خاک در برابر فرسایش، ارتباط نزدیکی با پایداری خاکدانه خاک سطحی دارد (Barthès *et al.* 1999) یک بررسی دیگر بر روی خاک‌های اصلاح شده نشان داد که هر دو ویژگی فرسایش پذیری و پایداری ساختمان

خاک را می‌توان جهت ارزیابی حساسیت خاک در برابر فرسایش به کار برد (Tejada & Gonzalez 2006). علاوه بر این، پایداری خاکدانه را می‌توان به عنوان یک شاخص مناسب از فرسایش خاک نیز به شمار آورد (Stanchi *et al.* 2012). زیرا فرسایش خاک از توسعه ساختمان خاک جلو-گیری می‌کند (Poch & Antunez, 2010) و خاکدانه‌ها زمانی تشکیل می‌شوند که هدررفت ذرات ریز و اجزای سیمان‌کنندگی خاک (Shi *et al.* 2010) و در واقع فرسایش خاک، کم باشد (Stanchi *et al.* 2012). بنابراین اگر در پژوهش حاضر، MWD به عنوان معیار جهت اعتبارسنجی عامل‌های فرسایش پذیری برآوردی در نظر گرفته شود، عامل فرسایش پذیری برآوردی با توابع انتقالی مختلف را با می-توان با الویت $K_{USLEi} > K_{USLEf} > K_{EPIC} > K_{Dg}$ به عنوان شاخصی از فرسایش پذیری خاک منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار داد. نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که همبستگی مثبت و منفی معنی دار بین MWD به ترتیب با شن و رس وجود دارد (جدول ۲). با وجودی که شن فاقد چسبندگی بوده و از عوامل مخرب خاکدانه‌ها و رس از عوامل سیمانی‌کننده ذرات خاک و خاکدانه‌سازی محسوب می‌شود (Hillel, 2004) و مطالعات زیادی بر نقش مثبت رس و نقش منفی شن در خاکدانه‌سازی حکایت دارد (Amirabedi *et al.* 2016 & Annabi *et al.* 2017). اما نتایج متضادی مشابه با یافته این تحقیق در مورد همبستگی مثبت و منفی معنی دار به ترتیب شن و رس با پایداری خاکدانه نیز در برخی مطالعات گزارش شده است (Visconti-Moreno & Valenzuela-Balcázar 2019);

ارومیه، همبستگی مثبت و معنی‌دار شن و همبستگی منفی و معنی‌دار رس با MWD را گزارش دادند. (Asghari *et al.* 2021). اصغری و همکاران (Asghari *et al.* 2021) در مطالعه‌ای در مورد برآورد پایداری خاکدانه‌های تر از ویژگی‌های زود یافت خاک در شمال غرب دریاچه

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای مورد مطالعه

Table 2. Pearson correlation coefficient between the studied variables

	Sand	Silt	Clay	Vf Sand	OC	MWD	K _{USLEi}	K _{USLEf}	K _{EPIC}	K _{Dg}
Sand	1.00									
Silt	-0.95**	1.00								
Clay	-0.91**	0.75**	1.00							
Vf Sand	-0.08 ^{ns}	0.25*	-0.15 ^{ns}	1.00						
OC	-0.04 ^{ns}	-0.01 ^{ns}	0.09 ^{ns}	-0.10 ^{ns}	1.00					
MWD	0.49**	-0.59**	-0.30*	-0.40**	0.25*	1.00				
K _{USLEi}	-0.34**	0.44**	0.16 ^{ns}	0.49**	-0.43**	-0.57**	1.00			
K _{USLEf}	-0.29*	0.40**	0.13 ^{ns}	0.47**	-0.39**	-0.55**	0.94**	1.00		
K _{EPIC}	-0.65**	0.69**	0.52**	0.10 ^{ns}	-0.21 ^{ns}	-0.50**	0.35**	0.37**	1.00	
K _{Dg}	-0.99**	0.94**	0.92**	0.07 ^{ns}	-0.05 ^{ns}	-0.47**	0.31**	0.26*	0.62**	1.00

** و *: به ترتیب معنی‌دار در سطح یک و پنج درصد، ^{ns}: غیرمعنی‌دار

**, *: are significant at P < 0.01, and 0.05, respectively, ns is non-significant.

Vf Sand: very fine sand, OC: organic carbon, MWD: Mean weight diameter of aggregates, K: soil erodibility factor

قطعیت نمی‌توان می‌توان به نوع رس‌های موجود در منطقه نسبت داد. اما نتایج سایر مطالعات بیان‌گر آن است که نوع رس نیز در خاکدانه‌سازی نقش مهمی دارد (Nciizah & Wakindiki 2014) به عنوان مثال نتایج مطالعه لادو و بن-هور (Lado *et al.* 2004) نشان داد که خاک‌های دارای ۶۳٪ رس و غالبیت کانی‌های فیلوسیلیکاتی مقادیر MWD کمتری در مقایسه با خاک‌های با میزان رس کم‌تر (۳۰٪) و غالبیت کانی‌های غیرفیلوسیلیکاتی داشتند. احتمالاً رس‌های موجود در منطقه مطالعه حاضر نیز از نوع انبساط‌پذیر هستند. اگرچه اثبات این موضوع مستلزم انجام آزمایشات مینرالوژی و تعیین نوع رس است. اما مطالعه اسماعیل‌نژاد و همکاران (Esmaelnezhad *et al.* 2012) بر روی تأثیر خصوصیات شیمیایی و کانی‌شناسی مارن‌ها بر اشکال مختلف فرسایش در جنوب استان گیلان، وجود رس‌های انبساط‌پذیر ۲:۱ در اشکال فرسایشی خندق و هزاردره را اثبات کرد.

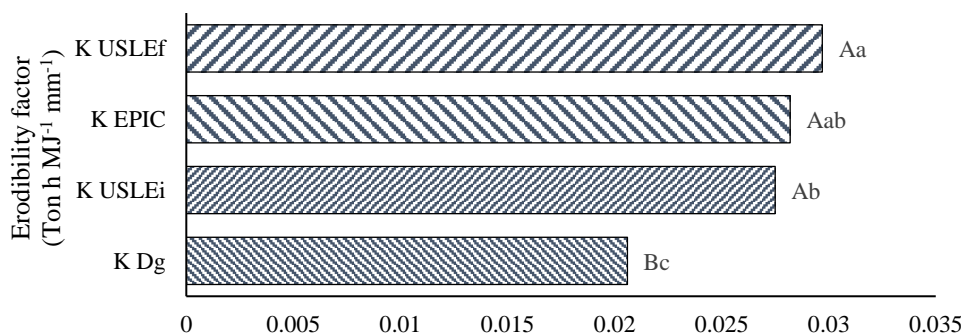
مقایسه مقادیر عامل فرسایش‌پذیری خاک برآوردی از روابط مختلف

مقایسه مقادیر میانگین عامل فرسایش‌پذیری برآوردی توسط توابع انتقالی مختلف نشان داد که کم‌ترین مقدار عامل فرسایش‌پذیری مربوط به K_{Dg} بود که از لحاظ آماری

در آن مطالعه، همبستگی مثبت معنی‌دار بین رس و نسبت جذب سدیم یافت شد و آن محققین نتیجه گرفتند که با افزایش رس به علت بالا رفتن سهم سدیم در مکان‌های تبادل خاک، پایداری خاکدانه‌ها در آب (MWD) کاهش یافته‌است. یک بررسی دیگر در مورد پایداری خاکدانه در آفریقای جنوبی، بیان‌گر همبستگی منفی بین رس و MWD و در نتیجه اهمیت شن و ماده آلی به عنوان فاکتورهای پیش‌برنده پایداری خاکدانه در برخی از خاک‌های مورد-مطالعه بود (Mbanjwa *et al.* 2022). از دلایل همبستگی مثبت شن با MWD می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد: در خاک‌های درشت‌بافت شنی، ریشه‌های ریز گیاهان درون منافذ خاک رشد کرده و ذرات شن را بهم مرتبط می‌سازند که در شرایط ضعیف‌بودن پیش‌برنده‌های غیرزیستی و یا مرتبط با کربن آلی خاک، یکی از مکانیسم‌های اصلی پایدار-سازی ساختمان می‌باشد (Oades 1993; Degens & Sparling 1996). همچنین ذرات شن، حساسیت کمتری در برابر تغییرات خرد اقلیم از قبیل خشک-تر و ذوب و انجماد شدن شدید دارند که می‌تواند موجب خنثی شدن عوامل غیرزیستی تخریب‌کننده ساختمان و پایداری بیش‌تر خاکدانه‌های خاک شود (Erktan *et al.* 2016). اگرچه در مطالعه حاضر وجود روابط منفی بین رس و MWD را با

فرسایش پذیری محاسبه شده با یکدیگر (جدول ۲)، مقدار K_{Dg} در مقایسه با K_{USLEi} ، K_{USLEF} و K_{EPIC} به طور معنی داری کم تر می باشد. با توجه به میزان بسیار کم کربن آلی در خاک - های مورد مطالعه، به نظر می رسد که از بین مدل های پیش - بینی کننده فرسایش پذیری خاک، مدلی که میزان ماده آلی در آن وارد نشود تخمین صحیحی از فرسایش پذیری خاک نخواهد داشت.

نیز با عامل فرسایش پذیری برآوردی توسط روش های دیگر: K_{USLEF} ، K_{USLEI} و K_{EPIC} ، تفاوت معنی داری را نشان داد (شکل ۳). در محاسبه K_{Dg} ، فقط اطلاعات بافتی مورد - استفاده قرار گرفته است اما در محاسبه K_{USLEi} ، K_{USLEF} و K_{EPIC} ، علاوه بر اطلاعات مربوط به توزیع اندازه ذرات معدنی خاک، میزان ماده آلی نیز لحاظ شده است. به طوری که مقایسه میانگین مقادیر عامل فرسایش پذیری (شکل ۳) نشان داد که با وجود همبستگی معنی دار مثبت عامل های



شکل ۳ - مقایسه میانگین عامل فرسایش پذیری برآوردی توسط روابط رگرسیونی مختلف (حروف بزرگ و کوچک مشترک: به ترتیب بیان - گر عدم تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد توسط آزمون توکی و دانکن می باشد).

Figure 3. Comparison of the average erodibility factor estimated by different regression relationships. (Different uppercase and lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ by Tukey and Duncan's test).

بین مقادیر مشاهده ای و مقادیر برآورد شده را نشان می دهد، کارایی مدل، زمانی بهینه است که مقدار مربعات خطا در کمترین حالت ممکن و مقدار ضریب تبیین در حالت بیشینه باشد (Zheng *et al.* 2009). نسبت اثر قطعه ای بر حد آستانه ($C0/C$)، وابستگی مکانی مجموعه داده را نمایش می دهد، اگر مقدار وابستگی مکانی کمتر از ۲۵ درصد باشد، وابستگی مکانی قوی، اگر بین ۲۵ تا ۷۵ درصد باشد وابستگی مکانی متوسط و اگر بیش از ۷۵ درصد باشد وابستگی مکانی ضعیف است (Ganawa *et al.* 2003). بیش تر موارد وابستگی مکانی کم تر از ۲۵ درصد تحت تاثیر فرآیندهای داخلی (ویژگی های ذاتی خاک) و وابستگی مکانی بیش از ۷۵ درصد در اثر فرآیندهای خارجی (اقدامات مدیریتی) ایجاد می گردد (Cambardella *et al.* 1994). همچنین برای حصول نتایج بهتر از روش های زمین آماری، بهتر است فواصل نمونه برداری از شعاع تاثیر مربوط به نیم تغییرنا کم تر باشد، تا بین داده ها رابطه مکانی برقرار شود (Mulla & McBratney, 2001). تمام متغیرهای خاک و همچنین عامل های فرسایش پذیری مورد مطالعه دارای وابستگی مکانی از درجه متوسط تا قوی

برازش مدل تئوریک نیم تغییرنا بر متغیرهای مورد - مطالعه

نتایج برازش بهترین مدل های تئوریک بر عامل فرسایش پذیری در جدول ۳ آمده است. از نیم تغییرنا برای فهم درجه پیوستگی مکانی داده ها و دامنه تاثیر وابستگی مکانی داده ها استفاده شد. نیم تغییرنا ایده آل دارای سه پارامتر اثر قطعه ای، حد آستانه و دامنه مؤثر است. اثر قطعه ای، بیان کننده مقدار نیم تغییرنا در مبدأ مختصات است که جزء تصادفی یا غیر ساختار دار متغیر را نشان می دهد و مقدار ثابتی را که نیم تغییرنا در دامنه تاثیر به آن می رسد آستانه نامیده می شود. دامنه مؤثر، بیان کننده فاصله ای است که در ماورای آن نمونه ها را می توان مستقل در نظر گرفت. این بدان معناست که نمونه ها تا فاصله معینی بر هم تاثیر می گذارند و پیوستگی مکانی دارند، اما در خارج از این فاصله، پیوستگی مکانی وجود ندارد و نمونه ها مستقل عمل می کنند. معیار انتخاب بهترین مدل برازش شده R^2 و RSS می باشد، R^2 نشان دهنده ضریب تبیین است و RSS مقدار مربعات خطا را اندازه گیری می کند و اختلاف

جهت تخمین این متغیرها در موقعیت‌های نمونه‌برداری نشده وجود دارد.

بودند. بنابراین با توجه به اینکه تمام ویژگی‌های مورد مطالعه دارای نسبت اثر قطعه‌ای به حد آستانه کمتر از ۷۵ درصد می‌باشند، امکان بکارگیری تکنیک‌های درون‌یابی

جدول ۳- مشخصات نیم‌تغییرنماهای برازش‌داده‌شده بر متغیرهای مورد مطالعه

Table 3. The characteristics of the semi-variograms fitted to the studied variables

Model type	Nugget (C_0)	Sill (C_0+C)	Range A_0 (m)	(Nugget/Sill)*100	RSS	R^2	
Sand	Exponential	15.6	36.5	800	42.739	32.5	0.707
Silt	Exponential	48	102.8	2400	46.693	7.85	0.724
Clay	Exponential	3.46	4.95	2600	69.899	0.623	0.613
Vf Sand	Exponential	11	18.2	2400	60.44	24.3	0.51
OC	Spherical	0.145	0.272	2950	53.309	0.0148	0.52
MWD	Exponential	0.039	0.053	2400	73.585	6.887	0.528
K_{USLEi}	Gaussian	0.0012	0.0057	8000	21.052	1.980	0.861
K_{USLEf}	Exponential	0.0013	0.0022	3100	59.09	1.474	0.710
$KEPIC$	Gaussian	0.0016	0.006	10000	26.66	1.304	0.865
K_{Dg}	Gaussian	0.04	0.094	9500	42.55	6.256	0.753

Vf Sand: very fine sand, OC: organic carbon, MWD: Mean weight diameter of aggregates, K: soil erodibility factor

پهنه‌بندی متغیرهای مورد مطالعه

در روش میان‌یابی کریجینگ معمولی و روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) به منظور میان‌یابی متغیرهای مورد-مطالعه استفاده و توسط معیار آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مورد مقایسه قرار گرفتند (جدول ۴). هرچه RMSE به صفر، نزدیک‌تر باشد، بیان‌گر آن است که تخمین متغیر با صحت بالاتری صورت گرفته‌است. مقایسه بین دو روش کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله (جدول ۴) نشان داد که دو روش فوق‌الذکر، اغلب دقت یکسانی را نشان دادند. مطلق بودن تخمین در میان‌یابی از ویژگی‌های عمده مدل کریجینگ است. این ویژگی سبب می‌شود که تخمین-گر کریجینگ در رسم خطوط هم‌ارزش از حداکثر نقاط نمونه‌برداری عبور نموده و تمایلی به بسته شدن و دور زدن نداشته باشد و از مرز مورد مطالعه فراتر رود. اما نبود این ویژگی در روش‌های دیگر میان‌یابی از جمله روش وزن‌دهی عکس فاصله سبب می‌شود که خطوط هم‌ارزش تمایل به بسته شدن داشته باشند و این کارایی روش در میان‌یابی را کاهش می‌دهد (Zare Chahooki *et al.* 2015)، بنابراین با توجه به آن‌چه بیان شد، نقشه‌پهنه‌بندی میانگین وزنی قطر خاکدانه و K_{USLEi} توسط روش کریجینگ ترسیم شد که در شکل ۴ آورده شده است.

در میان عامل‌های فرسایش‌پذیری مورد مطالعه، K_{USLEi} همبستگی مکانی قوی را نشان داد. وابستگی مکانی قوی K_{USLEi} می‌تواند بیانگر این موضوع باشد که تغییرپذیری مکانی آن بیش‌تر به وسیله تغییرات ذاتی ویژگی‌های خاک مثل مواد مادری، بافت خاک و کانی‌شناسی کنترل می‌شود (Cambardella *et al.* 1994). قوی بودن ساختار مکانی ویژگی مورد مطالعه همچنین بیانگر آن است که استفاده از روش‌های زمین آماری به خوبی می‌تواند در تجزیه و تحلیل مکانی آن مفید باشد (Mousavi *et al.* 2017b). مدل نیم-تغییرنمای برازش‌داده‌شده بر K_{USLEf} نمایی بود، در حالی که بهترین مدل برازش‌یافته بر K_{USLEi} ، $KEPIC$ و K_{Dg} . مدل گوسی بود. دامنه تأثیر ۸ تا ۱۰ کیلومتر در مورد متغیرهای مختلف مورد بررسی، مقادیر بزرگ‌تری در مقایسه با فاصله نمونه‌برداری (۵۰۰ متر) را نشان داد. این بدان معناست که فاصله نمونه‌برداری متغیرهای مورد مطالعه، می‌تواند بیش‌تر از مقدار مورد استفاده در این مطالعه باشد. بررسی وضعیت همسانگردی متغیرها با استفاده از تغییرنما رویه‌ای و نسبت همسانگردی بیان‌گر همسانگرد بودن کلیه متغیرهای مورد-بررسی بود.

جدول ۴-ارزیابی صحت برآورد متغیرهای خاک با استفاده از روش‌های میان‌یابی.

Table 4. Accuracy assessment of soil variables estimation using of interpolation methods.

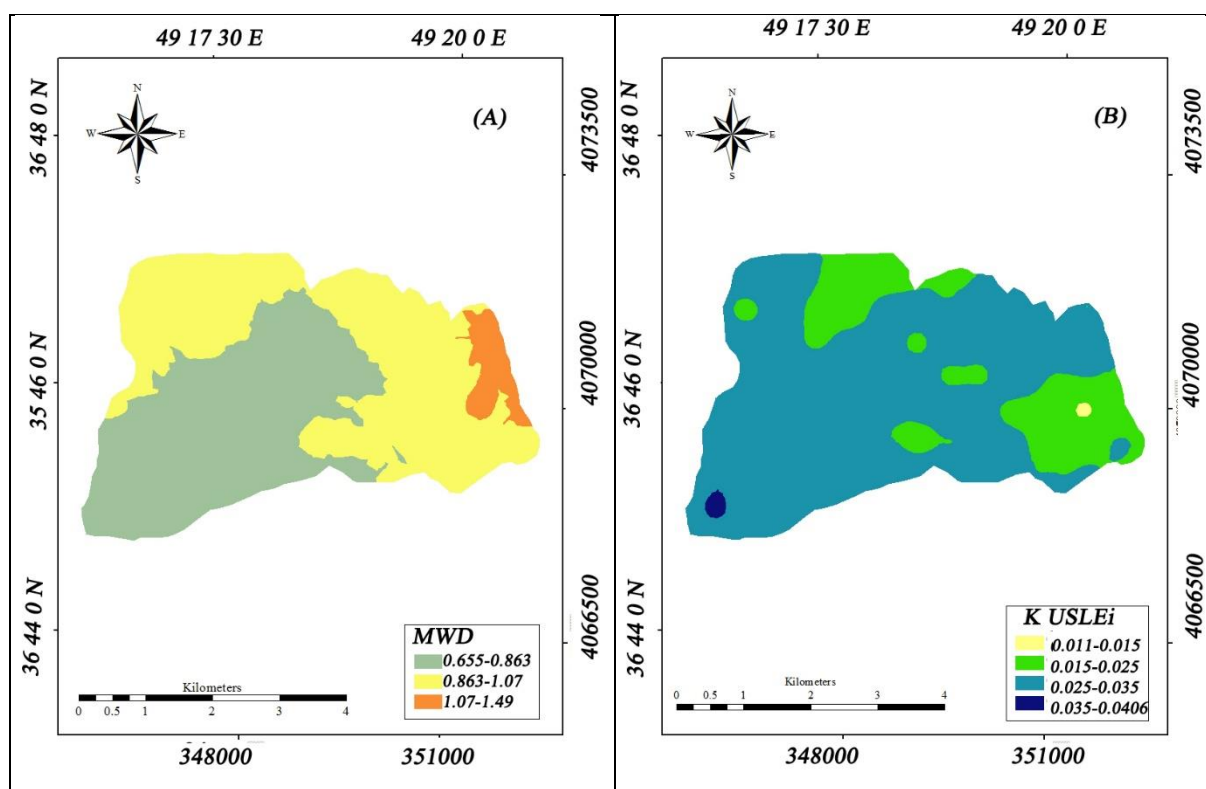
	RMSE									
	Sand	Silt	Clay (%)	Vf Sand	OC	MWD (mm)	K_{NOMOI}	K_{NOMOF} (ton h MJ ⁻¹ mm ⁻¹)	K_{EPIC}	K_{Dg}
Kriging	0.151	0.295	0.050	0.181	0.010	0.007	0.0002	0.0003	0.0001	0.0001
IDW	0.220	0.204	0.063	0.133	0.013	0.010	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001

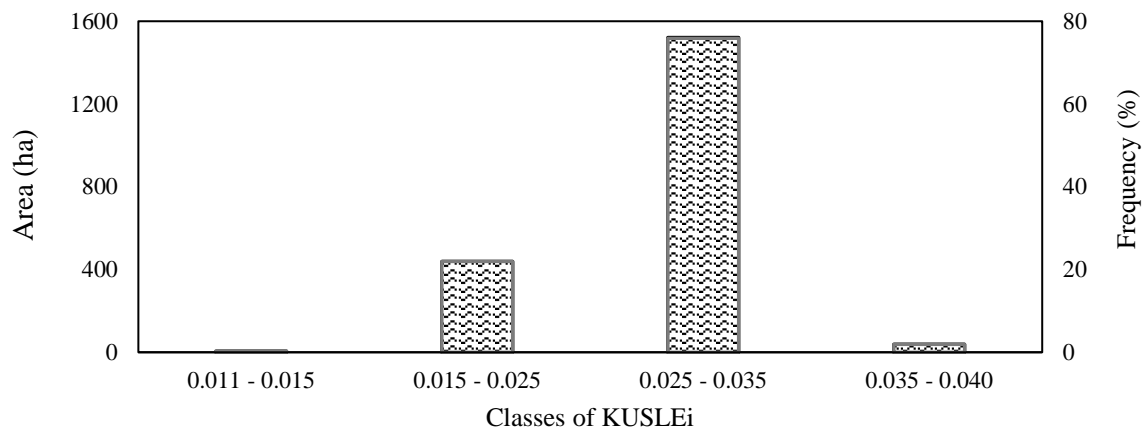
Vf Sand: very fine sand, OC: organic carbon, MWD: Mean weight diameter of aggregates, K: soil erodibility factor
RMSE: Root mean square error, Kriging and IDW: interpolation methods of kriging and inverse distance weighting, respectively.

مختلف K_{USLEi} برآورد شده در منطقه (شکل ۵) نشان می‌دهد که میزان K_{USLEi} در بخش زیادی از منطقه مورد مطالعه (حدود ۷۶ درصد منطقه) در دامنه ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۳۵ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر قرار دارد. تنها در بخش کوچکی از انتهای جنوب غربی منطقه مورد مطالعه (حدود ۲ درصد)، فرسایش پذیری ۰/۰۳۵ تا ۰/۰۴۱ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر می‌باشد.

نقشه پراکنش میانگین وزنی قطر خاکدانه (شکل ۴، الف) نشان می‌دهد که از شرق به سمت غرب منطقه مورد مطالعه از میزان MWD کاسته می‌شود. تنها در بخش کوچکی از شرق، MWD مقادیر بزرگ‌تری در حدود ۱/۰۷ تا ۱/۲۸ میلی‌متر را داشت. در سایر مناطق مقادیر MWD کم‌تر و در دامنه ۰/۶۵ تا ۱/۰۷ میلی‌متر قرار داشت.

نقشه پراکنش K_{USLEi} (شکل ۴، ب) و بررسی میزان مساحت و درصد پوشش اختصاص یافته به کلاس‌های

شکل ۴- پهنه‌بندی الف: میانگین وزنی قطر خاکدانه (میلی‌متر) و ب: K_{USLEi} (تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر).Figure 4. Zoning A: mean weight diameter of aggregate (mm) and B: K_{USLEi} (ton h MJ⁻¹ mm⁻¹).



شکل ۵- مساحت اختصاص یافته و توزیع فراوانی کلاس‌های مختلف K_{USLEi}

Figure 5. Allocated area and frequency distribution of different classes of K_{USLEi}

کم‌تری هستند (Renard *et al.* 1997; stanchi *et al.* 2012). بنابراین فرسایش‌پذیری کم خاک‌های مورد مطالعه همچنین می‌تواند بیان‌گر آن باشد که وقوع اشکال فرسایش انتخابی از لحاظ اندازه ذرات خاک در منطقه مورد مطالعه درازمدت باعث تخلیه خاک از ذرات ریزتر و باقی ماندن ذرات درشت‌تر از قبیل شن شده است.

نتیجه‌گیری کلی

سفیدرود، مهم‌ترین و باارزش‌ترین منابع تأمین آب شرب و کشاورزی در استان گیلان محسوب می‌شود و فرسایش خاک در مناطق بالادست سد سفیدرود نقش مهمی در ورود رسوبات به آن و پیامدهای مرتبط با آن از قبیل تنزل کیفیت آب و به خطر افتادن زندگی آبیان، کاهش عمر مفید سد، تشدید سیلاب‌ها و غیره را دارد. بنابراین با شناخت و ارزیابی عوامل مؤثر بر فرسایش و تولید رسوب در این منطقه مانند فرسایش‌پذیری خاک، بهتر می‌توان از طریق راهکارهای اصولی از زیان‌های مختلف فرسایش و تولید رسوب جلوگیری کرد و یا آن را به حداقل ممکن رساند. نتایج این مطالعه نشان داد که خاک‌های مورد مطالعه واقع در بخشی از بالادست سد سفیدرود در منطقه علی‌آباد، عمدتاً سبک-بافت با پایداری خاکدانه‌ای کم و دارای میزان رس و ماده آلی بسیار کم هستند. تغییرپذیری عامل فرسایش‌پذیری در منطقه چندان زیاد نبوده و مقدار عامل فرسایش‌پذیری ۰/۱۱ تا ۰/۴۰ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر، بیان‌گر فرسایش‌پذیری نسبتاً کم تا متوسط است که آن را می‌توان به بافت سبک این خاک‌ها و فعال بودن فرسایش خاک در

فرسایش‌پذیری کم خاک‌های مورد مطالعه را می‌توان به بافت سبک آنها نسبت داد که با نتایج سایر مطالعات مطابقت دارد. به عنوان نمونه، در مطالعه‌ای در مورد مقایسه کارایی چند معادله برآورد عامل فرسایش‌پذیری، مقدار عامل فرسایش‌پذیری در مورد خاک‌های منطقه کوهین با بافت لوم‌شن و میانگین ماده آلی ۰/۸۹ درصد، توسط روش ویشمایر و اسمیت، اپیک و مدل برپایه میانگین هندسی قطر ذرات به ترتیب ۰/۰۴۸، ۰/۰۳۳۶، و ۰/۰۲۷۸ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر برآورد شد (Arabkhedri *et al.* 2020). در مطالعه دیگری، میزان عامل فرسایش‌پذیری در حوضه آبخیز نازلوچای ارومیه ۰/۰۲۹-۰/۰۷۹ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر برآورد شد (Khosraviaqdam *et al.* 2019). آن محققین نتیجه گرفتند که خاک‌های منطقه مورد مطالعه آنها از نظر فرسایش‌پذیری وضعیت مطلوبی داشته و در ردیف خاک‌های با فرسایش‌پذیری کم قرار می‌گیرند. در مطالعه‌ای بر روی برآورد عامل فرسایش‌پذیری و ارتباط آن با بافت خاک در منطقه‌ای در هندوستان، میانگین عامل فرسایش‌پذیری ۰/۱۷۴ و در مورد خاک‌های شن‌لوم و لوم‌شنی به ترتیب ۰/۰۹۷ و ۰/۱۶۵ تن ساعت بر مگا-ژول میلی‌متر برآورد شد (Baruah *et al.* 2019). اما آن محققین بیان کردند که با وجود فرسایش‌پذیری کم تا متوسط، به دلیل نبود اقدامات مدیریتی و حفاظتی جهت کاهش هدررفت خاک، پتانسیل زیادی از لحاظ تخریب خاک در منطقه وجود دارد. علاوه بر این، نتایج مطالعات نشان داده است که در صورت وقوع طولانی‌مدت فرسایش، ذرات درشت‌تر در خاک باقی می‌مانند که دارای فرسایش‌پذیری

درازمدت در این منطقه نسبت داد. بنابراین، احتمالاً سایر عوامل مؤثر بر فرسایش در حوضه آبخیز علی‌آباد به ویژه پوشش گیاهی ضعیف، شیب‌دار بودن و مدیریت نادرست اراضی می‌بایست نقش مهم‌تری در رابطه با میزان فرسایش و تولید رسوب ایفاء کنند که ضرورت بررسی آنها در مطالعات بعدی را آشکار می‌سازد.

References

- Addis H.K., and Klik A. 2015. Predicting the spatial distribution of soil erodibility factor using USLE nomograph in an agricultural watershed, Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(4): 282-290.
- Amirabedi H., Asghari Sh. Mesri T., and Balandeh N. 2016. Prediction of mean weight diameter of aggregates using artificial neural network and regression models. *Applied Soil Research*, 4(1): 39-53. (In Persian)
- Annabi M., Raclot D., Bahri H., Bailly G.S., Gomez C., and Bissonnais Y.L. 2017. Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia. *Catena*, 153: 157-167.
- Arabkhedri M., Gerami Z., Shadfar S., Bayat R., Parvizi Y., and Nabipay Lashkarian S. 2020. Comparing the Performance of Several Erodibility Indices' Equations of USLE Model at Laboratory Condition. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(7): 1725-1736. (In Persian)
- Asghari S. H., Hatamvand M., and Hasanpour Kashani M. 2021. Estimating wet aggregate stability from easily available soil properties in north west of lake urmia. *Applied Soil Research*, 9(2): 102-115. (In Persian)
- Ayoubi Sh., Mohammad Zamani S., and Khormali F. 2010. Wheat yield prediction through soil properties using principle component analysis. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(1): 51-57. (In Persian)
- Baruah S., Kumaraperumal R., Kannan B., Ragunath K.P., and Backiyavathy M.R. 2019. Soil erodibility estimation and its correlation with soil properties in Coimbatore district. *International Journal of Chemical Studies*, 7(3): 3327-3332.
- Barthès B., Albrecht A., Asseline L., De Noni G., and Roose E. 1999. Relationships between soil erodibility and topsoil aggregate stability or carbon content in a cultivated Mediterranean highland (Aveyron, France). *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 30: 1929-1938.
- Braga Pereira E.C., Bezerra Lopes F., Firmino Gomes F. E., Masceno de Almeida A. M., Messias de Magalhaes A. C. and Maia de Andrade, E. 2017. Determining the Soil Erodibility for an Experimental Basin in the Semi-Arid Region Using Geoprocessing. *American Journal of Plant Sciences* 8: 3174-3188.
- Cambule A.H., Rossiter D.G., Stoorvogel J.J., and Smaling E.M.A. 2014. Soil organic carbon stocks in the Limpopo National Park, Mozambique: Amount, spatial distribution and uncertainty. *Geoderma*, 213:46-56.
- Cambardella C .A., Moorman T. B., Novak J. M., Parkin T. B., Karlen D. L., Turco R.F. and Konopka A. E.1994. Field-Scale Variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 1501-1511.
- Degens B., and Sparling G. 1996. Changes in aggregation do not correspond with changes in labile organic C fractions in soil amended with C14-glucose. *Soil Biology and Biochemistry*, 28:453-462.
- Erktan A., Céillon L., Graf F., Roumet C., Legout C., and Ray F. 2016. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. *Plant and Soil*, 398: 121-137.
- Esmaelnezhad L., Seyedmohammadi J., and Shabanpour M. 2012. Effects of chemical and mineralogical properties of marls on different erosion types in the south of Guilan province. *Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi)*, 98: 2-14.
- FAO. 2019. Soil erosion: The greatest challenge to sustainable soil management. Rome, 100p.
- Ganawa E.S.M., Soom M.A.M., Musa M.H., Shariff A.R.M., and Wayayok A.2003. Spatial variability of total nitrogen, and available phosphorus of large rice field in Sawah Sempadan Malaysia, *Science Asia - Journa* , 29: 7-12.
- Gao L.Q., Bowker M.A., Xu M.X., Sun H., Tuo D.F., and Zhao Y.G. 2017. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China. *Soil Biology and Biochemistry*. 105, 49-58.

- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. In: Klute A (Ed.), *Methods of soil analysis*. Part 1. Physical and mineralogical methods. Agron. Monogr. 9 2nd edn. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 404–408.
- Hillel D. 2004. *Environmental Soil Physics*. New York, USA: Academic Press.
- Khosraviqdam K. Momtaz H. R. and Asadzadeh F. 2019. Estimation of Soil erodibility factor of USLE model and its relationship with landscape features in some parts of Nazzlo-Chay basin, Iran. *Applied Soil Research*, 7(1):31-43. (In persian)
- Lado M., Ben-Hur M., and Shainberg I. 2004. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion. *Soil Science Society of American Journal*, 68(6):1992–1999.
- Lal R. 2019. Accelerated Soil erosion as a source of atmospheric CO₂. *Soil and Tillage Research*, 188: 35-40.
- Le Bissonnais Y. 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47: 425-437.
- Marques V.S., Ceddia M.B., Antunes M.A.H., Carvalho D.F., Anache J.A.A., Rodrigues D.B.B., and Oliveira P.T.S. 2019. USLE K-Factor Method Selection for a Tropical Catchment. *Sustainability*, 11: 1840.
- Mbanjwa V.E., Hughes J.C., and Muchaonyerwa P. 2022. Organic Carbon and Aggregate Stability of Three Contrasting Soils as Affected by Arable Agriculture and Improved Pasture in Northern KwaZulu-Natal, South Africa. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22: 2378–2391.
- Mousavi S. A., Ranjbar Fordoie A., Mousavi S. H., and Sadati nejad S. J. 2017 a. Modeling of soil erodibility in the Koor and Biabanak region. *Iranian Journal of Rangeland and Desert Research*, 24(3): 658-675. (In persian)
- Mousavi S.R., Sarmadian F., Dehghani S., Sadikhani M.R., and Taati A. 2017 b. Evaluating inverse distance weighting and kriging methods in estimation of some physical and chemical properties of soil in Qazvin Plain. *Eurasian Journal of Soil Science*, 6: 4. 327-336.
- Mulla D., and McBratney A.B. 2001. Soil spatial variability. *Soil physics companion*, 343.
- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical Methods*, 5: 961-1010.
- Nciizah A. D., and Wakindiki I. I. C. 2014. Physical indicators of soil erosion, aggregate stability and erodibility. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61:827–842.
- Nimmo J.R., and Perkins K.S. 2002. Wet aggregate stability. In: Dane, J.H. and Topp, G.C. *Methods of soil analysis. Physical methods, Soil science society of America, Inc, Madison, Wisconsin, USA, Part 4*, 321p.
- Oades J. M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, 56:377–400.
- Omidvar E., Kaviani A. Solaimani K., and Mashari. S. 2016. Investigation of applicability of soil map units to estimate the spatial variability of soil erodibility. *Desert Ecosystem Engineering Journal* 4(9): 95-107. (In persian).
- Poch R. M., and Antunez M. 2010. Aggregate development and organic matter storage in Mediterranean mountain soils, *Pedosphere*, 20: 702–710.
- Renard K., Foster G., Weesies G., McCool D., and Yoder D. 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), USDA Agriculture Handbook, 703, 407 pp.
- Rezaei H., Esmaeel Nejad L., Saadat S., and Malaki P. 2018. Mapping of Effective Parameters on Paddy Soils Fertility Quality for Optimum Management of Fertilizer Application. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(4): 259-274. (In persian)
- Robinson D. A., Panagos P., and Borrelli P. 2017. Soil natural capital in Europe; a framework for state and change assessment. *Scientific Reports*, 7(1): 6706.
- Römkens M. J. M., Young R. A., Poesen J. W.A, McCool D. K., El-Swaify S. A., and Bradford J. M. 1997. Chapter Soil erodibility factor In: K. G. Renard, G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, & D. C. Yoder (Eds.), *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook No. 703. Washington, D.C.: US Department of Agriculture.
- Soil Survey Staff K.L. 1993. *Soil survey manual*. USDA-SCS agricultural handbook 430-V-SSM. Washington, DC, USA: U.S. Government Printing Office.

- Shi Z., Yan F., Li L., Li Z., and Cai C. 2010. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China. *Catena*, 81: 240–248.
- Stanchi S., Freppaz M., and Zanini E. 2012. The influence of Alpine soil properties on shallow movement hazards, investigated through factor analysis, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12: 1845–1854.
- Wang B., Zheng F., Romkens M.J.M., and Darboux F. 2013. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. *Geomorphology*, 187: 1-10.
- Tejada M., and González J. L. 2006. The relationship between erodibility and erosion in a soil treated with two amendments, *Soil and Tillage Research*, 9: 186–198.
- Torri D., Poesen J., and Borselli L. 1997. Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset, *Catena*, 31: 1–22,
- Visconti-Moreno E. F., and Valenzuela-Balcázar I. G. . 2019. Impact of soil use on aggregate stability and its relationship with soil organic carbon at two different altitudes in the Colombian Andes. *Agronomía Colombiana*, 37(3): 263-273
- Wang H., Zhang G., Li N. Zhang, B. and Yang, H. 2019. Variation in soil erodibility under five typical landuses in a small watershed on the Loess Plateau, China. *Catena*, 24-35.
- Wischmeier W.H., and Smith D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning, United States Department of Agriculture Agricultural Handbook, 537. U.S. Government Printing Office, Washington D.C., USA.
- Williams J. R. 1990. The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: A case history, *Philosophical Transactions of the royal Society biological sciences*, 329: 421–428.
- Zare Chahooki M. A., Abbasi M., and Azarnivand H. 2015. Preparation Map the spatial distribution some of soil properties using Geostatistics (Case Study: Taleghan miyany rangeland). *Journal of Range management*, 2(2), 1-20.
- Zhang X.Y., Sui Y.Y., Zhang X.D., Meng K. and Herbert S.J. 2007. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China. *Pedosphere*, 17 (1): 19–29.
- Zhang W., and Huang B. 2015. Soil erosion evaluation in a rapidly urbanizing city (Shenzhen, China) and implementation of spatial land-use optimization. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(6):4475-90
- Zheng Z., Zhang F., Chai X., Zhu Z. and Ma, F. 2009. Spatial estimation of soil moisture and salinity with neural kriging. In :IFIP International federation for information processing Volume 294, *International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture*, Vol:2, Eds. D. Li, Z. Chunjiangv (Boston:Springer), pp. 1227-1237.
- Zhu Q., and Lin H.S. 2010. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes. *Pedosphere*, 20: 594–606.

Estimation and Zoning of Soil Erodibility Factor in Aliabad Watershed, Roodbar, Guilan Province

Masoomeh Zahmatkesh¹, Sepideh Abrishamkesh^{2*}, Nafiseh Yaghmaean Mahabadi³, Hossein Asadi⁴

(Received: August 2022 Accepted: April, 2023)

Abstract

Soil erosion in upstream areas has an important role in sediment entry to dams. Sediment accumulation result in decreases of dam service life, environmental problems, and acceleration of floods. In addition to climate, topography, vegetation cover and land management, soil erosion amount depends on soil characteristics and its erodibility. In this research, soil erodibility factor and its special distribution was assessed by using of various pedotransfer functions including K_{USLE} , K_{EPIC} and K_{Dg} in a part of Aliabad watershed of Roodbar, located at upstream of Sefidrood dam. The soil samples were collected from 0-10 cm depth and size distribution of soil primary particles, organic carbon content, and aggregates stability were measured. The K_{USLE} was calculated in two ways without codes of soil structure and permeability, and with respective codes, named as K_{USLEi} , and K_{USLEf} , respectively. The results showed that studied soils generally had coarse texture, and K_{USLEi} was estimated low to moderate in range of 0.11 to 0.040 ton h MJ⁻¹ mm⁻¹. The least soil erodibility factor belongs to K_{Dg} , which was significantly lower than the soil erodibility factors calculated by other pedotransfer functions. All of the calculated erodibility factors had significant negative correlation with mean weight diameter of aggregates which K_{USLEi} and K_{Dg} showed the most and least correlation with MWD, respectively. All of the erodibility factors had moderate spatial dependence, however K_{USLEi} showed strong spatial dependence. Therefore, it generally can be concluded that zoning map of K_{USLEi} generated via kriging can be a suitable indicator of the studied soils erodibility.

Keywords: Soil Erosion, Aggregate Stability, pedotransfer function, mean weight diameter of aggregate, spatial dependence.

Zahmatkesh M., Abrishamkesh S., Yaghmaean Mahabadi N., Asadi H. 2024. Estimation and zoning of soil erodibility factor in Aliabad watershed, Roodbar, Guilan province. *Applied Soil Research*, 11(4): 126-141.

1. Former MSc Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan

2. Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan

3. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan

4. Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran

* Corresponding Email Adress: sabrishamkesh@guilan.ac.ir