

پیش‌بینی تغییرات مکانی شاخص فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از تکنیک نقشه‌برداری رقومی در منطقه کانی سیف شهرستان بانه

اکبر پورشادمان^۱، روح الله تقی زاده مهرجردی^{۲*}، مهدی تازه^۳، کمال نبی الهی^۴

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۶)

چکیده

شاخص فرسایش‌پذیری خاک یکی از پارامترهای تعیین کننده در برآورد میزان فرسایش آبی می‌باشد. بنابراین اطلاع از تغییرپذیری مکانی این پارامتر، کمک بسزایی در مدل‌سازی فرسایش آبی در منطقه دارد. هدف از تحقیق حاضر بررسی تغییرات مکانی شاخص فرسایش‌پذیری خاک (K) با استفاده از تکنیک نقشه‌برداری رقومی خاک در منطقه کانی سیف بانه، استان کردستان می‌باشد. در تحقیق حاضر بر اساس تکنیک هایپرکیوب، محل ۲۱۷ نمونه در منطقه مورد مطالعه به وسعت ۴۰۰۰ هکتار انتخاب گردید و سپس نمونه‌های خاک از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری برداشت شدند و مقادیر درصد آهک، شن، سیلت، رس، وزن مخصوص ظاهری و ماده آلی در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار RETC نفوذپذیری خاک تخمین زده شد و سپس، مقدار K محاسبه گردید. سپس با استفاده از مدل‌های خاک-سیمای سرزمین (Soil-landscape models; SoLIM) و شبکه عصبی مصنوعی، ارتباط بین داده‌های فرسایش‌پذیری خاک و متغیرهای کمکی مستخرج از مدل رقومی ارتفاع و تصویر ماهواره لندست بدست آمد. نتایج نشان داد که مدل خاک-سرزمین (ضریب تبیین و ریشه مربعات خطای ۰/۷۲ و ۰/۰۰۰۱۳) دارای کارایی بالاتری نسبت به شبکه عصبی مصنوعی (ضریب تبیین و ریشه مربعات خطای ۰/۶۷ و ۰/۰۰۰۱۵) در پیش‌بینی شاخص فرسایش‌پذیری خاک می‌باشد. نتایج نشان داد که با استفاده از داده‌های نقطه‌ای، می‌توان برآورد نسبتاً دقیقی از میزان شاخص فرسایش‌پذیری خاک به صورت پیوسته داشت. در نهایت با استفاده از مدل SoLIM اقدام به پهنه‌بندی رقومی فرسایش‌پذیری خاک گردید. و مقادیر آن بین ۰/۰۰۹۵-۰/۰۰۹۴ t.ha/Mj.mm به دست آمد. لذا پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آینده جهت برآورد مکانی شاخص فرسایش‌پذیری خاک، از سایر مدل‌های نقشه برداری رقومی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: تکنیک هایپرکیوب، شبکه عصبی مصنوعی، مدل خاک-سرزمین (SoLIM)

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، استان یزد
 ۲- استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، استان یزد (مکاتبه کننده)
 ۳- استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، استان یزد
 ۴- استادیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان
 * پست الکترونیک: rtaghizadeh@ardakan.ac.ir

مقدمه

فرسایش خاک یکی از مهمترین مشکلات زیست محیطی در اراضی کشاورزی و منابع طبیعی جهان می‌باشد که هم یک سری مشکلات اقتصادی را در پی دارد و هم توسعه پایدار را با مشکل روبرو می‌سازد (Jianping, 1999). شاخص فرسایش‌پذیری خاک بیان کمی و کیفی حساسیت ذاتی ذرات خاک به جاشدن و انتقال به وسیله عوامل فرسایشی است. به عبارتی، یکی از عوامل اصلی و موثر در ایجاد فرسایش آبی و همچنین از عوامل کلیدی دخیل در برخی مدل‌های فرسایش و رسوب مثل USLE¹، فرسایش‌پذیری خاک است که وابستگی زیادی به ویژگی‌های ذاتی خاک دارد. در واقع، فرسایش‌پذیری خاک به عنوان جزء جدا نشدنی فرسایش خاک محسوب می‌شود. بنابراین، با شناخت و ارزیابی این عامل، بهتر می‌توان از طریق راهکارهای اصولی از زیان‌های مختلف فرسایش جلوگیری کرد، یا آن را به حداقل رساند. تاکنون روش‌های متعددی به صورت مستقیم (اندازه‌گیری) و غیرمستقیم (استفاده از مدل) برای تعیین عامل فرسایش‌پذیری خاک معرفی شده‌اند (McBratney *et al.*, 2003). روش‌های مستقیم علی‌رغم دقت مناسب، به سبب وقت‌گیر بودن و جنبه‌های اقتصادی، خیلی زیاد مورد توجه نمی‌باشند. بنابراین، استفاده از مدل‌ها هر روز توسعه بیشتری پیدا می‌کند (Ghorbani Vagheie *et al.*, 2005). همچنین، فرسایش‌پذیری خاک دارای تغییرات مکانی به صورت تدریجی است که در نقشه‌های سنتی معمولاً در نظر گرفته نمی‌شود. جهت مدل‌سازی تغییرات مکانی خصوصیات خاک از جمله فرسایش‌پذیری خاک، تکنیک نقشه‌برداری رقومی خاک معرفی شده است (McBratney *et al.*, 2003). در این فرآیند اطلاعات نقطه‌ای موجود در منطقه مطالعاتی از عامل فرسایش‌پذیری خاک به نقشه‌ای پیوسته تبدیل می‌شود.

نقشه‌برداری رقومی خاک، بیانگر مجموعه‌ای از محاسبات رایانه‌ای برای پیش‌بینی پراکنش خاک‌ها در سیمای سرزمین می‌باشد (Minasny *et al.*, 2010). در نقشه‌برداری رقومی خاک بین واحدهای نقشه، نقاط مطالعه شده و داده‌های توصیفی و آزمایشگاهی مربوط به آن‌ها یک ارتباط پویا شکل می‌گیرد که امکان تغییر، تبدیل،

بهنگام کردن و تجزیه و تحلیل را به سادگی و با سرعت و دقت زیاد فراهم می‌کند. چنین قابلیت‌هایی می‌تواند علاوه بر حفظ و نگهداری داده‌ها، در بخش‌های مدیریتی و ارزیابی و آمایش سرزمین خدمات قابل توجهی ارائه نماید (Scull *et al.*, 2003). همچنین نقشه‌برداری رقومی سامانه‌هایی را برای اطلاعات مکانی خاک گردآوری و ایجاد می‌کند که می‌تواند کاربران را در تصمیم‌سازی برای رسیدگی به مسائل کشاورزی کمک کند. بونیا و جانسون (Bonilla & Johnson, 2012) جهت پهنه‌بندی شاخص فرسایش‌پذیری خاک (K) در کشور شیلی از نقشه‌برداری رقومی استفاده کرده‌اند. همچنین پاناگوس و همکاران (Panagos *et al.*, 2014) جهت برآورد و مقایسه میزان فرسایش‌پذیری خاک در چند کشور مختلف اروپایی از جمله (ایتالیا، سوئیس، پرتغال و ...) از نقشه‌برداری رقومی استفاده نموده‌اند. اوکو و همکاران (Okou *et al.*, 2016) نیز جهت برآورد مکانی فرسایش خاک از تصاویر ماهواره‌ای استر² (ASTER) و مدل رقومی ارتفاع استفاده نمودند و بیان داشتند که در حدود ۲۱٪ از منطقه مورد مطالعه دارای فرسایش کم تا متوسط می‌باشد. به طور مشابه سوتولی و همکاران (Seutloali *et al.*, 2017) نقشه خطر فرسایش خاک را در منطقه جنوب آفریقا با استفاده از تصاویر ماهواره لندست و مدل رقومی ارتفاع در چارچوب نقشه‌برداری رقومی بدست آوردند. مدل‌های مکانی مختلفی در نقشه‌برداری رقومی خاک استفاده می‌شود. به عنوان مثال تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (Taghizadeh-Mehrjardi *et al.*, 2016) جهت پهنه‌بندی ماده آلی از انواع روش‌های داده‌کاوی استفاده نمودند و گزارش دادند که مدل شبکه عصبی مصنوعی دارای دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد. مدل مکانی دیگر SoLIM³ می‌باشد که مدل استنباطی - خاک - سرزمین است و به منظور غلبه بر محدودیت‌های موجود در روش‌های شناسایی سنتی خاک، برای اولین بار توسط ژو و همکاران (Zhu *et al.*, 1996) ارائه شده است. در این مدل، سامانه‌های خبره نیز به کار گرفته می‌شوند. از طرفی، ویژگی‌های محیطی منطقه مورد نظر مانند مدل رقومی ارتفاع و ویژگی‌های آن، در یک پایگاه داده‌های جغرافیایی نگهداری می‌شوند.

2- Advanced Spaceborn Termal Emission Radiometer; ASTER

3- Soil-Land Inference Model; SoLIM

1- Universal Soil Loss Equation

در فرمول جهانی فرسایش خاک، تأثیر هر کدام از عوامل مؤثر در فرسایش خاک را با یک عدد مشخص می‌کنند. از بین تمام فاکتورهای مورد بررسی، پارامتر فرسایش‌پذیری خاک سخت‌ترین و زمان‌برترین عامل از لحاظ اندازه‌گیری می‌باشد. با توجه به این که تخمین عامل فرسایش‌پذیری خاک پیچیده، زمان‌بر و پرهزینه می‌باشد و همچنین دارای تغییرات مکانی می‌باشد، ارائه روشی غیرمستقیم که بتواند برآورد توزیع مکانی شاخص فرسایش‌پذیری خاک را به صورت پیوسته و با دقت قابل قبول انجام دهد، ضروری به نظر می‌رسید. بنابراین بهتر است شاخص فرسایش‌پذیری خاک از طریق نقشه‌برداری رقومی تخمین زده شود. لذا هدف از تحقیق حاضر پیش‌بینی تغییرات مکانی شاخص فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از تکنیک نقشه‌برداری رقومی از طریق مدل SoLIM و مقایسه آن با روش شبکه عصبی مصنوعی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه (کانی سیف) از نظر موقعیت جغرافیائی، با طول جغرافیائی ۴۵ درجه و ۵۳ دقیقه و عرض ۳۵ درجه و ۵۹ دقیقه به وسعت تقریباً ۴۰۰۰ هکتار، از اراضی پایین دست سد کانی سیف در منطقه‌ای کوهستانی و جنگلی به فاصله تقریباً ۲۰ کیلومتری شهرستان بانه در غرب استان کردستان واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع این اراضی بین ۱۷۰۰ تا ۱۴۰۰ متر از سطح دریا متغیر است. منطقه مورد نظر دارای تابستان‌های معتدل و زمستان‌های سرد است و با در نظر گرفتن منحنی آمبروترمیک جزء مناطق استپی سرد محسوب می‌شود. به استناد خلاصه آمار ایستگاه سینوپتیک شهرستان بانه، بارندگی سالانه ۶۹۸/۳ میلی‌متر است. متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۳/۸ درجه سانتی‌گراد، میانگین دمای حداکثر سالانه ۱۸/۶ درجه سانتی‌گراد و میانگین دمای حداقل سالانه ۸/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

در مطالعات متعددی کارایی مدل SoLIM مورد تایید قرار گرفته است. به عنوان مثال، مطالعات ژو و همکاران (Zhu *et al.*, 1996) نشان داد که نقشه‌های تهیه شده توسط مدل SoLIM، نسبت به نقشه‌های حاصل از روش‌های سنتی خاک از صحت عمومی بالاتری برخوردار می‌باشند. از طرفی برآوردهای انجام شده برای ویژگی‌های خاک نیز نشانگر دقت بالاتر مدل SoLIM، نسبت به روش‌های مرسوم بوده‌اند. رنجانی و همکاران (Ranjani, 2008) مدل SoLIM را در حوزه کرکک ایالات چسترپنسلیوانیا ارزیابی نمود که نتایج حاصله نشان داد مدل SoLIM توانست صحت عمومی ۳۷ درصد را در پیش‌بینی سری‌های خاک را کسب کند. در تحقیق مشابه ژو و همکاران (Zhu *et al.*, 1997) با مقایسه مدل سولیم و روش سنتی، به منظور تخمین ضخامت افق A در منطقه کوهستانی غرب مونتانا، نتیجه گرفتند که مدل SoLIM برآورد بهتری از ضخامت افق A نسبت به روش سنتی، در دسترس قرار می‌دهد. چرا که در این منطقه، میانگین واقعی و مشاهده شده برای ضخامت افق A برابر ۱۵/۴۹ سانتی متر بود و برآوردهای مدل سولیم و روش سنتی، به ترتیب برابر ۱۵/۵۸ و ۱۴/۳۹ سانتی‌متر بودند. در ایران نیز در مطالعات مشابهی کارایی بالای مدل SoLIM در تولید نقشه‌های خاک نسبت به روش‌های سنتی نشان داده شده است. از جمله باقری بداغ آبادی و همکاران (Bagheri *et al.*, 2011) در پژوهشی به بررسی کارایی مدل رقومی ارتفاع و مشتقات آن در پیش‌بینی و برآورد کلاس‌های تاکسونومیک خاک و اعتبارسنجی نتایج آن با استفاده از مدل SoLIM در منطقه بروجن استان چهارمحال و بختیاری، از ۱۸ ویژگی مختلف مدل رقومی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که تنها با توجه به مدل رقومی ارتفاع می‌توان در سطح زیرگروه با دقت حدود ۶۵ درصد در درون‌یابی و ۴۰ درصد در تعمیم برون‌یابی نتایج، برآورد درستی از کلاس‌های خاک داشت.

تصاویر با استفاده از نرم افزار ERDAS با استفاده از نقاط کنترل زمینی به روش تصویر به نقشه انجام شد، که در این روش برداشت مختصات نقاط معلوم (تقاطع جاده‌ها، ...) از روی نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ صورت پذیرفت. تعداد ۳۰ نقطه کنترلی برای تصویر ETM^+ انتخاب گردید و میزان RMSE نهایی معادل ۰/۴۲ به دست آمد. عمل نمونه‌گیری مجدد به طریق نزدیک‌ترین همسایه برای باندهای اصلی صورت گرفت. همچنین با استفاده از نرم‌افزار SAGA، شاخص‌های مدل رقومی - ارتفاع (DEM) با اندازه پیکسلی و دقت ۱۰ متری که - شامل: پارامترهای جهت شیب، طول شیب، شاخص خیس، موقعیت نسبی شیب، الگوی خمیدگی^۴، مشخصات خمیدگی^۵، بیشترین خمیدگی^۶ و کمترین خمیدگی^۷ محاسبه گردید. سپس پارامترهای موثر جهت پیش‌بینی عامل فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از آنالیز حساسیت در نرم‌افزار نروسولوشین^۸، به عنوان ورودی هر دو مدل - انتخاب گردیدند که شامل شاخص پوشش گیاهی، جهت شیب، ارتفاع و طول شیب می‌باشند.

مدل‌سازی مکانی

مدل SoLIM

در تحقیق حاضر از رویکرد استنباطی خاک - سرزمین جهت تهیه نقشه رقومی فرسایش‌پذیری خاک منطقه مورد مطالعه تحت نرم‌افزار SoLIM نسخه ۱۰ استفاده گردید (Zhu et al., 1996). این مدل، به طور ساده به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$S = f(E) \quad (2)$$

که در آن، S و E به ترتیب، بیانگر خاک و متغیرهای محیطی هستند و f، نشان‌دهنده رابطه خاک - محیط می‌باشد. بر اساس این مدل، اگر ویژگی‌های محیطی و رابطه خاک - محیط، برای یک موقعیت شناخته شده باشند، آن‌گاه خاک و یا ویژگی‌های آن در منطقه مورد نظر قابل استنتاج خواهند بود. به طور کلی، SoLIM با در نظر گرفتن محیط سازنده هر خاک و روابط خاک - سرزمین (براساس داده خاک و داده‌های محیطی) که توسط

است. در این روش متغیرهای کمکی به دسته‌های یکنواخت تقسیم بندی می‌شوند. روش کار هایپرکیوب به این صورت است که کاربر تصمیم می‌گیرد تا تعداد نمونه مشخصی را استفاده کند. این روش، داده‌های متغیرهای محیطی را به همان تعداد نمونه‌های خواسته به صورت خوشه تقسیم می‌کند و یک نمونه تصادفی از داده‌های ورودی متغیرهای محیطی هر خوشه را انتخاب می‌کند و سعی می‌کند تا پوشش کاملی از هر متغیر را ایجاد کند (Minasny & McBratney, 2006). به طور کلی در پژوهش حاضر، براساس تکنیک هایپرکیوب، ۲۱۷ نمونه از خاک منطقه مورد مطالعه در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری لایه سطحی خاک به وسعت ۴۰۰۰ هکتار برداشت شد (شکل ۱). لازم به ذکر می‌باشد که تعداد نمونه بر اساس مطالعات تفصیلی انتخاب و محل نمونه‌ها بر اساس تکنیک هایپرکیوب تعیین شد. سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه انتقال داده شد و مقادیر آهک، درصد شن، سیلت، رس و ماده - آلی خاک بعد از خشک‌کردن، کوبیدن و عبور نمونه‌ها از الک ۲ میلی‌متری در آزمایشگاه خاکشناسی اندازه‌گیری شد.

در ادامه با استفاده از نرم‌افزار RETC، قابلیت نفوذپذیری خاک منطقه محاسبه و عامل فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از معادله واعظی (۲۰۰۸) محاسبه گردید (رابطه ۱).

$$K = 0.0123 - 5.7 \times 10^{-5} cc - 5.2 \times 10^{-5} TNV - 0.00129 PE \quad (1)$$

که در این رابطه، PE: قابلیت نفوذ پذیری خاک، TNV: آهک، CC: درصد رس و K: فاکتور فرسایش‌پذیری خاک می‌باشند.

تهیه داده‌های کمکی یا محیطی

در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجد ETM^+ مربوط به سال ۲۰۱۳ شهرستان بانه استفاده شد. پس از آماده‌سازی تصویر و رفع خطاها، علاوه بر باندهای ماهواره، شاخص‌های 2SAVI و 1NDVI با استفاده از نرم‌افزار SAGA محاسبه شد. فایل نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای استفاده گردید. تطابق هندسی

4- Curvature Pattern
5- Curvature Specification
6- Curvature Maximum
7- Curvature Minimum
8- Neurosolutions-5

1- Latin hypercube method
2- Normalized Difference Vegetation Index
3- Soil Adjusted Vegetation Index

های نمونه‌برداری شده) به طور تصادفی تقسیم شدند. جهت ارزیابی دقت مدل‌ها، از معیارهای آماری نظیر - میانگین خطای مطلق (MAE)^۲، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۳ و ضریب تبیین (R²)^۴ به ترتیب از روابط (۳)، (۴) و (۵) استفاده شد. در واقع مقدار MAE، معرف دقت روش و مقدار متوسط خطاست و هر چه مقدار آن به صفر نزدیکتر باشد، دقت بیشتر است. RMSE، صحت تخمین را نشان می‌دهد و هر روشی که ریشه میانگین خطای (RMSE) آن کوچک‌تر باشد، صحت آن بیشتر خواهد بود. هر چه ضریب تبیین (R²) به عدد یک نزدیکتر باشد، بیانگر دقت بالاتر مدل به کار رفته است.

$$MAE = \frac{\sum_1^n (X_0 - X_e)}{N} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (X_0 - X_e)^2}{N}} \quad (4)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum (X_e - \bar{X}_e)(X_0 - \bar{X}_0)}{\sqrt{\sum ((X_e - \bar{X}_e)^2 - (X_0 - \bar{X}_0)^2)}} \right]^2 \quad (5)$$

که در این روابط، X_0 و X_e به ترتیب مقادیر فرسایش‌پذیری مشاهداتی و تخمین زده شده، \bar{X}_0 و \bar{X}_e میانگین فرسایش‌پذیری مشاهداتی و تخمین زده شده و N تعداد داده می‌باشند.

تحلیل عدم قطعیت

مدل‌های فرسایش و رسوب خاک به پارامترهای ورودی زیادی نیاز دارند که تعداد آن‌ها با قطعیت کامل معلوم نیستند. به همین دلیل مدل‌ها قادر به توصیف دقیق فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی تحت شرایط طبیعی نمی‌باشند. علی‌رغم توسعه و کاربرد فراوان مدل‌ها، به بررسی اهمیت عدم قطعیت که تغییر پذیری در مقادیر پارامترهای ورودی را پیش‌بینی می‌کند، توجه نسبتاً کمی شده است. بون (Beven, 1993) پیشنهاد کرد که عدم قطعیت باید در فعالیت‌های مدل‌سازی وارد شود. در تحقیق حاضر مقدار پارامترهای متفاوتی که در مدل به کار برده می‌شوند، مدل سعی می‌کند تا مقدار عدم قطعیت پارامترها را به نحوی پیدا کند که اکثر داده‌های اندازه‌گیری شده (در این مطالعه شاخص فرسایش‌پذیری خاک) در ناحیه عدم قطعیت

اطلاعات خاک‌شناسان از منطقه مورد نظر تعریف می‌شوند، اقدام به تشکیل یک پایگاه دانش می‌کند. از طرفی، ویژگی‌های محیطی منطقه مورد نظر مانند مدل رقمی ارتفاع و ویژگی‌های آن در یک پایگاه داده‌های جغرافیایی نگهداری می‌شوند. در این مدل از منطق فازی^۱ جهت ارتباط داده‌های خاک و داده‌های کمکی استفاده می‌شود. به طور کلی، در مناطقی که اطلاعات و دانش مناسبی از روابط خاک-سرزمین موجود باشد، مدل SoLIM برآوردهای قابل قبولی از ویژگی‌های خاک و سرزمین را در اختیار قرار می‌دهد (Zhu et al., 1997).

مدل شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی یک روش شبیه‌سازی می‌باشد که - از مطالعه مغز و شبکه عصبی موجودات زنده الهام گرفته است. شبکه عصبی بر روی متغیرهای ورودی پردازش را بصورت موازی انجام داده و انتقال اطلاعات از یک لایه به لایه دیگر به صورت سری پشت سر هم انجام می‌شود. این شبکه از یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک یا چند لایه بین آن‌ها (لایه مخفی) تشکیل شده است. الگوریتم‌های یادگیری در شبکه‌های عصبی مصنوعی، روندهایی هستند که توسط آن‌ها وزن‌هایی شبکه تنظیم می‌شود. یادگیری شبکه این است که شبکه، رابطه بین ورودی و خروجی را یاد بگیرد و پس از یادگیری به ازای هر ورودی، خروجی مناسب را ارائه دهد. در این تحقیق شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه با یک لایه مخفی که دارای تابع فعال سازی سیگموئید در لایه مخفی و تابع فعال-سازی خطی در لایه خروجی بوده و تعداد نرون‌های آن از ۲ تا ۱۰ نرون متغیر بوده و بهترین تعداد نرون به صورت سعی و خطا تعیین شد، مورد بررسی قرار گرفت. بعد از تعیین داده‌های ورودی و خروجی، ابتدا داده‌های آموزش و تست تعیین می‌شوند، که برای این منظور، داده‌ها باید طوری تعیین گردند که از قبیل برخی معیارهای آماری از قبیل میانگین و واریانس تا حد ممکن شبیه هم باشند.

ارزیابی اعتبار مدل‌ها

برای بررسی دقت مدل جهت تخمین شاخص فرسایش-پذیری خاک، داده‌ها به دو دسته آموزش (۸۰ درصد از داده‌های نمونه‌برداری شده) و آزمون (۲۰ درصد از داده-

2- Mean Absolute Error
3- Root Mean Square Error
4- Coefficient of Determination

1- Fuzzy Logic

مطالعه، برابر با ۰/۰۱۰۵ تن در هکتار بر مگاژول در میلی متر (t.ha/Mjmm) و کمترین مقدار آن برابر با ۰/۰۰۹۰ تن در هکتار بر مگاژول در میلی متر (t.ha/Mjmm) می‌باشد، پارامترهایی از قبیل درصد شن، آهک، قابلیت نفوذپذیری خاک دارای بیشترین ضریب تغییرات می‌باشند، همچنین درصد رس، فاکتور فرسایش‌پذیری خاک و درصد سیلت خاک دارای کمترین ضریب تغییرات می‌باشند. در خاک‌های مناطق نیمه خشک و نیمه مرطوب، آهک نقشی اساسی در پایداری خاکدانه‌ها دارد و ممکن است بر فرسایش‌پذیری (K) اثر بگذارد (Refahi, 1996). با افزایش نفوذپذیری خاک، فرسایش‌پذیری کاهش خواهد یافت همچنین رس به دلیل خاصیت چسبندگی، مانع از جدا شدن ذرات خاک و فرسایش می‌شود (Charman & Murphy 2000).

پیش‌بینی مدل قرار گیرند. بنابراین در ابتدا داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح ۹۵ درصد عدم قطعیت پیش‌بینی قرار می‌گیرند و سپس این عدم قطعیت در گام‌های متوالی کاهش می‌یابد تا این شرط برقرار شود که اکثر داده‌های مشاهده‌ای در سطح ۹۵ درصد عدم قطعیت پیش‌بینی واقع شوند.

بحث و نتایج

خلاصه آماری داده‌های خاک

برای تخمین فاکتور فرسایش‌پذیری با استفاده از معادله واعظی و همکاران (Vaezi et al., 2008) به پارامترهایی از قبیل درصد رس، شن، سیلت، آهک و قابلیت نفوذپذیری خاک نیاز می‌باشد. خلاصه آماری این ویژگی‌ها و فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در جدول (۱) آورده شده است. بیشترین مقدار عامل فرسایش‌پذیری خاک منطقه مورد

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه

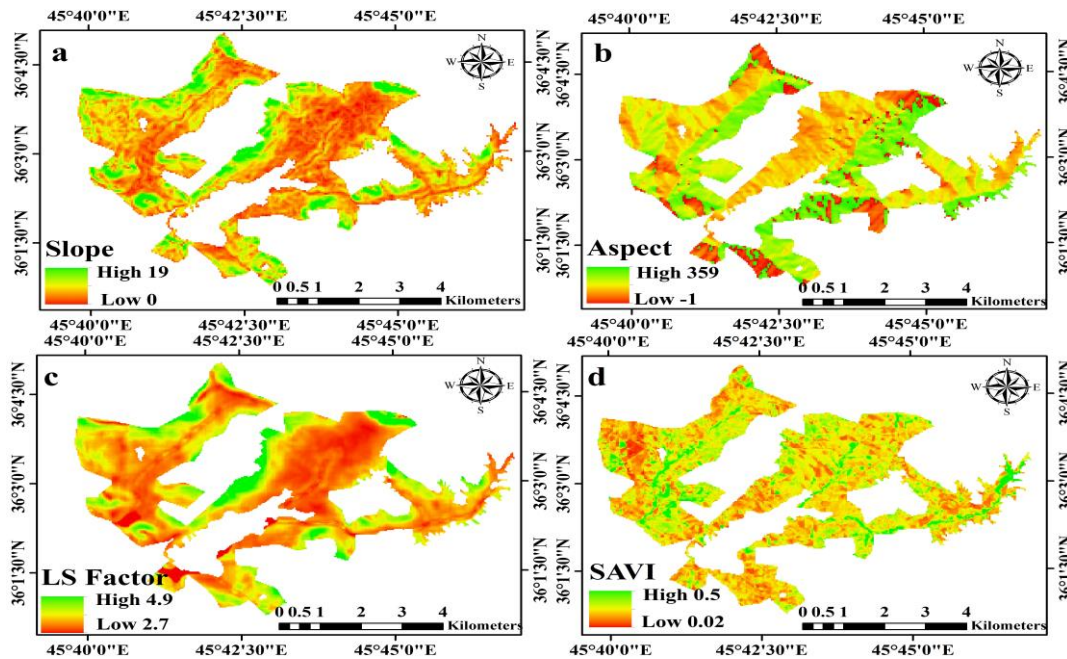
Table 1. Some physical and chemical properties of soils in the studied area

Properties	Min	Max	Mean	StDev	CV
Sand (%)	18	59	29.9	10.8	36
Silt (%)	26	49	39.7	5.1	12
Clay (%)	7	41	30.3	7.3	24
TNV (%)	0	9.5	3.84	1.84	47
PE (cm h ⁻¹)	0.22	1.93	0.54	0.26	48
K (t.h mj ⁻¹ .mm ⁻¹)	0.0090	0.0105	0.0096	0.002	20

بیشترین مقادیر LS در جنوب و کمترین مقدار آن در بخش‌های میانی و شمال غرب منطقه مورد مطالعه مشاهده شد (شکل، c3). از شاخص پوشش گیاهی اصلاح شده (SAVI) نیز می‌توان به عنوان شاخص پوشش گیاهی استفاده کرد چون به زمینه خاک حساسیت ندارد (Huete, 1988). مقدار شاخص پوشش گیاهی (SAVI) در منطقه مورد مطالعه بین ۰/۰۲-۰/۵ متغیر می‌باشد، که بیشترین میزان آن در شمال شرق و کمترین میزان آن در قسمت-های جنوب و شمال غرب منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود (شکل، d3). با توجه به نقشه شاخص پوشش گیاهی، در منطقه مورد مطالعه به دلیل برخورداری از -رطوبت مناسب، پوشش گیاهی از پراکنش نسبتاً مناسبی در سطح منطقه برخوردار می‌باشد، که می‌تواند در کاهش فرسایش‌پذیری خاک نقش بسزایی داشته باشد (شکل، d3).

متغیرهای محیطی مورد استفاده

نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که چهار شاخص محاسبه شده از DEM و تصاویر ماهواره‌ای شامل نقشه طول (مقدار) شیب، جهت شیب، پوشش گیاهی اصلاح شده و شاخص LS، دارای بیشترین اهمیت در تخمین فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (K) بوده و در نتیجه به عنوان ورودی‌های هر دو مدل انتخاب گردیدند (شکل ۳). از بین شاخص‌های مورد بررسی، شاخص جهت شیب دارای بیشترین اهمیت می‌باشد. با توجه به نقشه طول شیب - (شکل، a3)، مقدار شیب بین (۰-۱۹/۵) متغیر می‌باشد. قسمت‌های با شیب صفر کمترین فرسایش و قسمت‌های با شیب زیاد بیشترین فرسایش را ایجاد خواهند کرد. همچنین شیب‌های رو به شمال (شکل، b3)، به علت دریافت نور خورشید کمتر، دارای رطوبت بیشتر می‌باشند و در نتیجه احتمالاً فرسایش کمتری را ایجاد خواهند کرد.



شکل ۳- پراکنش مکانی برخی از متغیرهای محیطی: مقدار شیب (a)، جهت شیب (b)، LS (c)، شاخص پوشش گیاهی خاک (دک) Figure 3. Spatial distribution of some of environmental variables (Slope (a), Aspect (b), LS (c), Savi (d))

برداری رقمی خاک این نتایج قابل قبول می‌باشند، به طوری که ضریب تبیین بالاتر از ۰/۷۰، کم‌تر و ضریب تبیین پایین‌تر از ۰/۵۰، بیشتر معمول می‌باشند (Malone et al., 2009; Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016). چون هنوز تکنیک‌های ارائه شده در نقشه‌برداری رقمی خاک نتوانسته کاملاً با سطح اطمینان بالایی خصوصیات خاک را پیش‌بینی کند و همیشه یک سری پارامترهای ناشناخته وجود دارند که در پایین آوردن دقت مدل نهایی تاثیرگذار هستند. به هر حال این نتایج در نقشه‌برداری رقمی خاک قابل اتکا می‌باشند.

ارزیابی اعتبار مدل‌ها

طبق جدول (۲)، نتایج آماره‌های ارزیابی دو مدل نشان داد که مدل SoLIM بدلیل داشتن RMSE کمتر و ضریب تبیین بیشتر نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی از دقت و کارایی بالاتری برخوردار می‌باشد، که با نتایج ژو و همکاران (Zhu et al., 1997) مطابقت دارد. همچنین مطابق شکل (۴)، پراکنش بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده مدل (SoLIM) شاخص فرسایش‌پذیری خاک دارای ضریب تبیین ۰/۷۲ می‌باشد. به عبارتی هر چه ضریب تبیین به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده کارایی بالاتر مدل مورد استفاده می‌باشد. برای بحث نقشه-

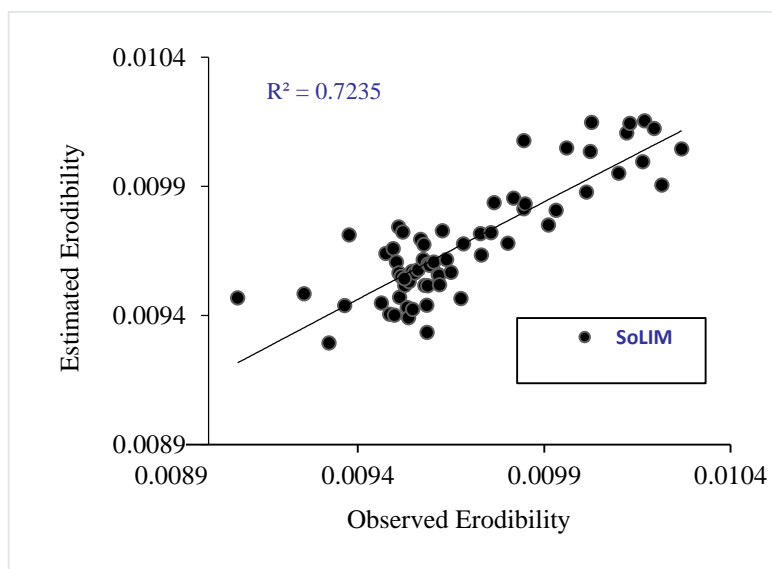
جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل‌های SoLIM و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در پیش‌بینی شاخص فرسایش‌پذیری

Variable	model	MAE	RMSE	R ²
(K-index)	(SoLIM)	0.00009	0.00013	0.72
	(ANN) ¹	0.003	0.00015	0.67

با توجه به جدول (۲)، هرچه مقدار عددی RMSE²، کوچکتر باشد نشان دهنده کارایی بهتر مدل مورد استفاده می‌باشد. According to table 2, the numerical value Root Mean Square Error, Smaller represents better performance the model can be used

1- Artificial neural networks

2- Root Mean Square Error



شکل ۴- رابطه بین مقادیر پیش‌بینی شده عامل فرسایش‌پذیری خاک (SoLIM) و مقادیر مشاهده‌ای (معادله واعظی)
Figure 4. Relationship between the estimated (SoLIM) and observed erodibility factor (Vaezi equation)

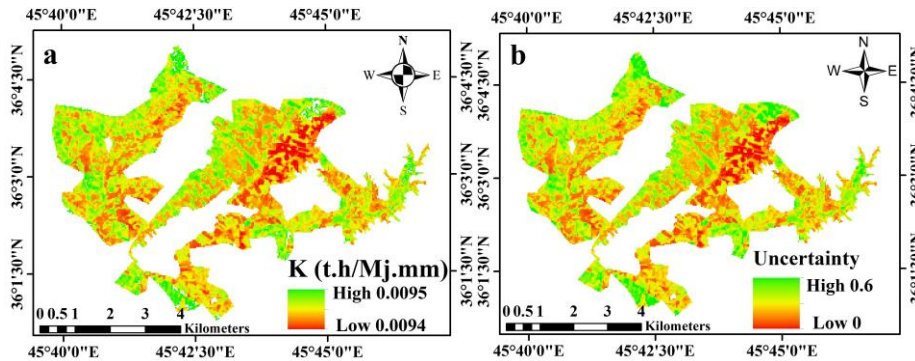
رقومی به تخمین شاخص فرسایش‌پذیری خاک پرداخته- اند سازگاری دارد. زیرا تحقیق حاضر اولین گام استفاده از مدل SoLIM جهت تخمین شاخص فرسایش‌پذیری خاک (K) می‌باشد. همچنین با توجه به شکل (b5) مقادیر عدم قطعیت عامل فرسایش‌پذیری خاک منطقه بین ۰/۰۶-۰ درصد متغیر می‌باشد، به عبارتی مقادیر کم عدم قطعیت، دقت بالای مدل و مقادیر زیاد آن، دقت کم مدل SoLIM را در پیش‌بینی فاکتور فرسایش‌پذیری خاک را نشان می‌دهد (Webb & Lil, 2005. Zhu et al., 1997). همانطور که نقشه‌های SoLIM نشان می‌دهند، بالاترین میزان شاخص فرسایش‌پذیری در دامنه‌های شمال غرب و شرق و کمترین میزان آن در نواحی مرکزی و جنوب غرب مشاهده می‌شود. از طرفی تغییرات تدریجی و پیوسته شاخص فرسایش‌پذیری خاک در سطح منطقه، بخوبی توسط نقشه‌های SoLIM نشان داده شده است (شکل ۵).

نقشه رقومی فرسایش‌پذیری خاک

یکی از رویکردهای نوین شناسایی خاک مدل SOLIM است که با به کارگیری متغیرهای محیطی و با توجه به رابطه خاک (در این پژوهش شاخص فرسایش‌پذیری (K)، که از طریق معادله واعظی و همکاران (Vaezi et al., 2008) محاسبه شد)، محیط می‌باشد. در تحقیق حاضر بعد از اینکه دقت و کارایی بالاتر مدل SoLIM در پیش-بینی شاخص فرسایش‌پذیری خاک نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی مشخص گردید (جدول ۲)، بر اساس داده های کمکی موثر در تخمین شاخص فرسایش‌پذیری خاک (نقشه‌های موجود در شکل ۳)، با استفاده از -مدل SoLIM نقشه فرسایش‌پذیری خاک^۱ (شکل، a5) و نقشه عدم قطعیت^۲ (شکل، b5) منطقه مورد مطالعه تولید گردید. با توجه به شکل (a5)، نقشه نهایی شاخص فرسایش‌پذیری خاک منطقه مورد مطالعه برحسب تن در هکتار بر مگاژول در میلی‌متر با استفاده از مدل سولیم به دست آمده است، که این مقادیر بین ۰/۰۰۹۵-۰/۰۰۹۴ تن در هکتار بر مگاژول در میلی‌متر (t.ha/Mj.mm) متغیر می‌باشند. که با نتایج مطالعات بونیللا و جانسون (Bonilla & Johnson, 2012) و پاناکوس و همکاران (Panagos et al., 2014) که با استفاده از نقشه‌برداری

1- Soil Erodibility map

2- Soil uncertainty map



شکل ۵- نقشه فرسایش‌پذیری (a) و نقشه عدم قطعیت خاک (b)، با استفاده از مدل SoLIM
Figure 5. Erodibility map (a) and soil uncertainty map (b), using SoLIM model

شاخص‌های مذکور دو شاخص پوشش گیاهی و جهت شیب از پارامترهای موثر در فرسایش‌پذیری خاک منطقه محسوب می‌شوند، که در صورت عدم مدیریت صحیح - منجر به فرسایش آبی و هدر رفت بیشتر خاک بخصوص در دامنه‌های شمالی می‌گردند. البته لازم به ذکر است که برای افزایش کارایی مدل SoLIM بهتر است از داده‌های ورودی دقیق‌تر استفاده نمود. به عنوان مثال می‌توان از سایر نقشه‌های رقمی مانند ژئومورفولوژی و زمین‌شناسی استفاده کرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد مطالعه مشابهی برای برآورد میزان فرسایش آبی و فرسایش‌پذیری خاک، در منطقه‌ای با وسعت و تنوع خاکی بیشتر در آینده انجام گیرد.

نتیجه‌گیری کلی

در پژوهش حاضر از مدل SoLIM جهت بررسی تغییرات مکانی شاخص فرسایش‌پذیری خاک در منطقه کانی سیف شهرستان بانه، استان کردستان استفاده گردیده است. نتایج آماره‌های ارزیابی نشان داد که مدل SoLIM نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی دارای ضریب تبیین بیشتر و ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) کمتر در تخمین فاکتور فرسایش‌پذیری خاک می‌باشد. نتایج مدل SoLIM نشان داد که با استفاده از داده نقطه‌ای می‌توان برآورد نسبتاً دقیقی از میزان فرسایش‌پذیری خاک به صورت پیوسته داشت. آنالیز حساسیت پارامترهای کمکی ورودی مدل سولیم که شامل چهار شاخص طول شیب، جهت شیب، پوشش گیاهی و LS می‌باشند، نشان داد که از بین

References

- Beven K.J. 1993. Prophecy, reality and uncertainty in distributed soil erosion modelling. *Advances in Water Resources*, 16: 41-51.
- Bodaghabadi Bagheri M., Salehi, M.H., Mohammadi, J., Toomanian, N., and Esfandiarpour, I. 2011. Efficiency of digital elevation model and its attributes for soil mapping using soil-land inference model (SoLIM). *Journal of Water and Soil*, 5: 123-130. (In Persian)
- Boix-Fayos C., Calvo-Cases A., Imeson A.C., Soriano-Soto M.D., Tiemessen I.R. 1998. Spatial and short-term temporal variations in runoff, soil aggregation and other soil properties along a Mediterranean climatological gradient. *Catena*, 33: 123-138.
- Bonilla C.A., and Johnson O.I. 2012. Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. *Geoderma*, 189: 116-123.
- Charman P.E.V., and Murphy B.W. 2000. Soils (their properties and management). Second edition, Land and Water Conservation, Oxford University Press, 461p.
- Davatgar N. 1998. Study spatial variability of several soil properties. MSc. Thesis. Science

- Department, Faculty of Agricultural Science, University of Tabriz, 98p. (In Persian)
- Ghorbani Vagheie H., and Bahrami H.A. 2005. Spatial changes of USLE and RUSLE soil erodibility index using GIS case study: North East of Lorestan Province. In: Proceedings of the Third National Conference of Erosion and Sediment. Tehran. Iran, 9p. (In Persian)
- Huete A.R. 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25: 295-309.
- Jianping Z. 1999. Soil erosion in Guizhou Province of China: a case study in Bijie Prefecture. *Soil Use Management*, 15: 68-70.
- Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., and Laslett G.M. 2009. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma*, 154: 138-152.
- McBratney, A.B., Mendonça-Santos, M.L., and Minasny, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117: 3-52.
- Minasny B., McBratney A.B., and Hartemink, A.E. 2010. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma*, 155: 132-139.
- Minasny B., and McBratney A.B. 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computer and Geosciences*, 32: 1378-1388.
- Mohammad J. 1998. Rain erosivity map providing for Iran using Fournier Index and Kriging method. *Agricultural Science and Natural Resources Journal*, 4: 35-44. (In Persian)
- Okou, F.A.Y., Tente, B., Bachmann, Y., Sinsin, B. 2016. Regional erosion risk mapping for decision support: A case study from West Africa. *Land Use Policy*, 56: 27-37.
- 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.
- Ranjani W. 2008. Automated soil land inference model (SoLIM) Under Fuzzy Logic in the Kareec Basing. *Ecological Modeling*, 90: 123-145.
- Refahi H. 1996. Water Erosion and Control, No.1. Tehran University Press, 674p.
- Scull P., Franklin j., Chadwick O.A., and McArthur D. 2003. Predictive soil mapping: a review. *Progress in Physical Geography*, 27: 171-197.
- Seutloali, K.E., Dube, T. and Mutanga O. 2017. Assessing and mapping the severity of soil erosion using the 30-m Landsat multispectral satellite data in the former South African homelands of Transkei. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 100: 296-304.
- Taghizadeh-Mehrjardi R., Nabiollahi K. and Kerry R. 2016. Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran. *Geoderma*, 266: 98-110.
- Triantafilis J., and Buchanan S.M. 2010. Mapping the spatial distribution of subsurface saline material in the Darling River valley. *Journal of Applied Geophysics*, 70: 144-160.
- Vaezi A., Sadeghi S.H., Bahrami H., Mahdian M. 2008. Modeling the USLE K-Factor for Calcareous Soils in Northwestern Iran. *Geomorphology*, 97: 414-423.
- Webb T.H., and Lilburne L.R. 2005. Consequence of soil map unit uncertainty on environmental risk assessment. *Australian Journal of Soil Research*, 43: 119-126.
- Zhu A. 1997b. Measuring uncertainty in class assignment for natural resource maps under fuzzy logic. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63: 1195-1202.
- Zhu A., Band L., Vertessy R., and Dutton B. 1997. Derivation of soil properties using a soil land inference model (SOLIM). *Soil Science Society of America Journal*, 61: 147-159.
- Zhu A.X. 1996. A similarity model for representing soil spatial information. *Geoderma*, 77: 217-242.

The Prediction of Spatial Variability of Soil Erodibility Index Using Digital Mapping Technique in Kanisef Region, Baneh

A. Poorshademan¹, R. Taghizadeh-Mehrjardi^{2*}, M. Tazeh³, K. Nabiollahy⁴

(Received: October 2016

Accepted: February 2017)

Abstract

Soil erodibility (K) index is one of vital parameters in water erosion prediction. Therefore knowledge about spatial variability of this parameter (K) can significantly help in the modeling of water erosion in area of interest. Our purpose was to predict spatial variability of soil erodibility index using digital soil mapping technique in Baneh region (Kanisef area), Kurdistan Province. In this study, based on hypercube sampling methods, 217 sampling sites were selected in area of 4000-ha and then soil samples were collected from depth 0-30 cm and some soil properties (i.e. calcium carbonate equivalent, clay, silt, sand, surface special weight and soil organic carbon) were determined. Using RETC software soil infiltration values were obtained and then K factor was calculated according to Vaezi equation. Then, the relationship between K factor and ancillary covariates derived from DEM and Landsat image was obtained by land-soil models (Solim) and artificial neural network. Result showed that Solim model (R^2 and RMSE 0.72 and 0.00013, respectively) have higher performance than artificial neural network (R^2 and RMSE 0.67 and 0.00015, respectively) for soil erodibility index prediction. Our result also showed it is possible to map soil erodibility index continuously with reasonable accuracy. Finally digital map of K factor was prepared using Solim model in the study area. The digital map of K factor obtained by Solim indicated ranging of soil erodibility from 0.0094 to 0.0095 ton.ha/Mj.mm. We recommend prediction of spatial variation of K factor by the other digital soil mapping techniques.

Key words: Artificial neural network (ANN), Hypercube technique, Land-soil model (SOLIM)

1- MSc Student Natural Resources, Ardakan University. Yazd province.

2- Assistant professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University.

3- Assistant professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University.

4- Assistant professor, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan.

* Corresponding author Email: rtaghizadeh@ardakan.ac.ir