

فرسایش پذیری خاک و تغییرات مکانی آن در مناطق تحت عملیات حفاظت خاک در منطقه بهبهان

ملیحه جهانزاده^۱، علیرضا امیریان چکان^{۱*}، محمد فرجی^۲، مسعود جعفری زاده^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۲۹)

چکیده

برای کنترل فرسایش خاک اقدامات مختلفی انجام می‌گیرد که اطلاع از تأثیر این گونه اقدامات اهمیت زیادی در مدیریت فرسایش دارد. به همین دلیل این مطالعه با هدف بررسی شاخص فرسایش‌پذیری خاک (K) و تغییرات مکانی آن در یک منطقه تحت عملیات درخت‌کاری و کنترفارو و یک منطقه مشابه بدون این عملیات در منطقه چاه‌ماری بهبهان (استان خوزستان) انجام شد. تعداد ۱۵۰ نمونه خاک از پنج سانتی‌متر سطحی برداشته شد و مقدار K به روش‌های ویشمایر و اسمیت (روش A) و واعظی و همکاران (روش B) تعیین گردید. مدل‌سازی K با استفاده از تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) بر اساس متغیرهای محیطی استخراج شده از تصویر لندست ۸ و مدل رقومی ارتفاع (DEM) و توسط مدل‌های جنگل تصادفی (RF) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) انجام شد. میانگین K روش‌های A و B به ترتیب برابر با ۰/۰۶۷ و ۰/۰۰۶ تن بر هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر بود. نتایج بیانگر همبستگی بالا بین K به‌دست آمده از هر دو روش و داده‌های سنجش از دور بود. بین K روش B با برخی متغیرهای استخراج شده از DEM همبستگی معنی‌داری وجود داشت، ولی بین این متغیرها با K روش A همبستگی معنی‌داری وجود نداشت. نتایج مقایسه میانگین‌ها نیز نشان داد بین میانگین K به‌دست آمده از روش A در منطقه شاهد با منطقه اجرای عملیات کنترل فرسایش تفاوت معنی‌داری وجود داشت؛ ولی این تفاوت برای K روش B معنی‌دار نبود. ارزیابی کارایی مدل‌ها نشان داد که هر دو مدل RF و ANN کارایی نسبتاً بالایی در تخمین K از طریق دو روش A و B داشتند و هر دو روش منجر به تخمین‌های نارایب گردیدند. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که هر چند کارایی روش‌های DSM در مدل‌سازی K بالا بود، ولی نتایج کارایی مدل‌ها و مقایسه تیمارهای مختلف حفاظت خاک به روش تعیین K همبستگی داشت.

واژه‌های کلیدی: فرسایش خاک، مدل‌سازی مکانی، نقشه‌برداری رقومی خاک، یادگیری ماشین

جهانزاده م.، امیریان چکان ع.، فرجی م.، جعفری زاده م. ۱۴۰۰. فرسایش‌پذیری خاک و تغییرات مکانی آن در مناطق تحت عملیات حفاظت خاک در منطقه بهبهان. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۹، شماره ۳. صفحه: ۷۳-۸۸.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده محیط زیست و منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان

۲- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان (مکاتبه کننده)

۳- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده محیط زیست و منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان

۳- کارشناس ارشد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده محیط زیست و منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم‌الانبیاء بهبهان

*پست الکترونیک: amirian.ac@lu.ac.ir

مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهم‌ترین مشکلات خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران بوده که آگاهی از میزان آن، نقش مهمی در مدیریت و حفاظت خاک دارد (Emami & Soofi, 2017). برای کنترل و کاهش فرسایش خاک اقدامات مختلفی در کشورهای مختلف و ایران انجام شده و می‌شود که اطلاع از میزان مؤثر بودن این اقدامات کمک زیادی به مدیریت بهتر اراضی و کنترل فرسایش خاک می‌کند. یکی از شاخص‌های مهم برای بررسی و مدل‌سازی فرسایش خاک و طرح‌ریزی و اولویت‌بندی اجرای عملیات کنترل فرسایش، شاخص فرسایش‌پذیری خاک (K) است (Shabani *et al.*, 2014; Addis & Klik, 2015; Wang *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2018). حساسیت ذاتی خاک به فرسایش و سهولت جدا شدن ذرات خاک بر اثر انرژی جنبشی قطرات باران و جابه‌جایی آن به وسیله نیروی رواناب را توسط شاخص K نشان می‌دهند (Veihe, 2002).

بنابراین، برای مدیریت بهتر فرسایش خاک و کنترل آن، نیاز به داده‌های مکانی و دقیق از معیارها و شاخص‌های مرتبط با فرسایش قبل و بعد از اجرای عملیات حفاظتی است. به دلیل زمان‌بر و پرهزینه بودن روش‌های سنتی برای تعیین K، می‌توان از روش‌های نقشه‌برداری رقومی خاک (DSM) استفاده نمود. پایه و اساس DSM معادله اسکورپن (Scorpan) است که در آن ویژگی‌ها یا کلاس‌های خاک با یک سری متغیرهای محیطی ارتباط داده می‌شود (McBratney *et al.*, 2003). به این صورت که در هر موقعیت مشاهده خاک، یک سری متغیرهای محیطی وجود دارد که همبستگی بالایی با خصوصیات یا کلاس‌های خاک دارند که یافتن این ارتباط و پیش‌بینی ویژگی‌های خاک در نقاط دیگر، منجر به تهیه نقشه رقومی خاک می‌شود (Zhou *et al.*, 2010). نقشه‌برداری رقومی خاک در واقع گسترش یک مدل عددی یا آماری از رابطه بین متغیرهای محیطی و ویژگی‌های خاک می‌باشد که از آن برای تخمین ویژگی‌ها و کلاس‌های خاک استفاده می‌شود (Minasny *et al.*, 2010).

برای برقراری ارتباط بین متغیرهای کمی و خصوصیات خاک از مدل‌های مختلفی از جمله مدل‌های رگرسیون،

شبکه‌های عصبی مصنوعی، درخت رگرسیونی و بردارهای ماشین پشتیبان استفاده می‌شود. در این تحقیق از دو مدل روش جنگل تصادفی (RF) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) استفاده شد. روش جنگل تصادفی یک روش ناپارامتری و وابسته به خانواده روش‌های تلفیقی است که از روش‌های ماشین یادگیری در اواخر قرن نوزدهم به دست آمدند (Dietterich, 2000). شبکه عصبی مصنوعی یک روش شبیه‌سازی بوده که از مطالعه سیستم مغز و شبکه عصبی موجودات زنده نشأت گرفته است (McBratney *et al.*, 2000). در مطالعات متعددی از روش‌های سنتی و DSM برای تخمین و مدل‌سازی K استفاده شده است. کمالی و همکاران (Kamali *et al.*, 2015) بین K به دست آمده از نمودار ویشمایر و اسمیت و شبیه‌ساز باران در منطقه جنوب غربی تهران همبستگی کمی به دست آوردند. یا نگ و همکاران (Yang *et al.*, 2018) از روش‌های DSM و هشت مدل تجربی برای تخمین و مدل‌سازی شاخص K در استرالیا استفاده کردند و کارایی روش‌های DSM را با مقایسه نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده K تأییدتأیید نمودند. گل محمدی و همکاران (Golmohamadi *et al.*, 2018) به مطالعه پهنه‌بندی K با استفاده از مدل‌های جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی پرداختند و نشان دادند که شاخص NDVI مهم‌ترین متغیر کمکی در پیش‌بینی فرسایش‌پذیری خاک در منطقه بود. پاناگوس و همکاران (Panagos *et al.*, 2014) با استفاده از مدل رگرسیون کیوبیست برای ارتباط بین متغیرهای کمکی به دست آمده از مدل رقومی ارتفاع و داده‌های سنجش از دور با فرسایش‌پذیری خاک، میانگین K را برای ارو پا در حدود ۰/۰۳۲ تن هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر برآورد کردند. کالیکوو و همکاران (Kulikov *et al.*, 2020) با استفاده از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های زمین، نقشه فرسایش‌پذیری خاک در قرقیزستان را تهیه کردند و به این نتیجه رسیدند که فرسایش‌پذیری خاک ارتباط قوی با داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های زمین دارد. وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2018) با شناسایی عوامل مؤثر بر تغییرات زمانی فرسایش‌پذیری خاک بیان

3. Artificial neural network

4. Normalized difference vegetation index

1. Digital soil mapping

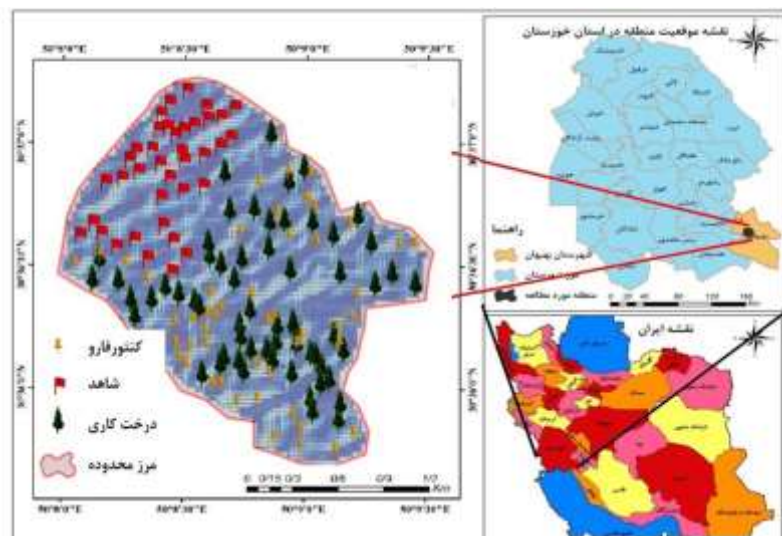
2. Random forest

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز چاه‌ماری با مساحت ۱۳۵۰ هکتار در استان خوزستان در فاصله ۱۵ کیلومتری غرب شهر بهبهان قرار گرفته است (شکل ۱). حدود جغرافیایی این حوزه بین طول شرقی ۵۰ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و پنج دقیقه و عرض شمالی ۳۰ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۳۴ دقیقه قرار دارد. ارتفاع متوسط و میانه حوزه به ترتیب برابر با ۳۹۸/۶۶ و ۳۷۶ متر از سطح آب‌های آزاد و شیب متوسط حوزه ۵/۵ درصد می‌باشد. منطقه مورد مطالعه دارای آب و هوای گرم و خشک می‌باشد. متوسط دمای سالانه در طی دوره آماری ۲۴/۳ درجه سلسیوس و متوسط بارندگی سالانه برابر ۳۵۵/۴ میلی‌متر می‌باشد پوشش گیاهی منطقه به صورت درختان و درختچه‌ها، بوته‌ای‌ها، گندمیان، بقولات و علفی‌ها می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی منطقه در محدوده زاگرس چین‌خورده قرار گرفته است و سازند منطقه بختیاری می‌باشد.

کردند که فرسایش خاک به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های سطح خاک قرار دارد. با وجود مفید و مناسب بودن روش‌های نقشه‌برداری رقومی در تخمین و مدل‌سازی خواص خاک از جمله K، تعیین K با استفاده از این روش‌ها و تأثیر عملیات حفاظتی روی K به‌طور همزمان در ایران و استان خوزستان کم‌تر مورد استفاده قرار گرفته است. هم‌چنین حساسیت خاک‌های منطقه مورد مطالعه به فرسایش به‌دلیل شرایط اقلیمی و نوع سازندهای زمین‌شناسی، تأییدکننده نیاز به بررسی‌ها و مطالعات بیشتر در زمینه فرسایش‌پذیری خاک و عوامل مؤثر بر آن می‌باشد. بنابراین، در این تحقیق کارایی روش‌های DSM در تخمین و مدل‌سازی مکانی فرسایش‌پذیری خاک در مناطق تحت عملیات حفاظت خاک در منطقه چاه‌ماری بهبهان استان خوزستان بررسی گردید. هم‌چنین تأثیر تأثیر عملیات مختلف حفاظت خاک روی K مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه، نقاط نمونه‌برداری و نوع تیمارها

Figure 1. Location of the study area, sampling points and treatments

سال پیش انجام گرفته بود. با استفاده از طرح نمونه‌برداری تصادفی طبقه‌بندی شده تعداد ۱۵۰ نمونه خاک از کل منطقه از عمق صفر تا پنج سانتی‌متری برداشته شد (شکل ۱). برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه، نمونه‌های خاک هوا خشک، از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و به آزمایشگاه منتقل شدند. از

نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل‌های آزمایشگاهی به‌منظور انجام تحقیق حاضر یک منطقه تحت عملیات درخت‌کاری و کنتورفارو و یک منطقه مشابه در کنار آن و بدون عملیات حفاظتی به عنوان شاهد انتخاب گردید (شکل ۱). عملیات کنترل فرسایش در منطقه مورد نظر توسط اداره منابع طبیعی شهرستان بهبهان حدود ۱۵

مدلسازی ضریب فرسایش پذیری خاک

مدلسازی مکانی K بر اساس مدل *Scorpan* ارائه شده توسط مک براتنی و همکاران (McBratney *et al.*, 2003) انجام گرفت. بر این اساس، برای تخمین K از متغیرهای محیطی استفاده می‌شود که به تعداد زیاد قابل دسترس هستند و با K همبستگی بالایی دارند. متغیرهای محیطی که نماینده فاکتورهای خاک‌سازی هستند از منابع مختلفی از جمله تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج می‌شوند. متغیرهای محیطی استخراج شده از DEM بیش‌تر بیانگر پارامترهای توپوگرافی یک منطقه هستند که تأثیر تأثیر زیادی روی خواص خاک و توزیع مکانی آن‌ها دارند. این متغیرها تأثیر زیادی روی فرسایش، رسوب‌گذاری، رواناب و تجمع مواد و رطوبت در خاک دارند. با توجه به اینکه ویژگی‌های خاک‌ها در مکان‌های مختلف معمولاً متفاوت است، جذب و انعکاس طیفی آن‌ها نیز متفاوت است (Andronikov & Dorbrolv'skiy, 1991). از این‌رو، تنوع ویژگی‌های خاک و نوع سطح زمین را می‌توان با استفاده از سنجش از دور شناسایی کرد (Metternicht & Zinck, 1997). بنابراین، بازتاب طیفی خاک‌ها و شاخص‌های به‌دست آمده از باندهای تصاویر ماهواره‌ای می‌توانند بیانگر برخی عوامل خاک‌سازی از جمله موجود زنده (پوشش گیاهی و کاربری اراضی) و مواد مادری باشند.

در این تحقیق ویژگی‌های مانند درصد شیب، ارتفاع، شاخص خیزی توپوگرافی، جهت شیب، فاکتور LS (حاصل ضرب دو فاکتور درصد شیب و طول شیب به عنوان فاکتور LS شناخته می‌شود)، عمق دره، انحنای سطح، شاخص همواری دره با درجه تفکیک بالا (MrVBF) و شاخص توپوگرافی برای شناسایی مناطق مسطح (MrRTF) از DEM با قدرت تفکیک ۳۰ متر استخراج گردیدند. برای استخراج این متغیرها از نرم‌افزار ساگا (SAGA) استفاده شد. روش استخراج تمام متغیرهای یادشده توسط هنگل و رویتر (Hengl & Reuter, 2009) شرح داده شده است. هم‌چنین از تصویر سنجنده OLI^۴ لندست ۸ با قدرت تفکیک ۳۰ متر باندهای طیفی مختلف (B1, B2, B3, B4, B5, B7) و شاخص‌هایی از جمله شاخص کربنات (B3/B2) و شاخص

روش هیدرومتری برای تعیین بافت خاک استفاده شد. جرم ویژه ظاهری (Bd) با روش کلوخه اندازه‌گیری گردید. از ویژگی‌های شیمیایی خاک، ماده آلی، آهک، pH و EC اندازه‌گیری شد. از روش والکلی-بلاک برای اندازه‌گیری میزان ماده آلی استفاده شد (Walkley & Black, 1934). مقدار آهک خاک بر اساس مقدار مواد خنثی شونده (TNV) از واکنش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک و سپس تیتراسیون با سود (NaOH) اندازه‌گیری گردید (Goh & Mermut, 2007). در این تحقیق EC نمونه‌های خاک در عصاره یک به پنج و با استفاده از دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد. pH خاک‌های مورد مطالعه نیز در گل اشباع و با استفاده از دستگاه pH متر اندازه‌گیری شد.

تعیین شاخص فرسایش پذیری خاک

روش رایج تعیین K روش ویشمایر و اسمیت (Wischmeier & Smith, 1978) می‌باشد که رابطه آن در زیر ارائه شده است (رابطه ۱). با توجه به اینکه آهک خاک می‌تواند از عوامل تأثیر تأثیرگذار روی K باشد و این عامل در رابطه ویشمایر و اسمیت در نظر گرفته نشده است، واعظی و همکاران (Vaezi *et al.*, 2008) برای خاک‌های آهکی ایران رابطه ۳ را پیشنهاد دادند. در این تحقیق K به‌دست آمده از هر دو روش مدل‌سازی گردید و نتایج با هم مقایسه شد. در ادامه برای سهولت، روش ویشمایر و اسمیت به‌عنوان روش A و روش واعظی و همکاران به عنوان روش B نامگذاری می‌شوند.

(۱)

$$100K = [2.1M^{1.14} \times 10^{-4} (12 - \%OM)] + [3.25 (S - 2)] + (P-3)$$

(۲)

$$M = (100 - C)(VFS + SI)$$

(۳)

$$K = 0.0123 - 5.7 \times 10^{-5} C - 5.2 \times 10^{-5} TNV - 0.001129 PE$$

در این روابط، S: کلاس ساختمان خاک، P: کلاس نفوذپذیری خاک، VFS: شن خیلی ریز، SI: درصد سیلت، OM: درصد ماده آلی، C: درصد رس، TNV: درصد آهک، PE: نفوذپذیری و SA: درصد شن است. میزان نفوذپذیری با وارد کردن مقادیر بافت خاک و جرم ویژه ظاهری در نرم‌افزار RETC محاسبه گردید.

3. Multi-resolution ridge top flatness index

4. Operational land imager

1. Digital elevation model

2. Multi-resolution valley bottom flatness index

تجزیه و تحلیل‌های آماری و اعتبارسنجی مدل‌ها به منظور ارزیابی تأثیر عملیات اصلاحی و حفاظتی انجام شده در منطقه (درخت کاری و کنتور فارو) روی K از آنالیز واریانس یک طرفه، آزمون دانکن و آزمون t استفاده گردید. هم‌چنین از معیارهای ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME) برای بررسی کارایی مدل‌ها استفاده گردید.

نتایج و بحث

خلاصه آماری ویژگی‌های خاک

خلاصه آماری ویژگی‌های خاک منطقه در جدول (۱) ارائه شده است. تغییرات اجزاء بافت خاک از دامنه نسبتاً وسیعی برخوردار است، به طوری که رس از هفت تا ۳۵ درصد، سیلت از ۲/۳۲ تا ۵۲/۴۲ درصد و شن از ۱۷ تا ۶۵/۵۰ درصد متغیر است. میزان تغییرات این سه جزء بر اساس ضریب تغییرات شبیه هم و در حد متوسط است. کم‌ترین تغییرات خواص خاک در منطقه مربوط به pH و آهک (ضریب تغییرات به ترتیب یک و سه درصد) بوده که بیانگر تغییرات کم عوامل اصلی کنترل کننده این ویژگی‌ها در منطقه از جمله مواد مادری است. میانگین pH خاک‌های منطقه (۷/۴۶) بیانگر این است که این خاک‌ها کمی قلیایی هستند. مقادیر EC از ۰/۱۴ تا ۲/۸۲ دسی‌زیمنس بر متر متغیر است که بیانگر غلظت کم املاح محلول در خاک‌های منطقه است.

NDVI به دست آمد. بر اساس مدل *Scorpan*، باید از تابعی (مدلی) برای برقراری ارتباط بین متغیرهای کمکی و داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده نمود تا از این تابع بتوان برای تخمین ویژگی‌های خاک در نقاط بدون مشاهده استفاده نمود. در این تحقیق از دو مدل رایج RF و ANN استفاده گردید. ورودی‌های این دو مدل متغیرهای کمکی به دست آمده از DEM و تصویر ماهواره-ای و خروجی آن‌ها ضریب K بود. در این تحقیق از پرسپترون چندلایه (MLP) که از رایج‌ترین الگوریتم‌ها در ANNs است استفاده گردید. کارایی MLP به خاطر توانایی آن در پردازش غیرخطی داده‌ها در لایه مخفی است که برای محیط‌های پیچیده‌ای مثل خاک مناسب است. یک شبکه MLP معمولاً دارای سه لایه است؛ داده‌ها از لایه ورودی به شبکه وارد می‌شوند، در لایه مخفی پردازش می‌شوند و خروجی شبکه لایه سوم را تشکیل می‌دهد. روش RF یک مدل یادگیری ترکیبی برای رگرسیون و طبقه‌بندی است که توسط بریمن (Breiman, 2001) ارائه گردید. یک جنگل که ترکیبی از درختان تصمیم‌گیری تصادفی است بر اساس یک رویکرد خود راهانداز ساخته شده و آموزش می‌بیند. هر درخت آموزش دیده یک تخمین از متغیر هدف مورد نظر (در این تحقیق K) با استفاده از متغیرهای وابسته (متغیرهای محیطی) به دست می‌دهد. در نهایت میانگین تخمین همه درختان به عنوان تخمین نهایی در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق از نرم افزارهای R-Studio و JMP برای انجام مدل‌سازی‌ها استفاده گردید.

جدول ۱- خلاصه آماری ویژگی‌های خاک منطقه مورد مطالعه

Table 1. Summary statistics of soil properties

Property	Min	Max	Mean	Skew	CV (%)
Clay (%)	7	35	14.91	0.921	26
Silt (%)	2.32	52.42	29.85	0.263	25
Sand (%)	17	65.50	38.75	0.605	24
CaCO ₃ (%)	41.02	50	47.65	-1.675	3
OM (%)	0.38	3.40	1.52	2.295	56
pH	7.14	7.75	7.46	-0.109	1
EC (dS m ⁻¹)	0.14	2.82	0.57	2.29	119

Min: minimum; Max: maximum; Skew: skewness; CV: coefficient of variation; OM: organic matter

به روش تخمین K هم بستگی دارد که دلیل آن می‌تواند یکسان نبودن ویژگی‌های مورد استفاده برای تخمین K در روش‌های مختلف باشد. همبستگی معنی‌دار شاخص

همبستگی K با ویژگی‌های خاک و متغیرهای کمکی نتایج ارائه شده در جدول (۲) نشان می‌دهد که وجود همبستگی بین K و خصوصیات خاک علاوه بر نوع ویژگی

سنگین بودن این ذرات و مقاومت بیش تر به انتقال توسط آب است. هم چنین ذرات شن به دلیل درشت بودن و تأثیر روی آبگذری خاک، روی فرسایش پذیری خاک هم مؤثر هستند. شن خیلی ریز + سیلت با فرسایش پذیری روش A همبستگی معنی دار و مثبت دارد. دلیل این موضوع این است که ذرات سیلت و شن خیلی ریز نه چسبندگی ذرات رس را دارند و نه به سنگینی ذرات شن هست و معمولاً حساس ترین ذرات به فرسایش آبی هستند.

نتایج نشان داد که به طور کلی برخی خواص خاک روی فرسایش پذیری خاک اثر معنی داری دارند و برخی ویژگی ها تأثیر زیادی ندارند (جدول ۲). بنابراین، با اطلاع از این همبستگی ها می توان روی عوامل مؤثر بر فرسایش خاک کنترل و مدیریت بهتری انجام داد. به عنوان مثال، فرسایش پذیری خاک با ماده آلی رابطه منفی دارد که می توان نتیجه گرفت هر اقدامی که باعث افزایش ماده آلی خاک شود می تواند به کنترل فرسایش کمک کند. هم چنین این نتایج نشان داد که میزان همبستگی خواص خاک با K تا حدودی به روش اندازه گیری K هم بستگی دارد که این موضوع اهمیت روش به کار رفته را نشان می دهد. تحقیقات زیادی در مورد تأثیر ویژگی های خاک بر فرسایش پذیری انجام گرفته است. شواب و همکاران (Schwab *et al.*, 1981) بیان داشتند که فرسایش پذیری خاک با افزایش مقدار ماده آلی کاهش می یابد که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. زانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2008) نشان دادند که همبستگی منفی معنی دار بین مقدار رس و فرسایش پذیری خاک وجود دارد که این نتایج با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد. در پژوهشی قاسمی و محمدی (Ghasemi & Mohammadi, 2003) نشان دادند که با افزایش درصد ماده آلی و رس، فرسایش پذیری کاهش می یابد که نتایج آن ها با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. ماده آلی موجود در خاک مانع از فروپاشی خاکدانه ها (Emadi *et al.*, 2009)، کاهش فرسایش پذیری خاک، افزایش نگهداری آب (Rumpel, 2009)، افزایش نفوذپذیری خاک (Arнау-Rosalen *et al.*, 2008) و بهبود ساختمان خاک می گردد که نتیجه نهایی آن کاهش فرسایش می باشد (Yousefifard *et al.*, 2007). در پژوهشی قاسمی و محمدی (Ghasemi &

K روش A با EC می تواند مربوط به تأثیر غلظت املاح در هم آوری ذرات و بهبود ساختمان و در نتیجه کاهش فرسایش پذیری خاک باشد و عدم همبستگی معنی دار با شاخص K روش B می تواند به دلیل عدم در نظر گرفتن ساختمان در رابطه پیشنهادی توسط واعظی و همکاران (۲۰۰۸) باشد. در خصوص تفاوت همبستگی ماده آلی با شاخص K به دست آمده از دو روش هم می توان تحلیل مشابه EC ارائه داد. با وجود اینکه در روش B آهک به عنوان فاکتور مهمی در تخمین شاخص K در نظر گرفته شده است ولی رابطه آن با شاخص K معنی دار نشده است. این موضوع می تواند مربوط به تغییرات کم آهک در منطقه باشد (جدول ۱) و به دلیل تغییرات کم، آهک نمی تواند عامل اصلی تغییرات ضریب K در منطقه باشد. در خاک های منطقه مورد مطالعه واعظی و همکاران (۲۰۰۸) ضریب تغییرات آهک برابر با ۴۱ درصد، در حالی که در تحقیق حاضر بعد از pH آهک کم ترین ضریب تغییرات با مقدار سه درصد را داشت (جدول ۱). مشابه نتایج تحقیق حاضر، در مطالعه انجام شده توسط واعظی و همکاران (Vaezi *et al.*, 2016) در منطقه زنجان، همبستگی معنی داری بین آهک و فرسایش پذیری خاک به دست نیامد. تغییرات کم متغیرها و دامنه کم تغییرات آن ها یکی از دلایل شناخته شده در پایین بودن ضریب همبستگی آن ها است (Goodwin & Leech, 2006). آبگذری خاک با فرسایش پذیری به دست آمده از هر دو روش همبستگی معنی دار و منفی دارد که دلیل آن استفاده از این پارامتر در تخمین شاخص K در هر دو روش و هم چنین کاهش فرسایش و رواناب به دلیل آبگذری بیش تر خاک است. شاخص فرسایش پذیری به دست آمده به روش های A و B با رس و شن همبستگی معنی دار منفی دارد و این شاخص به روش A با سیلت همبستگی مثبت دارد. سیلت به دلیل اینکه نه چسبندگی ذرات رس را دارد و نه سنگینی ذرات شن را، فرسایش پذیرتر هست (e.g., Bonilla & Johnson, 2012; Ostovari *et al.*, 2018) و ذرات رس به دلیل چسبندگی بالاتر و هم چنین کمک به تشکیل ساختمان خاک، فرسایش پذیری کمتری دارند. دلیل همبستگی منفی ذرات شن با فرسایش پذیری خاک

شمال غربی ایران به این نتیجه رسیدند که از بین ویژگی‌های خاک تنها همبستگی شن درشت، مقدار ماده آلی و آهک با فرسایش‌پذیری معنی‌دار بود.

(Mohammadi, 2003) نشان دادند که با افزایش درصد ماده آلی و رس، فرسایش‌پذیری کاهش می‌یابد که نتایج آن‌ها با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. واعظی و همکاران (Vaezi et al., 2008) در خاک‌های آهکی

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص فرسایش‌پذیری (K) و خصوصیات خاک

Table 2. Pearson correlation coefficient between soil erodibility index (K) and soil properties

Method	EC	pH	Organic matter	Lime	Infiltration	Very fine sand + Silt	Fine sand	Clay	Silt	Sand
Method A	-0.188*	0.058	-0.753*	0.00	-0.364**	0.368**	0.069	-0.758**	0.306**	-0.263**
Method B	-0.102	0.054	0.130	-0.120	-0.987**	-0.136	0.224**	-0.390**	-0.314**	-0.348**

*, ** به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهد. روش A روش ویشمایر و اسمیت و روش B روش واعظی و همکاران است. *, ** indicate significant difference at the 5% and 1% levels, respectively. Method A is Wischmeier and Smith and method B is Vaezi, et al.

استخراج شده از DEM، فقط تعداد کمی از آن‌ها با K همبستگی داشتند. هم‌چنین نتایج بیانگر این است که هیچ کدام از این متغیرهای کمکی با K به‌دست آمده از روش B همبستگی نداشتند.

نتایج همبستگی بین برخی پارامترهای به‌دست آمده از مدل رقومی ارتفاع که حداقل با K به‌دست آمده از یکی از روش‌ها همبستگی معنی‌داری داشتند، در جدول (۳) نشان داده شده است. با وجود تعداد زیاد متغیرهای

جدول ۳- ضریب همبستگی بین پارامترهای به‌دست آمده از مدل رقومی ارتفاع و فرسایش‌پذیری

Table 3. Correlation coefficient between parameters obtained from digital elevation model and erodibility

Terrain attributes	K (method A)	K (method B)
Channel Network Base Level	0.085	0.172*
Vertical Distance to Channel Network	-0.084	0.241**
Depth of the valley	-0.077	-0.197*
Relative Slope Position	-0.036	0.232**

*, ** به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهد. *, ** indicate significant difference at the 5% and 1% probability levels, respectively.

(2018 هم‌خوانی دارد. نبی‌اللهی و همکاران (Nabiollahi et al., 2014) از تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهای سرزمین برای نقشه‌برداری رقومی خاک استفاده کردند و نشان دادند که شاخص خیزی، شاخص همواری دره، ارتفاع، طول شیب و باند ۳ از مؤثرترین متغیرهای مورد استفاده در نقشه‌برداری رقومی بوده‌اند. نتایج همبستگی بین K و متغیرهای کمکی بیانگر اهمیت خیلی بیش‌تر داده‌های به‌دست آمده از تصویر ماهواره‌ای در توزیع مکانی شاخص K بود (جدول ۳ و ۴). این می‌تواند به کوچک بودن منطقه و اندازه پیکسل‌های DEM منطقه ارتباط داشته باشد. تغییرات پارامترهای توپوگرافی معمولاً از متغیرهای استخراج شده از DEM قابل بررسی و توصیف هستند.

بر خلاف متغیرهای استخراج شده از DEM، تقریباً همه متغیرهای استخراج شده از تصویر ماهواره‌ای با K به‌دست آمده از هر دو روش A و B همبستگی معنی‌داری داشتند (جدول ۴). نتایج نشان می‌دهد همه متغیرهای کمکی به‌دست آمده از تصویر ماهواره‌ای با K به‌دست آمده به روش A همبستگی معنی‌داری در سطح یک درصد دارند. به‌طور کلی این همبستگی با K روش B کم‌تر و برای برخی متغیرها مثل شاخص شوری، شاخص پوشش گیاهی، شاخص پوشش گیاهی تعدیل شده نسبت به خاک و باند ۷، این همبستگی معنی‌دار نیست.

نتایج تحقیق حاضر بیانگر همبستگی معنی‌دار بین K با موقعیت نسبی شیب، عمق دره، فاصله عمودی تا شبکه کانال و سطح پایه شبکه کانال بود (جدول ۳) که با نتایج تحقیق گل‌محمدی و همکاران (Golmohamadi et al.,)

جدول ۴- ضریب همبستگی بین شاخص‌های به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای و فرسایش‌پذیری

Spectral indices	K (method A)	K(method B)
Clay index	-0.480**	0.278**
Carbonate index	0.408**	-0.192*
Salinity index	0.427**	-0.150
Brightness index	0.361**	-0.178*
Vegetation index	-0.427**	0.150
Intensity index	0.408**	-0.179*
Modified soil vegetation index	-0.427**	0.150
Relative vegetation index	-0.406**	0.144
Normalized salinity index	-0.483**	0.279**
Gypsum index	0.239**	0.038
Band 2	0.405**	-0.188*
Band 7	0.416**	-0.150
Band 8	0.413**	-0.202*

*, ** به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهد.

*, ** indicate significant difference at the 5% and 1% probability levels, respectively.

میلی‌متر می‌باشد. همچنین نتایج آزمون t در سطح احتمال پنج درصد بیانگر اختلاف معنی‌دار بین میانگین شاخص فرسایش‌پذیری به‌دست آمده از دو روش است (جدول ۵). این نتیجه نشان می‌دهد بسته به روش تخمین K، ممکن است نتایج کاملاً متفاوتی به‌دست آید. در نتیجه در مطالعات فرسایش خاک باید این موضوع مورد توجه قرار گیرد.

بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق میانگین‌های شاخص‌های فرسایش‌پذیری روش A و روش B به ترتیب برابر با ۰/۰۶۷ و ۰/۰۰۶ تن بر هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر برآورد گردیدند (جدول ۵). گاپتا و کومار (Gupta & Kumar, 2017) در یکی از حوزه‌های آبخیز کشور هند فرسایش‌پذیری خاک را بین ۰/۰۳۹ تا ۰/۰۶۴، جعفری و همکاران (Jafari Honar et al., 2014) میزان فرسایش‌پذیری را برای خاک‌های لسی استان گلستان حدود ۰/۰۴ تا ۰/۰۸، گل‌محمدی و همکاران (Golmohamadi et al., 2018) برای خاک‌های دهگلان در استان کردستان بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ و واعظی و همکاران (Vaezi et al., 2008) در خاک‌های آهکی غرب کشور مقدار آن را بین ۰/۰۲۵۴ تا ۰/۰۴۹۲ تن بر هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر تخمین زدند. حسینی و همکاران (Hussein et al., 2007) مقدار K را در شمال عراق ۰/۰۲۷ تا ۰/۰۶۹ و کالی و همکاران (Kouli et al., 2009) در چین مقدار آن را بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ تن بر هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر برآورد نمودند.

چون این تغییرات در منطقه بیش‌تر به‌صورت موضعی و در فواصل کوچک بود، برخی از آن‌ها توسط DEM به‌خوبی قابل توصیف نبودند. بالا بودن همبستگی بین K با متغیرهای به‌دست آمده از تصویر سنجده لندست (جدول ۴) بیانگر مناسب بودن این داده‌ها برای مدل‌سازی و تخمین K در منطقه بود. به‌عنوان مثال NDVI یکی از رایج‌ترین شاخص‌های ماهواره‌ای می‌باشد که بیانگر میزان پوشش گیاهی می‌باشد. این شاخص ارتباط زیادی با پوشش گیاهی و در نتیجه مقدار ماده آلی خاک یک منطقه دارد. مشاهده بیش‌ترین مقدار این شاخص در منطقه عملیات اصلاحی و کم‌ترین آن در منطقه شاهد دلیلی بر ارتباط آن با پوشش گیاهی و ماده آلی می‌باشد. از این شاخص به‌طور گسترده‌ای در نقشه‌برداری رقومی خاک استفاده شده است (Hengl et al., 2007; Nield et al., 2007).

شاخص فرسایش‌پذیری خاک

نتایج پارامترهای آماری مربوط به شاخص فرسایش‌پذیری خاک در جدول (۵) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که میانگین شاخص فرسایش‌پذیری روش A برابر با ۰/۰۶۷ تن بر هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر و دامنه تغییرات آن بین ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۸۷ تن بر هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر است. میانگین شاخص فرسایش‌پذیری روش B برابر با ۰/۰۰۶ تن بر هکتار ساعت بر هکتار مگاژول میلی‌متر و دامنه تغییرات آن بین ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۸ تن بر هکتار ساعت بر هکتار مگاژول

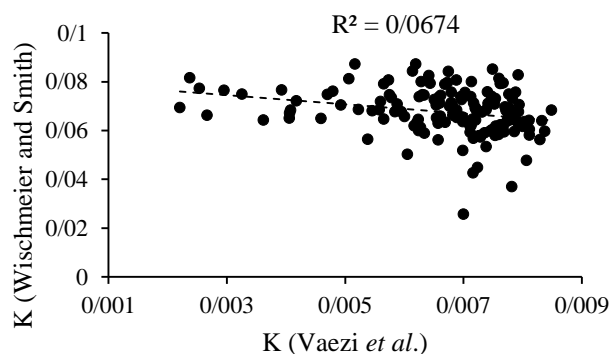
جدول ۵- آماره‌های توصیفی شاخص فرسایش پذیری
Table 5. Descriptive statistics of erodibility index

Erodibility	Minimum	Maximum	Mean	SD	CV
Method A	0.025	0.087	0.067 ^a	0.009	0.13
Method B	0.002	0.008	0.006 ^b	0.001	0.16

SD و CV به ترتیب انحراف معیار و ضریب تغییرات هستند. حروف متفاوت بیانگر اختلاف معنی دار بین میانگین شاخص فرسایش پذیری به دست آمده از دو روش در سطح احتمال ۵ درصد است.
SD and CV are standard deviation and coefficient of variation. Different letters indicate significant difference of means of soil erodibility at the 0.05 probability level.

مقدار K روش دیگر استفاده کرد. هم‌چنین عدم وجود همبستگی بین مقادیر K نشان می‌دهد روش تخمین K تأثیر زیادی در مقادیر به دست آمده دارد و بهتر است تا حد امکان برای هر منطقه مقدار K به روش مستقیم و در صحرا به دست آید.

در شکل (۲) همبستگی بین شاخص K به دست آمده از دو روش A و B نشان داده شده است. روند همبستگی نشان داده شده بیانگر عدم وجود ارتباط خاصی بین K به دست آمده از دو روش می‌باشد. این نتیجه در تأیید اختلاف معنی‌دار بین میانگین K دو روش (جدول ۵)، بیانگر این است که نمی‌توان از یک روش برای تخمین



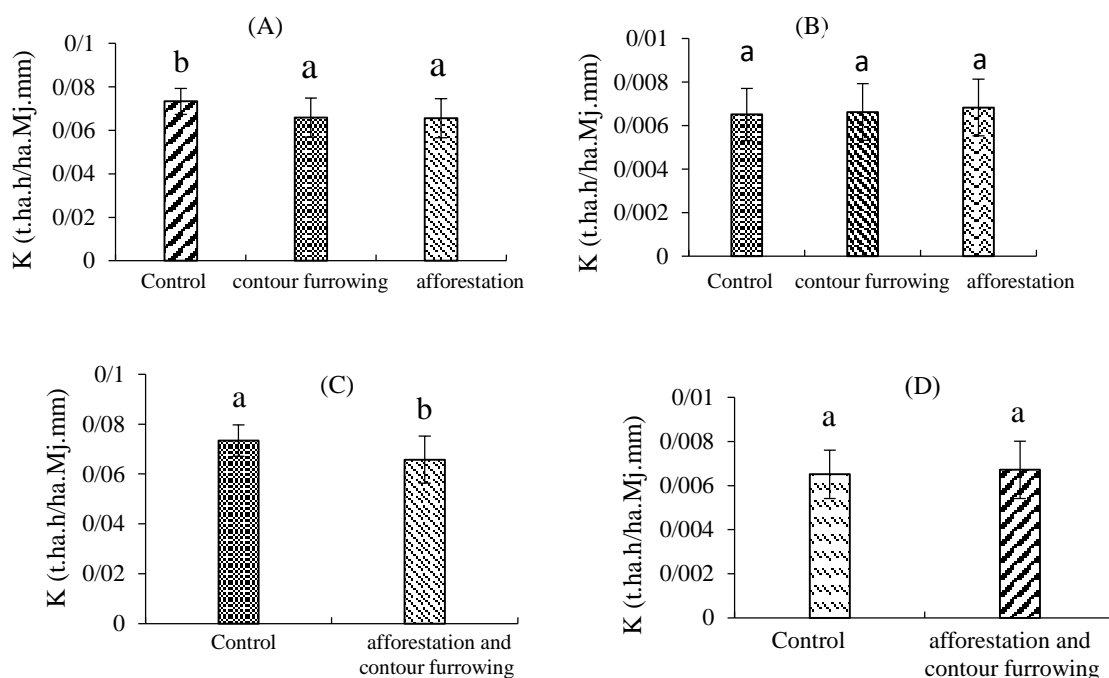
شکل ۲- همبستگی بین شاخص فرسایش پذیری به دست آمده از دو روش واعظی و همکاران و روش ویشمایر و اسمیت.
Figure 2. Correlation between soil erodibility indices estimated by Vaezi et al. and Wischmeier and Smith methods.

مشخص کرد که شاخص فرسایش پذیری به روش B در گروه‌های مورد بررسی تفاوت معنی‌داری ندارد (شکل ۳). نتایج آزمون t نشان داد که بین شاخص فرسایش-پذیری به دست آمده از روش B در منطقه شاهد با منطقه عملیاتی اصلاحی تفاوت معنی‌داری وجود ندارد (شکل ۳). نتایج نشان داد که عملیات حفاظت خاک (درخت کاری و کنتور فارو) روی شاخص K به دست آمده از روش A تأثیر معنی‌داری داشت در حالی که این تأثیر روی شاخص به دست آمده از روش B معنی‌دار نبود (شکل ۳). این یافته نشان می‌دهد که روش تعیین شاخص K می‌تواند در نتایج به دست آمده تأثیر زیادی داشته باشد که این تفاوت باید در تجزیه و تحلیل نتایج در نظر گرفته شود. درخت کاری باعث افزایش ورودی ماده آلی به خاک و در نتیجه بهبود ساختمان خاک، افزایش نفوذپذیری خاک، کاهش سرعت

اثر عملیات حفاظتی روی شاخص فرسایش پذیری نتایج تجزیه واریانس یک طرفه نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای مختلف از نظر مقدار K وجود دارد. برای مشخص کردن این که این تفاوت بین چه تیمارهایی است از آزمون دانکن استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن مشخص کرد که شاخص فرسایش‌پذیری در منطقه شاهد نسبت به دو منطقه دیگر (درخت کاری و کنتورفارو)، به صورت معنی-داری بیش‌تر است در صورتی که این شاخص بین دو منطقه درخت کاری و کنتورفارو تفاوت معنی‌داری ندارد (شکل ۳). نتایج آزمون t نشان داد که بین شاخص فرسایش‌پذیری به دست آمده از روش A در منطقه شاهد با منطقه عملیاتی اصلاحی تفاوت معنی‌داری وجود دارد (شکل ۳). مقایسه میانگین‌ها بر اساس آزمون دانکن

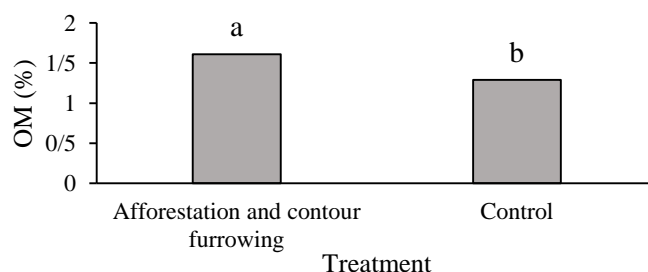
است. نتایج بیانگر تأثیر معنی‌دار عملیات انجام شده در منطقه روی مقدار ماده آلی خاک است؛ به طوری که ماده آلی در مناطق درخت کاری شده و تحت عملیات کننتور فارو با مقدار متوسط ۱/۶۱ درصد به طور معنی‌داری بیش‌تر از منطقه شاهد با میانگین ماده آلی ۱/۲۹ درصد است.

رواناب و در نهایت کاهش فرسایش خاک می‌شود. همچنین عملیات کننتور فارو با افزایش نفوذ آب به درون خاک و کاهش سرعت رواناب باعث افزایش رطوبت خاک و بهبود پوشش گیاهی و در نهایت افزایش ماده آلی خاک می‌گردد. با توجه به اهمیت ماده آلی در تغییرات فرسایش‌پذیری خاک، در شکل (۴) میانگین ماده آلی در منطقه شاهد با منطقه تحت عملیات حفاظتی مقایسه شده



شکل ۳- تأثیر درخت کاری و کننتور فارو روی فرسایش‌پذیری روش ویشمایر و اسمیت (A) و روش واعظی و همکاران (B) در مقایسه با شاهد با استفاده از آزمون دانکن. مقایسه مناطق تحت عملیات حفاظتی (کننتور فارو و درخت کاری) با مناطق بدون عملیات

حفاظتی (شاهد) با استفاده از آزمون t از نظر شاخص فرسایش‌پذیری روش ویشمایر و اسمیت (C) و روش واعظی و همکاران (D). Figure 3. Influence of afforestation and contour furrowing on erodibility by Wischmeier and Smith (A) and Vaezi et al. (B) methods compared to control using Duncan test. Comparison of protected areas (afforestation and contour furrowing) with control using t-test in terms of the erodibility indices obtained by Wischmeier and Smith (C) method Vaezi et al. (D) methods.



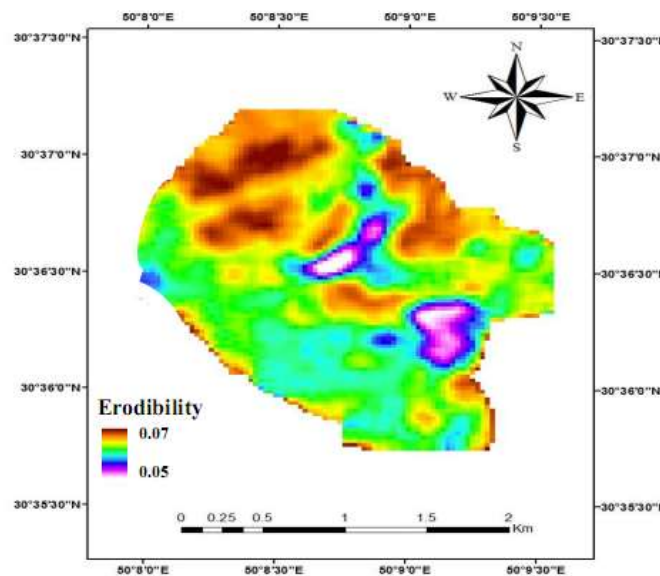
شکل ۴- مقایسه میانگین مقدار ماده آلی در منطقه درخت کاری شده و کننتور فارو با منطقه شاهد بر اساس آزمون t. حروف متفاوت روی ستونها بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد است.

Figure 4. Comparison of means of soil organic matter (OM) using t-test in areas under afforestation and contour furrowing with control area. Different letters on the bars indicate significant difference at the 0.01 probability level.

در نتیجه کاهش ورود ماده آلی به خاک باشد. مقدار خیلی کم فرسایش پذیری در شرق منطقه به دلیل احداث بند در این منطقه و تجمع آب و در نتیجه افزایش رشد گیاهان و افزایش ماده آلی خاک در این محدوده است. لی و همکاران (Li *et al.*, 2008) در پژوهشی در منطقه نیمه-خشک چین نتیجه گرفتند که کنترفارو، باعث کاهش رواناب و افزایش پوشش گیاهی در آن منطقه شده است که با مطالعه حاضر هم‌خوانی دارد. پانام تارانیکول و همکاران (Panomtaranichagul *et al.*, 2005) به این نتیجه رسیدند که کنترفارو به همراه مالچ تأثیر عمده‌ای را در حفاظت آب و خاک و کنترل فرسایش خاک دارد. هم‌چنین نتیجه این تحقیق با مطالعه‌ای که جفری (Jeffrey, 2005) انجام داد و نتیجه گرفت که مقدار حفاظت خاک در منطقه عملیات حفاظتی اختلاف معنی‌داری نسبت به منطقه شاهد داشت، هماهنگی دارد.

توزیع مکانی فرسایش پذیری خاک

به‌عنوان نمونه نقشه توزیع مکانی K به‌دست آمده از روش ویشمایر و اسمیت که توسط مدل RF تخمین زده شده است در شکل (۵) ارائه شده است. این نقشه نشان می‌دهد بیش‌ترین مقادیر فرسایش‌پذیری در مناطق شمال غربی و شمال شرقی منطقه و کم‌ترین مقادیر در بخش‌های شرقی، جنوبی و مرکزی وجود دارد. بر اساس این نقشه، کم‌ترین مقدار فرسایش‌پذیری مربوط به محدوده با انجام عملیات اصلاحی به دلیل برخورداری از پوشش گیاهی و ماده آلی بیش‌تر و بیش‌ترین میزان فرسایش‌پذیری مربوط به منطقه بدون عملیات اصلاحی به دلیل پوشش گیاهی خیلی ضعیف بود. بالا بودن فرسایش‌پذیری در بخش‌های شمال شرقی منطقه با وجود انجام عملیات حفاظتی، می‌تواند به دلیل نزدیکی این قسمت‌ها به جاده منطقه تفریحی چاه ماری و در نتیجه تردد زیاد و استفاده از شاخه‌های درختان و بوته‌های کاشته شده برای سوخت و



شکل ۵- نقشه توزیع مکانی فرسایش‌پذیری خاک به دست آمده از متغیرهای محیطی با استفاده از مدل جنگل تصادفی

Figure 5. Spatial distribution of soil erodibility obtained from environmental variables using random forest model

خطا نشان می‌دهد که تخمین‌های هر دو مدل بر اساس هر دو روش دارای مقداری بیش‌برازش (مقادیر مثبت میانگین خطا) می‌باشند (به‌غیر از تخمین‌های جنگل تصادفی برای مقادیر K به روش A که به‌طور متوسط کم‌برازش شده‌اند).

نتایج ارزیابی کارایی مدل‌ها نشان داد هر چند که بسته به روش تخمین K کارایی دو مدل RF و ANN تا حدودی متفاوت بود، ولی این تفاوت زیاد نبود (جدول ۶)

کارایی مدل‌های مورد استفاده

نتایج مقایسه کارایی مدل‌ها در جدول (۶) آمده است. هر چه آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا کم‌تر و ضریب تبیین بیش‌تر باشد کارایی مدل بیش‌تر است. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که مدل شبکه عصبی مصنوعی عملکرد خوبی را در برآورد فرسایش‌پذیری خاک به روش B و مدل جنگل تصادفی عملکرد بهتری برای پیش‌بینی فرسایش‌پذیری به روش B داشته است. مقادیر میانگین

فرسایش‌پذیری خاک داشت. محمودآبادی و همکاران (Mahmoudabadi *et al.*, 2018) به ارزیابی عملکرد رگرسیون چند متغیره، شبکه عصبی مصنوعی و برنامه-ریزی بیان ژن در تخمین برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک پرداختند و نشان دادند که مدل شبکه عصبی دارای دقت بالاتری بوده است. امیریان چکان و همکاران (Amirian-Chakan *et al.*, 2017, 2019) کارایی خوب ANNs در مدل‌سازی سه بعدی ماده آلی خاک و کارایی بالای RF در مدل‌سازی بافت خاک با استفاده از تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی را تأیید نمودند. این دو پارامتر از عوامل مهم تأثیرگذار روی K هستند.

و هر دو مدل از کارایی نسبتاً بالایی برخوردار بودند. کارایی بالای مدل‌های ANNs به دلیل توانایی آن‌ها در پیدا کردن روابط غیر خطی بین متغیرهای مستقل و وابسته در محیط‌های پیچیده است. کارایی بالای RF به دلیل توانایی بالای آن در پیدا کردن ارتباطات در داده‌های پیچیده و نامنظم و همچنین پایین بودن واریانس تخمین‌ها و ناریب بودن تخمین‌هاست. کارایی این دو مدل در نقشه‌برداری رقومی خاک در مطالعات متعددی تأیید شده است. گل محمدی و همکاران (Golmohamadi *et al.*, 2018) از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی فرسایش‌پذیری خاک‌های منطقه دهگلان استفاده کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که شبکه‌های عصبی مصنوعی دقت لازم را در برآورد

جدول ۶. آماره‌های اعتبارسنجی مدل‌های استفاده شده برای تخمین فرسایش‌پذیری خاک

Table 6. Validation statistics of the used models for predicting soil erodibility

Model	ME	RMSE	R ²
Artificial neural network (Method A)	0.0002	0.004	0.60
Random forest (Method A)	-0.00043	0.000009	0.76
Artificial neural network (Method B)	-0.00001	0.0005	0.70
Random forest (Method B)	0.00009	0.000002	0.66

ME and RMSE are mean error and root mean square error respectively

داد که عملیات کنترل فرسایش خاک روی K به دست آمده از روش ویشمایر و اسمیت تأثیر معنی‌داری داشت و باعث کاهش این شاخص در منطقه حفاظت‌شده گردیده بود. علاوه بر این، بین دو نوع عملیات اصلاحی (درخت‌کاری و کنتور فارو) از نظر شاخص K تفاوت معنی‌داری وجود نداشت که بیانگر تأثیر مشابه آن‌ها بود. این در حالی است که تأثیر این عملیات روی شاخص K به دست آمده از روش واعظی و همکاران معنی‌دار نبود. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق بیانگر کارایی خوب روش-های نقشه‌برداری رقومی خاک در تخمین و مدل‌سازی شاخص K بود. همچنین این نتایج نشان داد که روش تعیین K ممکن است روی تجزیه و تحلیل نتایج تأثیر عملیات حفاظتی و کارایی مدل‌ها تأثیرگذار باشد. بنابراین، بهتر است تجزیه و تحلیل نتایج با احتیاط انجام شود و برای مدل‌سازی، داده‌های به دست آمده از روش-های تجربی (روش‌های ویشمایر و اسمیت و واعظی و همکاران) با داده‌های واقعی اعتبارسنجی شود.

نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و جنگل تصادفی به منظور تخمین و مدل‌سازی فرسایش-پذیری خاک به دست آمده از روش ویشمایر و اسمیت (Wischmeier & Smith, 1987) و واعظی و همکاران (Vaezi *et al.*, 2008) در منطقه چاه‌ماری بهبهان استفاده شد. همچنین تأثیر عملیات حفاظت خاک انجام شده در منطقه روی K مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دو مدل RF و ANN دارای کارایی نسبتاً بالا و دقت نزدیک به هم برای پیش‌بینی و مدل‌سازی K بودند. همچنین نتایج بیانگر کارایی بالای متغیرهای کمکی به‌ویژه متغیرهای به دست آمده از تصویر ماهواره‌ای، در تخمین K بودند. این تحقیق نشان داد که کارایی مدل-های مورد استفاده و متغیرهای کمکی بسته به اینکه از چه روشی برای تخمین K استفاده شود، متفاوت است. میزان تأثیر عملیات کنترل فرسایش خاک روی شاخص K نیز بسته به روش تعیین K متفاوت بود. نتایج نشان

Reference

- 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: 282–290.
- Amini M., Abbaspour K.C., Khademi H., Fathianpour N., Afyuni M. and Schulin R. 2005. Neural network models to predict cation exchange capacity in arid regions of Iran. *European Journal of Soil Science*, 56(4): 551-559.
- Amirian Chakan, A. Taghizadeh-Mehrjardi R., Kerry R., Kumar S., Khordehbin S., and Yusefi Khanghah S. 2017. Spatial 3D distribution of soil organic carbon under different land use types. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189: 131-148.
- Amirian-Chakan A., Minasny B., Taghizadeh-Mehrjardi R., Akbarifazli R., Zahra Darvishpasand Z., and Khordehbin S. 2019. Some practical aspects of predicting texture data in digital soil mapping. *Soil and Tillage Research*, 149, 104289.
- Andronikov V.L., and Dorbrolv'skiy G.V. 1991. Theory and methods for the use of remote sensing in the study of soils. *Mapping Sciences and Remote Sensing*, 28(1): 92-101.
- Arnau-Rosalén E., Calvo-Cases A., Boix-Fayos C., Lavee H., and Sarah P. 2008. Analysis of soil surface component patterns affecting runoff generation. An example of methods applied to Mediterranean hillslopes in Alicante (Spain). *Geomorphology*, 101(4): 595-606.
- Bonilla C.A., and Johnson O.I. 2012. Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. *Geoderma*, 189-190: 116-123.
- Breiman L. 2001. Random forests. *Machine learning*, 45(1): 5-32.
- Dietterich T.G. 2000. An experimental comparison of three methods for constructing ensembles of decision trees: Bagging, boosting, and randomization. *Machine Learning*, 40(2): 139-157.
- Emadi M., Baghernejad M., and Memarian H.M. 2009. Effect of land use change on soil fertility characteristics within water-stable aggregates of two cultivated soils in northern Iran. *Land Use Policy*, 26(2): 452-457.
- Ghasemi A. and Mohammadi J. 2003. Study of spatial variability of soil erodibility (case study of Chaghakhor watershed in Chaharmahal va Bakhtiari Province. *Proceedings of the Eighth Congress of Soil Science of Iran*, pp. 9-12. (In Persian)
- Goodwin L.D., and Leech N.L. 2006. Understanding correlation: Factors that affect the size of r. *The Journal of Experimental Education*, 74: 249-266.
- Goh T.B., and Mermut A.R. 2007. Carbonates. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods and Analysis*. *Canadian Society of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, pp. 215-223.
- Golmohamadi F., Nabiollahi K., Taghizadeh-Mehrjardi R., and Davari M. 2018. Digital mapping of soil erodibility (Case study: Dehgolan, Kurdistan province). *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(6): 87-103. (In Persian)
- Gupta S., and Kumar S. 2017. Simulating climate change impact on soil erosion using RUSLE model - A case study in a watershed of mid-Himalayan landscape. *Journal of Earth System Science*, 126: 43.
- Hengl T., Toomanian N., Reuter H.I. and Malakouti M.J. 2007. Methods to interpolate soil categorical variables from profile observations: Lessons from Iran. *Geoderma*, 140, 417 – 427.
- Hengl T., and Reuter, H.I. 2009. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. 1st Ed. Elsevier, Amsterdam, 765p.
- Hussein M.H., Kariem T.H., and Othman A.K. 2007. Predicting soil erodibility in northern Iraq using natural runoff plot data. *Soil and Tillage Research*, 94(1): 220-228.
- Jafari Honar A., Kiani F., and Khormali F. 2015. Effect of climate difference on variation of loess soil erodibility indices in Golestan province. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(1): 48-70. (In Persian)
- Jeffrey J.Y. 2005. Effect of grazing exclusion on rangeland vegetation and soils. East Central Idaho. *Western North American Naturalist*, 65: 91-102.

- Kamali K., Jafari A., and Eslami M. 2015. The relationship between measured soil erodibility using simulator and Wischmeier nomograph and Bisal method. *Watershed Management Research*, 28(2): 66-72. (In Persian)
- Kouli M., Soupios P., and Vallianatos F. 2009. Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece. *Environmental Geology*, 57(3): 483-497.
- Kulikov M., Schickhoff U., Grongroft A., and Borchardt P. 2020. Modelling soil erodibility in mountain rangelands of south-western Kyrgyzstan. *Pedosphere*, 30(4): 443-456.
- Li X.Y., Zhao W.W., Song Y.X., Wang W. and Zhang X.Y. 2008. Rainfall harvesting on slopes using contour furrows with plastic-covered transverse ridges for growing *Caragana korshinskii* in the semiarid region of China. *Agricultural Water Management*, 95(5): 539-544.
- Mahmoudabadi E., Karimi A., Haghnia G.H., and Sepehr A. 2017. Assessing performance of multivariate linear regression (MLR), artificial neural network (ANN) and gene expression programming (GEP) in estimating soil properties. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(2): 23-44. (In Persian)
- McBratney A.B., Odeh I.O., Bishop T.F., Dunbar M.S., and Shatar T.M. 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, 97(3-4): 293-327.
- McBratney A.B., Santos M.M., and Minasny B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2): 3-52.
- Metternicht G., and Zinck J.A. 1997. Spatial discrimination of salt-and sodium-affected soil surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 18(12): 2571-2586.
- Nield S.J., Boettinger J.L. and Ramsey R.D. 2007. Digitally mapping gypsic and natric soil areas using Landsat ETM data. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1): 245-252.
- Minasny B., McBratney A.B., and Hartemink A.E. 2010. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma*, 155(3-4): 132-139.
- Mohaghegh P., Naderi M. and Mohammadi J. 2016. Determination of minimum data set for assessment of soil quality: A case study in Choghakhur Lake Basin. *Journal of Water and Soil*, 30(4): 1232-1243. (In Persian)
- Nabiollahi K., Haidari A., and Taghizadeh-Mehrjerdi R. 2014. Digital mapping of soil texture using regression tree and artificial neural network in Bijar, Kurdistan. *Journal of Water and Soil*, 28(5): 1025-1036. (In Persian)
- Nield S.J., Boettinger J.L. and Ramsey R.D. 2007. Digitally mapping gypsic and natric soil areas using Landsat ETM data. *Soil Science Society of America Journal*, 71(1): 245-252.
- Ostovari Y., Ghorbani-Dashtaki S., Bahrami H.A., Abbasi M., Dematte A.M., Arthur E., and Panagos P. 2018. Towards prediction of soil erodibility, SOM and CaCO₃ using laboratory Vis-NIR spectra: A case study in a semi-arid region of Iran. *Geoderma*, 314: 102-112.
- Panagos P., Meusburger K., Ballabio C., Borrelli P., and Alewell C. 2014. Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *Science of the Total Environment*, 479: 189-200.
- Panomtaranichagul M., and Nareuba S. 2005. Improvement of water harvesting and anti-erosive cultural practices for sustainable rainfed multiple crop production on sloping land. *Conference on International Agricultural Research for Development, Stuttgart-Hohenheim*.
- Rumpel C., Chabbi A., Nunan N., and Dignac M.F. 2009. Impact of land use change on the molecular composition of soil organic matter. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85(1-2): 431-434.
- Schwab G.O., Frevert R.K., Edminster T.W. and Barnes K.K. 1981. Soil and Water Conservation Engineering. 3rd Ed, John Willey and Sons, New York, USA.
- Shabani F., Kumar L., and Esmaeili A. 2014. Improvement to the prediction of the USLE K-factor. *Geomorphology*, 204: 229-234.
- Soofi M.B., and Emami H. 2017. Evaluation soil erodibility in catchment of Torogh dam of Mashhad. *Journal of Environmental Erosion Research*, 7(3): 25-38. (In Persian)
- Vaezi A.R., Sadeghi S.H.R., Bahrami H.A., and Mahdian M.H. 2008. Modeling the USLE K-factor for calcareous soils in northwestern Iran. *Geomorphology*, 97(3): 414-423.
- Vaezi A.R., Hasanzadeh H., and Cerdà A. 2016. Developing an erodibility triangle for soil texture in semi-arid regions, NW Iran. *Catena*, 142: 221-232.

- Veihe A., 2002. The spatial variability of erodibility and its relation to soil types: a study from northern Ghana. *Geoderma*, 106(1-2): 101-120.
- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1): 29-38.
- Wang G., Fang Q., Wu B., Yang H., and Xu Z. 2015. Relationship between soil erodibility and modeled infiltration rate in different soils. *Journal of Hydrology*, 528: 408-418.
- Wang H., Zhang G.H., Li N.N., Zhang B.J., and Yang H.Y. 2018. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 325(1): 18-27.
- Wischmeier W.H., and Smith D.D. 1978. Prediction Rainfall Erosion Losses. A Guide for Conservation Planning Agriculture. USDA, Agriculture Handbook No. 537.
- Yang X., Gray J., Chapman G., Zhu O., Tulau M., and McInnes-Clarke S. 2018. Digital mapping of soil erodibility for water erosion in New South Wales, Australia. *Soil Research*, 56: 158-170.
- Yousefifard M., Jalaliyan A., and Khademi H. 2007. Estimation of soil and nutrients loss due to land use change using a rainfall simulator. *Journal of Agriculture and Natural Resources*, 40(1): 93-106. (In Persian)
- Zhang K.L., Shu A. P., Xu X.L., Yang Q.K., and Yu B. 2008. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China. *Journal of Arid Environments*, 72(6): 1002-1011.
- Zhou Z.C., Gan Z.T. Shangguan Z.P., and Dong Z.B. 2010. Effects of grazing on soil physical properties and soil erodibility in semiarid grassland of the Northern Loess Plateau (China). *Catena*, 82(2): 87-91.

Soil Erodibility and its Spatial Variation in Areas under Erosion Control Measures in Behbahan Region

Maliheh Jahandideh¹, Alireza Amirian-Chakan^{2*}, Mohammad Faraji³, Masoud Jafarizadeh⁴

(Received: April 2020 Accepted: November 2020)

Abstract

To control soil erosion, several measures can be conducted which information on their effects is very important in managing soil erosion. Therefore, this study was conducted to assess and model soil erodibility in two adjacent sites in Behbahan region (Khuzestan province). At one site afforestation and contour furrowing were conducted to control soil erosion and the other site without any controlling measures was considered as control. Totally 150 soil samples were collected from the surface layer (0-5 cm) and K was estimated using the methods introduced by Wischmeier and Smith (method A) and Vaezi et al. (method B). For spatial modelling of K, based on digital soil mapping (DSM) techniques, several environmental covariates were derived from a Landsat 8 image and a digital elevation model (DEM) and two models including random forests (RF) and artificial neural networks (ANN) were employed. The values of K for methods A and B varied from 0.025 to 0.087 and 0.002 to 0.008 t.ha.h/ha.Mj.mm with means of 0.067 and 0.006 t.ha.h/ha.Mj.mm, respectively. Results revealed good correlation between K and remotely sensed covariates. Although K (method B) had significant correlation with some of the covariates derived from DEM, but there was no significant correlation between K (method A) with all covariates derived from DEM. Results indicated a significant difference between two sites in terms of K estimated by method A, while there was no significant difference in case of K estimated by method B. Model validation showed that both RF and ANN models resulted in good and unbiased estimates of K (methods A and B). In general, the findings indicated, although the performance of DSM techniques in modeling K were high, performances of the models and the results of means comparison may significantly differ in terms of the method through which K is estimated.

Keywords: Digital soil mapping, Machine learning, Soil erosion, Spatial modeling

Jahandideh M., Amirian-Chakan A., Faraji M. and Jafarizadeh M. 2021. Soil erodibility and its spatial variation in areas under erosion control measures in Behbahan region. *Applied Soil Research*, 9(3):73-88.

1. Former MSc Student, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology

2. Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Lorestan University

3. Assistant Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology

4. Senior Expert, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology

* Corresponding Author Email: amirian.ar@lu.ac.ir