

مقایسه روش‌های درون‌یابی به‌منظور پهنه‌بندی میزان فرسایش بادی با مدل USEPA

اسماعیل مرادی و داود نامدار خجسته^{*۱}

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۱۵)

چکیده

فرسایش بادی یکی از مشکلات زیست‌محیطی در کشور به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور است. طی سالیان اخیر روش‌ها و مدل‌های مختلفی برای برآورد و پهنه‌بندی میزان فرسایش بادی ارائه شده است. یکی از مدل‌های معتبر تخمین میزان فرسایش بادی روش USEPA است. هدف از این مطالعه ارزیابی کمی میزان فرسایش بادی با مدل ذکر شده و مقایسه روش‌های مختلف درون‌یابی برای تهیه نقشه فرسایش خاک با دقت بالا است. برای این هدف از منطقه مورد مطالعه ۵۰ نمونه از عمق ۰-۳۰ برداشت شد. پس از آنالیزهای خصوصیات فیزیکی خاک از جمله توزیع اندازه ذرات اولیه و ثانویه، پارامترهای اقلیمی از جمله میزان تبخیر و تعرق، میزان بارندگی، سرعت باد و همچنین با توجه به ویژگی‌های پوشش گیاهی و توپوگرافی منطقه، میزان فرسایش Q، Q30 و Q50 برآورد شد. برای تهیه نقشه فرسایش روش‌های درون‌یابی از جمله کریجینگ معمولی و عام، IDW، LPI و RBF با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار فرسایش شاخص Q50 با میزان ۳۹ تن در هکتار در سال است. کمترین و بیشترین میزان فرسایش ذرات در شاخص Q30 به ترتیب ۰/۰۶۰ و ۲/۶۹۴ تن در هکتار در سال برای شاخص Q به ترتیب ۰/۰۰۹ و ۰/۰۵۵ تن در هکتار در سال است. نتایج همچنین نشان داد که روش IDW برای پارامتر Q50 با مقادیر کمترین میزان خطا (RMSE) ۳/۹۴ و میانگین خطای مطلق (MAE) با مقدار ۱/۸۹ بهترین عملکرد را بین مدل‌های مورد بررسی داشت. در رابطه با شاخص Q مدل LPI با کمترین میزان خطا (۰/۰۰۸۶) و کمترین خطای مطلق (۰/۰۰۲۱) بهترین عملکرد را داشت.

واژه‌های کلیدی: پراکنش مکانی، کریجینگ، درون‌یابی، فرسایش بادی

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: d.namdarkhojasteh@shahed.ac.ir

مقدمه

فرسایش یکی از مهم‌ترین مشکلات تخریب در اکوسیستم‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است (۱۸). فرسایش بادی توسط باد زمانی رخ می‌دهد که سرعت باد از آستانه فرسایش سطح خاک خشک بیشتر شود و همچنین سطح زمین به وسیله پوشش گیاهی، پستی و بلندی‌های زمین یا موانع دیگر حفاظت نشده باشد (۳). هنگامی که مناطق پهناور در چشم‌اندازهای مسطح در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل آتش‌سوزی، خشکی یا مدیریت ناصحیح بدون پوشش شوند، فرسایش بادی به مشکلی عمده تبدیل خواهد شد. باد عاملی مؤثر در جداسازی، جابه‌جایی و رسوبگذاری مقادیر عظیم مواد سست خاک سطحی است و ناهمواری‌های وسیع لسی و تپه‌های ماسه‌ای بزرگ در همه قاره‌ها شاهدی بر این موضوع است (۱۳). همچنین باد به علت نیروی قوی و عملکرد در سطح وسیع و نیز مساعد بودن شرایط مناطق خشک و بیابانی باعث می‌شود که میزان رسوب دهی در چنین مناطقی گاه چندین برابر فرسایش آبی باشد (۲). فرسایش بادی و گرد و غبار باعث به وجود آمدن مشکلات متعددی در حوزه‌های کشاورزی، سلامت، محیط زیست، صنعت و غیره می‌شوند (۱۷). برای تهیه داده کمی میزان فرسایش بادی نیاز به مدل دقیق برآورد میزان فرسایش بادی است. مدل‌های و روش‌های فرسایش بادی ابزارهای مهمی برای ارزیابی میزان فرسایش پذیرنده خاک، شناسایی شیوه‌های مدیریت برای کنترل فرسایش و گرد و غبار هستند (۱، ۷ و ۱۴). در چند دهه گذشته تلاش‌های مستمری برای ارائه مدل‌ها و روش‌هایی از جمله USEPA, WEPS, IRIFR, WEQ در اندازه‌گیری میزان فرسایش بادی و منشأ یابی گرد و غبار در اراضی کشاورزی انجام گرفته است (۱۴). روش‌ها و مدل‌های تجربی دارای معایب و خطاهایی در اندازه‌گیری فرسایش بادی بوده، لذا این روش‌ها در شرایط خاصی استفاده می‌شوند (۱۵). یکی از روش‌های به نسبت جدیدی که برای اندازه‌گیری میزان فرسایش بادی و منشأ یابی گرد و غبار بسیار مورد توجه پژوهشگران کشور بوده،

روش USEPA است. روش USEPA یکی از روش‌های جدید است که توسط آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده آمریکا مشهور به EPA ابداع شده است. سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا، یک سازمان دولتی بوده که از ۱۹۷۰ تاکنون مسئولیت کنترل و توسعه قوانین و سیاست‌های رسمی دولت در محافظت از محیط زیست در ایالات متحده آمریکا را بر عهده داشته است.

علاوه بر تعیین کمی میزان فرسایش، آگاهی از میزان فرسایش در منطقه با تهیه نقشه‌های بحرانی و فوق بحرانی فرسایش بادی در منطقه برای برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های حفاظت از خاک ضرورت دارد. تهیه و جمع‌آوری اطلاعات از میزان فرسایش خاک و به عبارتی پهنه‌بندی پتانسیل فرسایش اهمیت فراوانی دارد. برآورد نزدیک به واقعیت مقدار فرسایش و رسوب در یک منطقه موضوع مهمی است که همواره چگونگی برآورد آن مورد توجه پژوهشگران بوده است. به منظور بسط و گسترش اطلاعات میزان فرسایش به دست آمده با استفاده از مدل‌های فرسایشی و همچنین تغییرات زمانی و مکانی فرسایش بادی، نیاز به مدل‌هایی درونیابی است که بتوان رفتار متغیر مورد بررسی را در نقاط مجهول شبیه‌سازی کرد. در برخی از این مدل‌ها نظیر تیسن، فقط بر اساس مقادیر متغیر و با فرض استقلال آنها، تخمین آنها در موقعیت مجهول صورت می‌گیرد. در نوع دیگری از مدل‌ها احتمالاتی که به آنها روش‌های زمین‌آماري اطلاق می‌شود (مانند کریجینگ) اطلاعات و موقعیت مکانی داده‌ها نیز در محاسبات وارد شده و سعی می‌شود تا رابطه‌ای نیز بین آنها تعریف شود. معمولاً این ارتباط و همبستگی بین نمونه‌ها به صورت یک مدل ریاضی ارائه می‌شود. این نوع روش‌ها برای متغیرهایی کاربرد دارند که بتوان برای آنها، همبستگی مکانی را تعریف کرد (۱۵). زارع و همکاران (۲۳) در مطالعه ارزیابی روش‌های درونیابی در تخمین شاخص فرسایش‌پذیری به این نتیجه رسیدند که روش کریجینگ ساده و جهانی با مدل کروی و گوسی بهترین نتیجه را دارد. از لحاظ شاخص MAE, MBE, RMSE روش

کشاورزی، اراضی تاغ‌کاری شده، شوره‌زارهایی با پوشش کم، پهنه‌های ماسه‌ای و دشت ریگی است (۱۲). بعد از بازدید میدانی از منطقه مورد مطالعه و مطالعات مقدماتی، نمونه‌برداری از منطقه به صورت تصادفی منظم (سیستماتیک) شده از ۵۰ نقطه از سطح منطقه مورد مطالعه (جنوب روستای دلازیان در سمنان) در سال ۱۳۹۶ انجام گرفت (شکل ۱). بعد از نمونه‌برداری، آزمایش‌های توزیع اندازه ذرات، بافت خاک و شوری روی نمونه‌ها انجام گرفت.

آزمایش‌های بافت و توزیع اندازه ذرات

اندازه‌گیری بافت خاک به روش هیدرومتر (۵) برای اندازه‌گیری میانگین قطر ذرات (MWD) از دستگاه الک خشک استفاده شد. از هر نمونه خاک، ۱۰۰ گرم توزین و در دستگاه الک خشک با ترتیب الک‌های از بالا به پایین (الک ۴، ۲، ۱، ۰/۰۷۵، ۰/۰۶۳ میلی‌متر) قرار داده شد. در نهایت بعد از ۱۵ دقیقه، خاک باقی مانده روی الک‌ها توزین شدند (۱۱).

تهیه داده‌های هواشناسی و اقلیمی

داده‌های اقلیمی از جمله تبخیر، سرعت باد، بارندگی و دما در استان سمنان از ایستگاه‌های سینوپتیک دامغان، سمنان، شاهرود، گرمسار، میامی، شه‌میزاد و بیارجمند تهیه شد. با توجه به نقشه تیسن تهیه شده برای کل استان (شکل ۲)، منطقه مورد مطالعه در محدوده ایستگاه سمنان قرار گرفت و از داده‌های ایستگاه سینوپتیک سمنان برای ارزیابی مدل استفاده شد.

اندازه‌گیری و محاسبه گرد و غبار با استفاده از روش سازمان

حفاظت محیط زیست آمریکا (USEPA)

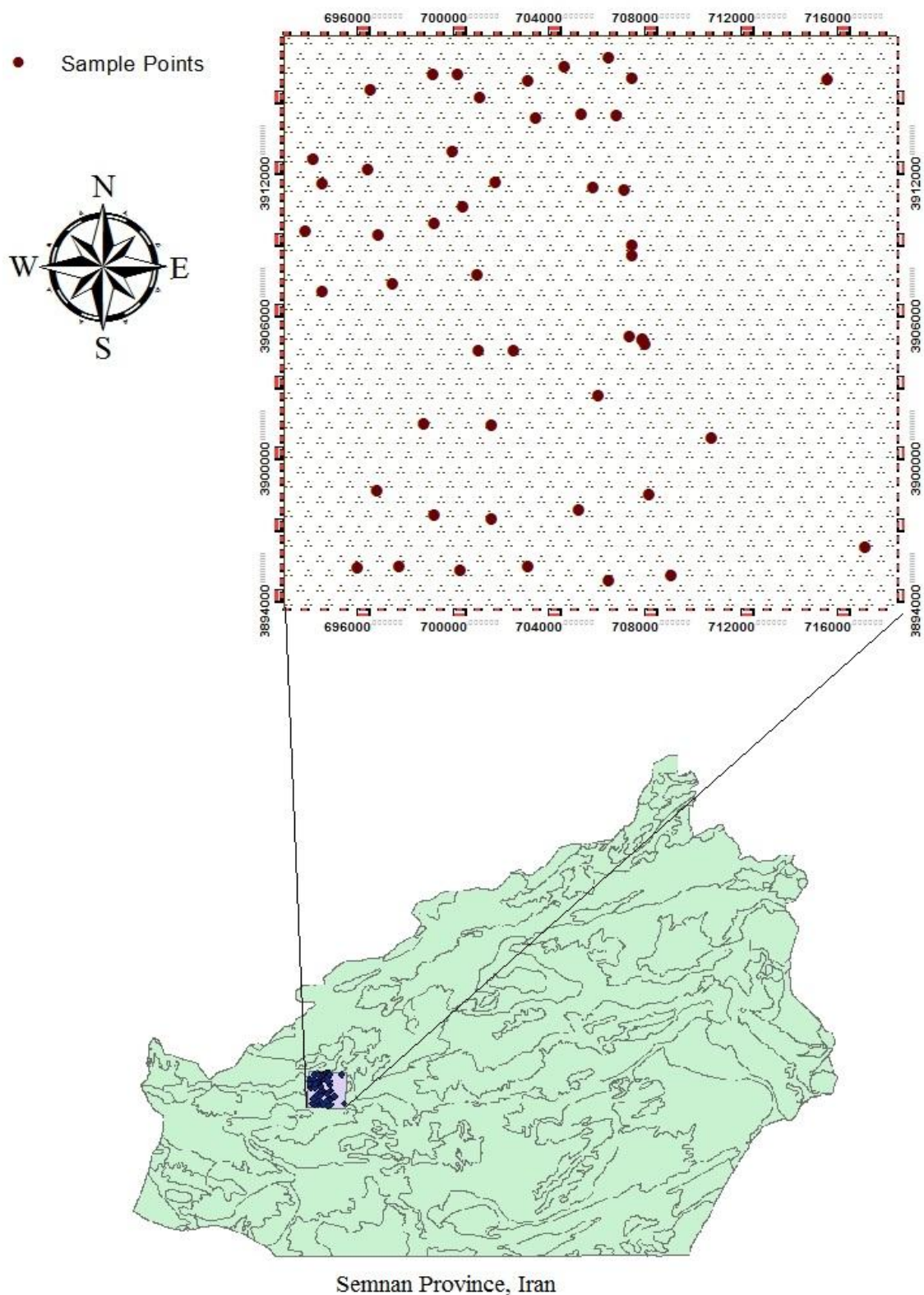
در سال‌های اخیر اندازه‌گیری میزان هدررفت خاک با استفاده از روش USEPA، به‌عنوان یک روش جدید توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا ارائه شده است. در این روش با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی خاک، اقلیم و توپولوژی منطقه میزان هدررفت خاک برای ذرات با اندازه‌های مختلف

کریجینگ معمولی دارای صحت بیشتر و خطای کمتری است. عظیم‌زاده و همکاران (۴) از روش کریجینگ برای تخمین درصد سنگفرش بیابانی و سرعت آستانه فرسایش بادی استفاده کردند. نتایج محققین نشان داد که استفاده از روش کریجینگ معمولی شیوه مناسب و دقیق برای تهیه نقشه است. صارمی و همکاران (۱۶) در تحقیقی با پهنه‌بندی مقادیر سرعت آستانه فرسایش بادی با زمین آمار به این نتیجه رسیدند که روش کریجینگ نسبت به IDW روش مناسب‌تری است. واعظی و همکاران (۲۰) با مقایسه تغییرپذیری مکانی عامل فرسایش‌پذیری خاک برآورد شده و اندازه‌گیری شده در مدل USLE در شمال غربی ایران به این نتیجه رسیدند که مدل مناسب‌ترین مدل برای تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری برآورد و اندازه‌گیری شده است. در این مطالعه برای بررسی پراکنش مکانی میزان فرسایش به‌دست آمده از روش‌های درون‌یابی زمین‌آمار و غیر زمین‌آمار با توجه به آنالیز اولیه آماری داده‌ها با هم مقایسه شدند. با توجه به مطالب گفته شده، اندازه‌گیری دقیق و کمی میزان هدررفت خاک با مدل مذکور برای کنترل و منشأیابی فرسایش بادی و گرد و غبار امری ضروری است. هدف از این پژوهش ارزیابی میزان فرسایش بادی در منطقه با مدل USEPA و تهیه نقشه میزان فرسایش با مدل‌های زمین‌آمار و منطقی است.

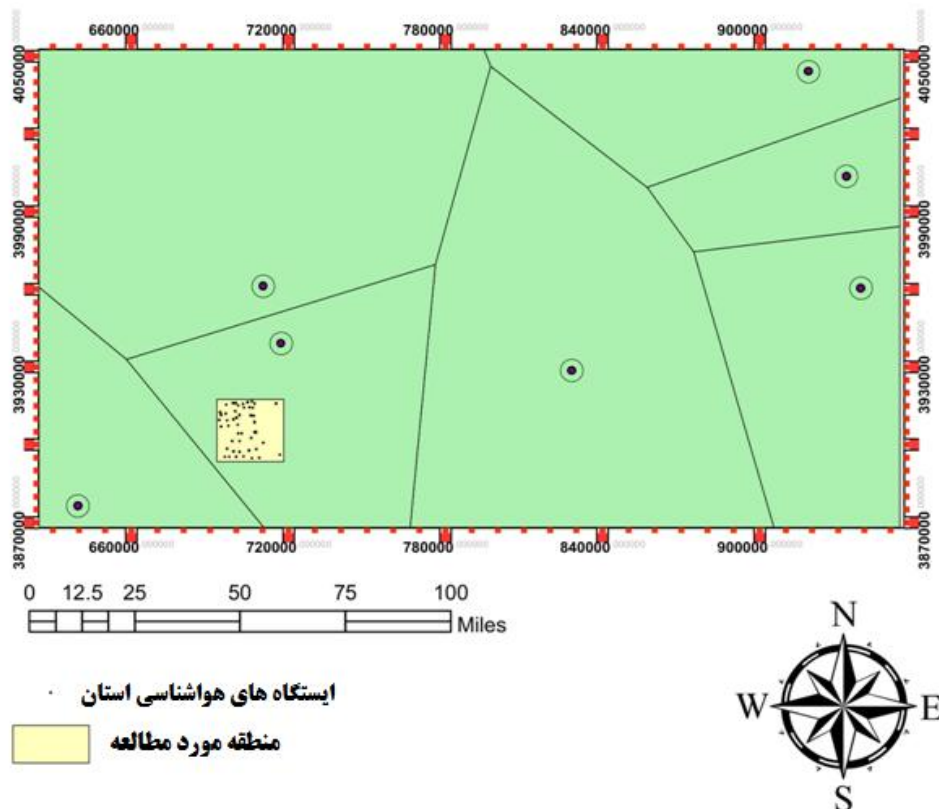
مواد و روش‌ها

مشخصات کلی منطقه مورد مطالعه

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه با مساحتی بیش از ۶۱۰۰۰ هکتار، در استان سمنان و در شمال کویر مرکزی ایران (دشت کویر) و جنوب روستای دلازیان قرار دارد. اقلیم منطقه با استفاده از روش آمیژه جزء مناطق اقلیم خشک و سرد است. در قسمت عمده کویر پوشش گیاهی بسیار ضعیف و بیشتر گیاهان خشکی‌پسند و شورپسند قابل مشاهده است. منطقه یک دست، دارای تپه‌های فرسایش یافته در جاهایی از منطقه تلماسه های نباتی دیده می‌شود. بخش کوچکی از منطقه دارای اراضی



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه در استان سمنان



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها در استان سمنان

(۳) به‌دست آمد:

$$PE = 300 \frac{P}{E} \quad (۳)$$

که در آن: P میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر) و E میانگین تبخیر از تشتک سالانه است.

برای اندازه‌گیری Q_{30} (فرسایش ذرات PM_{30} برحسب تن در هکتار در سال) و Q_{50} (فرسایش ذرات PM_{50} برحسب تن در هکتار در سال) از معادلات ۴ و ۵ استفاده شد:

$$Q_{30} = 0.2058ec_{75}fPE^{-2} \quad (۴)$$

$$Q_{50} = ec_{50}KCLVA \quad (۵)$$

که در آنها: c_{75} و c_{50} به‌ترتیب درصد وزنی ذرات کوچک‌تر از ۷۵ و ۵۰ میکرون و همچنین f نسبت سرعت آستانه سرعت باد (نسبت به سرعت باد بیشتر از ۵/۴ متر بر ثانیه) است. بنابراین می‌توان گفت فرسایش بادی (بیشتر گرد و غبار) عمدتاً روی ذراتی عمل می‌کند

به‌صورت کمی محاسبه می‌شود (۲۲).

برای اندازه‌گیری و محاسبه گرد و غبار معادله ۱ ارائه شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا استفاده شد (۲۳):

$$Q = ceKCLVA \quad (۱)$$

که در آن: Q مقدار فرسایش در سطح A هکتار (برحسب تن بر هکتار در سال)، c مقدار کل ذرات معلق، e پارامتر فرسایش‌پذیری خاک (اطلاعات بیشتر در مورد نحوه محاسبه پارامترهای c و e در مطالعات ژان (۲۴) ارائه شده است). V نشان‌دهنده ضریب پوشش گیاهی و L عامل عرض، K ضریب زبری سطح و C عوامل اقلیمی است که از معادله ۲ به‌دست آمد (۲۳):

$$C = \frac{0.504U^3}{PE^2} \quad (۲)$$

که در آن: U میانگین سرعت سالانه باد (برحسب متر بر ثانیه)، PE پارامتر بارش-تبخیر است که مقدار PE با استفاده از معادله

که قطر آنها کمتر از ۵۰ میکرون یا ۰/۰۵ میلی متر است (۲۳) و (۲۴).

بررسی توزیع، همبستگی و رگرسیون متغیرها

قبل از انتخاب روش مناسب برای درون‌یابی داده‌ها، ابتدا تجربه و تحلیل داده‌ها با شاخصه‌های آماری محاسبه شد. نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و نمودار q-q بررسی شد. در ابتدا پارامترهای آمار کلاسیک، کمینه، بیشینه، میانگین، چولگی، کشیدگی، ضریب تغییرات داده‌ها برای خصوصیات فیزیکی خاک، عوامل اقلیمی و مقدار فرسایش خاک منطقه به دست آمد. پارامترهای آمار کلاسیک با استفاده از نرم‌افزار SPSS ورژن ۲۲ به دست آمد. آمار کلاسیک رابطه و همبستگی بین مقادیر دو متغیر، بدون در نظر گرفتن موقعیت مکانی داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل اولیه داده‌ها برای انتخاب بهترین مدل و روش درون‌یابی و همچنین تهیه نقشه کاربرد زیادی دارد.

نیم تغییرنما

همان‌طور که گفته شد برای مدل کردن همبستگی مکانی متغیرهای مورد بررسی از تغییرنما استفاده شد. نقاط این نمودار بر اساس زوج نقاطی صورت می‌گیرد که به فاصله معینی از یکدیگر قرار دارند و از طریق معادله (۶) زیر قابل محاسبه است:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2(N-h)} \sum_{i=1}^{n-h} [z(x+h) - z(x)]^2 \quad (6)$$

در این رابطه $\gamma(h)$ مقدار تغییرنما، N زوج مشاهدات، $Z(x)$ و $Z(x+h)$ مقدار متغیر در دو نقطه با فاصله h از هم قرار دارند (۸). تغییرنما رابطه واریانس و داده‌ها را نشان می‌دهد و با سه پارامتر استخراج شده از آن می‌توان تغییرات مکانی را مورد بررسی قرار داد. پارامتر آستانه که بیشترین مقدار تغییرنما را به خود اختصاص می‌دهد، در واقع همان واریانس مکانی متغیر مورد بررسی است. دامنه تأثیر بیانگر شعاع همبستگی

نقاط با یکدیگر بوده و در خارج این فاصله رفتار نقاط تصادفی خواهد بود. پارامتر اثر قطعه‌ای واریانس خطای نمونه برداری را نشان می‌دهد و همچنین مشخصه تصادفی بودن متغیر مورد بررسی است (۸). برای این تحقیق تغییرنما برای راستهای اصلی صفر، ۴۵، ۹۰ و ۱۲۳ درجه ترسیم شد تا راستایی که بیشترین همبستگی مکانی وجود دارد مشخص شود. با توجه به وجود ناهمسانگردی در برخی پارامترها از تغییرنمای همه جانبه که بیانگر متوسط تغییرات در تمام جهت‌ها است برای تشریح پیوستگی مکانی استفاده شد. لازم به ذکر است که نیم تغییرنما بر اساس مدل‌های کروی، گوسی، نمایی و خطی ترسیم شد. انتخاب گام (Lag) در نرم‌افزار GIS بر اساس متوسط فاصله بین نقاط و نیم تغییرنما بدون جهت صورت گرفت. وجود یا عدم وجود روند در داده‌ها با استفاده از ترسیم نیم تغییرنما بررسی شد. به منظور انتخاب مناسب ترین مدل برازش داده شده به نیم تغییرنمای تجربی از اعتبارسنجی مقاطع استفاده شد. مدلی که داری خطای کمتر، ساختار پذیری بالاتر به عنوان مدل برتر انتخاب شد (۲۵).

انتخاب روش‌های درون‌یابی برای ترسیم نقشه

انتخاب بهترین روش درون‌یابی در واقع نوعی آزمون هزینه منفعت بین کارایی و پیچیدگی مدل است. اکثر روش‌های درون‌یابی از یک رابطه برای محاسبه نقاط مجهول استفاده می‌کنند. تفاوت روش‌های مختلف درون‌یابی، در وزن اختصاص داده شده به هر نقطه است. روش‌های درون‌یابی مورد استفاده به منظور درون‌یابی ویژگی‌های گفته شده در این تحقیق شامل مدل‌های زمین‌آماري کریجینگ معمولی (Ordinary Kriging) (OK) و کریجینگ عام (Universal Kriging) (UK) و مدل‌های قطعی شامل روش تابع شعاعی (Radial Basis Function) (RBF)، روش فاصله وزنی معکوس (Inverse Distance Weighting) (IDW) و روش چندجمله‌ای محلی (Local Polynomial Interpolation) (LPI) هستند. در این مرحله بر اساس روند داده‌ها، نرمال بودن و ساختارپذیری بودن مدل مناسب برای درون‌یابی انتخاب شد.

$$\sum_{i=1}^n W_i [F(x_i, y_i) - Z_i]^2 = \text{Minimize} \quad (8)$$

کریجینگ معمولی (OK)

این روش تخمین‌گری است که مقادیر یک متغیر را در نقاط نمونه‌برداری نشده به صورت ترکیب خطی از مقادیر همان متغیر در نقاط اطراف آن در نظر می‌گیرد. برآورد مقدار Z در نقطه x_0 به وسیله این روش به صورت معادله ۹ بیان می‌شود:

$$Z_{OK}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (9)$$

که در این معادله $Z^*(x_0)$ و λ_i به ترتیب تخمین متغیر در نقطه x_i و وزن‌های آماری اختصاص یافته به مقادیر Z در نقاط x_i و n تعداد نمونه به کار رفته در کریجینگ است (۲۱).

کریجینگ عام (Universal Kriging)

در کریجینگ ساده مقدار میانگین متغیرها در منطقه ثابت فرض می‌شود. در بعضی حالت‌های کاربردی، میانگین محلی در منطقه مورد مطالعه متغیر است. کریجینگ عام دربرگیرنده حالت‌هایی است که در آن میانگین محلی متغیر است. در این روش تغییرات میانگین نسبت به مکان در نظر گرفته شده و روند یک ترکیب خطی نامعلوم از توابع معلوم است. در این روش فرض بر این است که علاوه بر مؤلفه همبستگی مکانی بین نقاط، انحراف یا روند نیز در مقادیر Z وجود دارد. در این صورت، کریجینگ با یک چندجمله‌ای مرتبه اول یا دوم ترکیب می‌شود. از آنجایی که کریجینگ بعد از محاسبه و حذف روند، میانجایی را انجام می‌دهد، معمولاً چندجمله‌ای مراتب بالاتر پیشنهاد نمی‌شود. لذا چندجمله‌ای مراتب بالاتر تغییرات محدودی را برای برآورد قطعی‌تر به‌جا می‌نهد. همچنین ضرایب افزون‌تر در چندجمله‌ای مراتب بالاتر، نیاز به حل معادلات بیشتری دارد (۲۵).

$$\mu_x = \sum_{i=1}^n a_i f_i(x) \quad (10)$$

در معادله ۱۰ برای درون‌یابی، a_i ام ضریب تخمین زده شده

روش فاصله وزنی معکوس (IDW)

این روش درون‌یابی را به سادگی انجام می‌دهد. در این روش با وزن‌دهی به داده‌های اطراف نقطه مورد برآورد، کمیت مجهول را به دست آورده و درون‌یابی انجام می‌شود؛ بنابراین هر نقطه اندازه‌گیری شده دارای یک اثر محلی است و با افزایش فاصله، از تأثیر آن کاسته می‌شود. بدین ترتیب نقاط نزدیک‌تر دارای وزن بیشتری هستند. این روش با توان‌های ۱ تا ۵ بررسی شد. در این روش فاصله هر نقطه یا پیکسل با پیکسل مجاور سنجیده می‌شود و سپس برحسب مقدار فاصله به آن سلول، ارزش یا ضریب وزن داده می‌شود و در نهایت ارزش سلول مرکزی ماتریس با جمع ارزش‌های نقاط همسایه و میانگین وزنی آنها به دست می‌آید. الگوریتم این روش به صورت معادله ۷ است:

$$\lambda_i = \frac{1}{d_i^p} Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (7)$$

در این معادله Z^* مقدار نقطه مجهول، $Z(x_i)$ مقدار مربوط به نقطه i ام، n تعداد نقاط نمونه‌برداری است. در این مطالعه به دلیل نرمال نبودن تعدادی از شاخص‌ها و همچنین وجود روند در برخی از آنها از این مدل نیز برای مقایسه با روش‌های زمین‌آماري استفاده شد. قبل از اجرای مدل، سه پارامتر توان فاصله، شعاع همسایگی و نقاط همسایگی با استفاده از ارزیابی متقاطع بهینه شد (۶ و ۲۱).

روش چندجمله‌ای محلی (LPI)

این روش حداقل مجذورات متناسب را بین گره‌های شناسایی شده در محدوده بیضوی شکل، به عنوان وزن گره تخصیص می‌دهد. در این روش ضرایب تخصیص داده شده، با به دست آوردن رابطه درجه اول، دوم و سوم بین مقداری x ، y و Z حداقل سازی اطلاعات محاسبه شده، مطابق معادله ۸ درون‌یابی صورت می‌گیرد.

$$ST: \psi(d) = \ln(cd/2)^2 + I_0(cd) + \gamma \quad (17)$$

$$TPS: \psi(d) = c^2 d^2 \ln(cd) \quad (18)$$

در این معادلات d فاصله بین نقاط نمونه برداری و پیش‌بینی شده، c فاکتور ملایم کردن انحنای سطح زمین، I_0 تابع بسل اصلاح شده و γ ثابت اویلر است (۲۱).

اعتبارسنجی مدل‌ها

به منظور مقایسه روش‌های مورد استفاده در این پژوهش و انتخاب مناسب‌ترین روش زمین‌آمار، از تکنیک اعتبارسنجی متقابل استفاده شد. در این روش، در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای همه نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود، به طوری که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود خواهد داشت. در این مطالعه از پارامترهای خطای مطلق میانگین (MAE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\bar{Z}(x_i) - Z(x_i)]^2}{N}} \quad (19)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Z(x_i) - \bar{Z}(x_i)|}{N} \quad (20)$$

در معادلات ۱۹ و ۲۰، $\bar{Z}(x_i)$ مقدار مشاهده شده، $Z(x_i)$ مقادیر برآورد شده و N تعداد داده‌ها است. در روش تحلیل رگرسیونی، بین داده‌های واقعی و داده‌های برآوردی یک رابطه رگرسیونی خطی ساده به صورت معادله ۲۱ برقرار شده سپس این معادله با خط ۱:۱ مقایسه می‌شود (۲۱).

$$Y = a + bX \quad (21)$$

به عبارتی هرچه عرض از مبدأ (a) به صفر و شیب (b) به یک نزدیک‌تر و ضریب همبستگی مقادیر واقعی (Y) و برآوردی (X) بالاتر باشد روش مورد نظر از دقت بالاتری برخوردار است. در این مطالعه پنج مدل مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند و بر اساس میزان ریشه دوم میانگین

توسط داده‌ها، i ام تابع توزیع مکانی، n تعداد تابع استفاده شده در مدل‌سازی است.

روش تابع شعاعی (RBF)

این روش می‌تواند روی داده‌هایی که به‌طور نامنظم در یک منطقه پخش شده‌اند اعمال شده و یک درون‌یابی چندمتغیره هموار روی داده‌ها انجام دهد. در این روش یک تابع عمومی وابسته به فاصله بین نقاط درون‌یابی شده و نمونه برداری شده به کار گرفته می‌شود. تعریف ریاضی این روش در معادله ۱۱ ارائه شده است (۲۱):

$$Z(x) = \sum_{i=1}^m a_i f_i(x) + \sum_{j=1}^n b_j \psi(d_j) \quad (11)$$

در این معادله $\psi(d_j)$ تابع پایه شعاعی، b_j فاصله بین نقاط نمونه برداری و پیش‌بینی شده نقطه x را نشان می‌دهد. در معادله های ۱۲ و ۱۳ $f_i(x)$ روند تابع و عضو اساسی برای چندجمله ای‌های با درجه کمتر از m است. در این روش ضرایب a_i و b_j میانگین وضوح معادلات خطی $n+m$ بوده به طوری که n تعداد نقاط استفاده شده در درون‌یابی است.

$$Z(x_k) = \sum_{i=1}^m a_i f_i(x_k) + \sum_{j=1}^n b_j \psi(d_{jk}) \quad \text{for } k = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^n b_j f_k(x_j) = 0 \quad \text{for } k = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

روش تابع شعاعی خود برحسب نوع تابع، دارای پنج نوع اسپیلاین کاملاً منظم (CRS)، اسپیلاین کششی (ST)، اسپیلاین چند ربعی (MQ)، اسپیلاین چند ربعی معکوس (IMQ)، اسپیلاین صفحه‌ای نازک (TPS) است که هر یک از آنها معادله به شرح زیر دارند (۲۱):

$$CRS: \psi(d) = \ln(cd/2)^2 + E_1(cd)^2 + \gamma \quad (14)$$

$$IMQ: \psi(d) = (\sqrt{d^2 + c^2})^{-1} \quad (15)$$

$$MQ: \psi(d) = \sqrt{d^2 + c^2} \quad (16)$$

طریق آزمون‌های شاپیرو- ویلک و آزمون کولموگروف-اسمیرنوف در صورتی که سطح معناداری ≤ 0.05 باشد می‌توان متغیرها را نرمال فرض کرد. در بحث زمین‌آمار معنی دار بودن داده‌ها در دو سطح 0.05 و 0.01 صورت می‌گیرد. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود نتایج این دو آزمون تا حدودی متفاوت است. دلیل این تفاوت این است که آزمون آزمون‌های شاپیرو- ویلک نسبت به داده‌های پرت حساسیت دارد. با توجه به اینکه در این مطالعه داده پرت وجود تجربی (به صورت آماری) وجود ندارد در این تحقیق از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف برای تحلیل داده‌ها استفاده شد. نشان این آزمون نشان داد که داده‌های Q_{30} و Q_{50} بدون تبدیل داده به صورت نرمال هستند. نتایج آماری مربوط به Q با آزمون‌های شاپیرو- ویلک و کولموگروف-اسمیرنوف قبل و بعد از تبدیل داده‌ها نرمال نبودند. روش‌های مختلفی برای تبدیل داده‌ها وجود دارد که برخی از روش‌های متداول عبارت‌اند از: ریشه دوم، لگاریتم، وارون و مجذور کردن. بین آمارشناسان در مورد استفاده از انواع روش‌های تبدیل داده‌ها در شرایط خاص اتفاق نظر وجود ندارد. با وجود این، یک راهبرد اساسی برای به‌کار بردن روش‌های تبدیل این است که برحسب جدی بودن تخطی از پیش‌فرض‌های آماری، راهبردهای پیشرفته‌تر (سطح بالاتر) به‌کار بسته شود. برای مثال، تاباچینک و فیدل و مرتلر واناتا برای پیشرفت تبدیل داده‌ها از ریشه دوم (برای اصلاح تخطی متوسط)، لگاریتم (برای تخطی اساسی‌تر) و سپس ریشه دوم وارون (برای رسیدگی به تخطی شدید) جانب‌داری می‌کنند. مجذور کردن یک متغیر در رابطه دو متغیری غیرخطی می‌تواند مشکل غیرخطی بودن را به‌طور مؤثر کاهش دهد (۱۰). به‌طور کلی زمانی که داده‌ها نرمال نیستند از روش‌های ریشه دوم، لگاریتم و وارونه کردن برای تبدیل داده‌ها استفاده می‌شود. در این مطالعه از ریشه دوم، لگاریتم برای تبدیل داده‌ها استفاده شد (۱۰).

خطا و همچنین میانگین انحراف خطا بهترین مدل برای درون‌یابی انتخاب شد. تعیین نقشه‌های پهنه‌بندی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه از نرم‌افزار Arc GIS 10.3 استفاده شد. برای تعیین کلاس خاک از نرم‌افزار تحت ویندوز TAL استفاده شد، این نرم‌افزار بر اساس چندین سیستم طبقه‌بندی شامل سیستم‌های USDA، کانادایی، UK و سیستم طبقه‌بندی بین‌المللی است که در تحقیق حاضر از سیستم USDA استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج محاسبه فرسایش با استفاده از روش سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا

جدول ۱ نتایج میزان فرسایش Q ، Q_{30} و Q_{50} را برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج همچنین نشان داد که بیشترین مقدار فرسایش در شاخص Q_{50} بوده به‌طوری که کمترین و بیشترین میزان فرسایش در این شاخص به ترتیب 0.067 و تقریباً 39 تن در هکتار در سال است. کمترین و بیشترین میزان فرسایش ذرات در شاخص Q_{30} به ترتیب 0.060 و $2/694$ و برای شاخص Q کمترین فرسایش 0.009 و بیشترین 0.055 تن در هکتار در سال به‌دست آمد. ضریب تغییرات شاخص‌های Q ، Q_{30} و Q_{50} به ترتیب 0.015 ، 0.567 و $1.0/85$ به‌دست آمد (جدول ۲) که طبق نتایج بین شاخص‌های Q_{50} با Q_{30} و بین شاخص‌های Q_{50} و Q همبستگی مثبت و معنادار در سطح یک درصد وجود دارد. با توجه به اینکه میزان Q در این تحقیق مدنظر است منطقه مورد مطالعه ما بر اساس این پارامتر در وضعیت هشدار قرار می‌گیرد.

نتایج آماری و نرمال بودن داده‌های فرسایش

تعیین نرمال بودن داده‌های بافت و میزان فرسایش از طریق آزمون‌های شاپیرو- ویلک و کولموگروف-اسمیرنوف در جدول ۳ بیان شده است. برای تعیین نرمال بودن داده‌ها از

جدول ۱. میزان هدررفت خاک برای شاخص‌های Q30, Q و Q50 منطقه مورد مطالعه

Q30	Q50	Q	نمونه	Q30	Q50	Q	نمونه
۰/۸۲۱	۱۶/۴۲	۰/۰۵۵	۲۶	۰/۳۹۳	۲/۲۷۹	۰/۰۲۱	۱
۱/۳۷۱	۲۱/۴۴	۰/۰۳۷	۲۷	۰/۴۹۵	۳/۱۸۳	۰/۰۱۳	۲
۰/۶۴۲	۲۴/۷۶	۰/۰۵۰	۲۸	۱/۴۳۳	۷/۶۰۲	۰/۰۲۰	۳
۲/۶۹۴	۲۶/۰۷	۰/۰۳۷	۲۹	۱/۰۶۸	۳/۹۲۶	۰/۰۲۰	۴
۱/۸۴۹	۲۳/۸۳	۰/۰۳۷	۳۰	۰/۱۳۵	۰/۹۴۵	۰/۰۴۱	۵
۱/۱۴۱	۱۷/۸۸	۰/۰۵۰	۳۱	۰/۳۶۶	۱/۴۴۰	۰/۰۴۱	۶
۱/۳۸۱	۱۷/۲۱	۰/۰۵۰	۳۲	۰/۰۶۰	۰/۰۶۷	۰/۰۰۹	۷
۰/۶۳۸	۵/۶۳۱	۰/۰۳۷	۳۳	۰/۶۷۳	۰/۵۱۴	۰/۰۲۲	۸
۰/۶۰۳	۳/۲۴۴	۰/۰۳۷	۳۴	۰/۵۹۹	۰/۷۵۸	۰/۰۴۱	۹
۱/۸۸۰	۱۷/۱۶	۰/۰۵۵	۳۵	۰/۴۱۳	۰/۳۷۴	۰/۰۲۰	۱۰
۱/۹۲۰	۲۵/۹۲	۰/۰۵۵	۳۶	۰/۳۰۴	۰/۴۶۲	۰/۰۱۴	۱۱
۱/۸۳۶	۲۶/۴۸	۰/۰۵۵	۳۷	۰/۴۳۹	۲/۵۳۵	۰/۰۲۱	۱۲
۱/۳۳۰	۲۸/۳۳	۰/۰۵۵	۳۸	۱/۰۱۳	۷/۶۶۹	۰/۰۲۰	۱۳
۱/۳۴۰	۳۴/۳۸	۰/۰۵۵	۳۹	۲/۴۲۳	۱۸/۶۰	۰/۰۱۴	۱۴
۰/۸۶۵	۳۱/۹۳	۰/۰۵۵	۴۰	۱/۳۸۲	۱۳/۵۶	۰/۰۴۵	۱۵
۰/۹۳۹	۲۴/۴۵	۰/۰۵۵	۴۱	۰/۹۵۲	۱۲/۱۲	۰/۰۴۵	۱۶
۰/۲۱۷	۶/۳۱۲	۰/۰۵۵	۴۲	۰/۷۳۳	۳۵/۵۳	۰/۰۴۵	۱۷
۰/۶۳۶	۲۵/۶۲	۰/۰۵۵	۴۳	۱/۴۲۳	۲۸/۰۲	۰/۰۳۳	۱۸
۰/۹۹۱	۲۶/۲۹	۰/۰۵۵	۴۴	۱/۲۴۵	۱۳/۱۳	۰/۰۴۵	۱۹
۰/۴۶۱	۱۱/۷۱	۰/۰۵۵	۴۵	۱/۰۹۰	۲۹/۴۲	۰/۰۴۵	۲۰
۰/۸۷۷	۳۸/۰۶	۰/۰۵۵	۴۶	۱/۰۱۱	۲۰/۴۵	۰/۰۴۵	۲۱
۰/۴۲۴	۹/۸۰۶	۰/۰۵۵	۴۷	۰/۵۳۵	۸/۹۵۱	۰/۰۵۰	۲۲
۱/۱۳	۸/۳۹۶	۰/۰۵۵	۴۸	۰/۹۶۳	۱۱/۷۸	۰/۰۳۷	۲۳
۰/۸۱۶	۱۵/۶۳	۰/۰۵۵	۴۹	۱/۴۲۰	۱۰/۴۰	۰/۰۳۷	۲۴
۱/۰۶۵	۱۰/۲۳	۰/۰۵۵	۵۰	۰/۹۷۶	۱۳/۳۶	۰/۰۵۵	۲۵

Q50: درصد ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۶۳ و Q30: درصد ذرات کمتر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر

جدول ۲. توزیع فراوانی میزان فرسایش ذرات Q، Q30، Q50

پارامترها	Q	Q50	Q30
میانگین	۰/۰۴۰	۱۴/۸۸	۰/۹۸۳
خطا میانگین	۰/۰۰۲	۱/۵۳۰	۰/۰۸۰
ضریب تغییرات	۰/۰۱۵	۱۰/۸۵	۰/۵۶۷
واریانس	۰/۰۰۱	۱۱۷/۸	۰/۳۲۲
کمترین	۰/۰۹	۰/۰۶۷	۰/۰۶۰
بیشترین	۰/۰۵۵	۳۸/۰۶	۲/۶۹۴

جدول ۳. تعیین نرمال بودن داده‌ها

پارامترها	وضعیت داده‌ها (داده اولیه و تبدیل شده)	کولموگروف-اسمیرنوف			شاپیرو-ویلک	
		آماری	درجه آزادی	معناداری	آماری	درجه آزادی
Q	داده اولیه	۰/۱۸۶	۵۰	۰/۰۰	۰/۸۳۹	۵۰
	داده تبدیل شده	۰/۲۴۰	۵۰	۰/۰۰	۰/۷۸۱	۵۰
Q30	داده اولیه	۰/۰۹۵	۵۰	۰/۲۰	۰/۹۴۹	۵۰
	داده تبدیل شده	۰/۰۷۹	۵۰	۰/۲۰	۰/۹۹۱	۵۰
Q50	داده اولیه	۰/۰۹۶	۵۰	۰/۲۰	۰/۹۴۴	۵۰
	داده تبدیل شده	۰/۱۰۱	۵۰	۰/۲۰	۰/۹۵۴	۵۰

نتایج ساختارپذیری و واریوگرام داده‌ها

با استفاده از نرم‌افزار GS^+ متغیرهای مدل، اثر قطعه‌ای (C_0)، حد آستانه ($C+C_0$)، دامنه تأثیر (A)، موقعیت مکانی ($C/(C_0+C)$)، ضریب تبیین (R^2) و خطا داده‌ها (RSS) و همچنین انتخاب بهترین مدل برای واریوگرام متغیرهای مورد مطالعه از بین مدل‌های کروی، نمایی، خطی و گوسی صورت گرفت. جدول ۴ ضریب برازش برای هر کدام از شاخص‌ها با مدل‌های مختلف ارائه شده است.

در این تحقیق مدل، اثر قطعه (C_0)، حد آستانه ($C+C_0$)، دامنه تأثیر (A یا A_0)، وضعیت ساختار مکانی ($C/(C_0+C)$)، ضریب تبیین (R^2) و میزان خطا (RSS)، برای پارامترهای مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار GS^+ و با مدل‌های کروی، نمایی، خطی و گوسی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شد. با توجه به نتایج به دست آمده، برای شاخص‌های Q و Q50 مدل گوسی و

برای شاخص Q30 مدل نمایی با توجه به پارامترهای ضریب تبیین، میزان خطا و ساختار مکانی در بین مدل‌های مورد بررسی، بهترین نتیجه را داشتند و از این مدل‌ها برای درونیابی با استفاده از روش‌های زمین آماری استفاده شد. نتایج ضریب تبیین نشان داد که این میزان در مدل گوسی برای شاخص‌های Q، Q30 و Q50 به ترتیب ۰/۹۷، ۰/۴۰ و ۰/۸۱ بوده که برای شاخص‌های Q و Q50 این مقدار بسیار بالا و قابل قبول بوده اما در مورد شاخص Q30 با وجود مقدار پایین این ضریب، میزان متوسط خطا بسیار پایین (۰/۰۲) است. دامنه تأثیر برای شاخص‌های Q، Q30 و Q50 به ترتیب ۳۴۶۱۰، ۴۴۳۰۰ و ۲۴۱۱۰ متر به دست آمد. به نتایج همچنین نشان داد که ساختارپذیری (موقعیت مکانی) داده‌ها برای شاخص‌های Q، Q30 و Q50 به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۶۵ و ۰/۸۵ برای مدل‌های گوسی، نمایی، گوسی بود. میزان شاخص $C_0/(C+C_0)$ کمتر

جدول ۴. جدول نتایج واریوگرام‌ها و ساختارپذیری

متغیر	مدل	اثر قطعه‌ای (C0)	حد آستانه (C+C0)	دامنه تأثیر (A)	C/C+C0	R ²	RSS
Q	کروی	۰	۰	۵۱۱۰۰	۱	۰/۸۹	*۶/۶۹
	نمایی	۰	۰	۵۱۱۰۰	۱	۰/۸۷	*۷/۹۵
	خطی	۰	۰	۴۵۳۵۰	۱	۰/۹۰	*۵/۸۰
	گوسی	۰	۰	۳۴۶۱۰	۰/۹۸	۰/۹۷	*۱/۳۳
Q30	کروی	۰/۲۲	۰/۴۵	۳۸۸۶۰	۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۰۲
	نمایی	۰/۲۲	۰/۶۵	۴۴۳۰۰	۰/۶۵	۰/۴۰	۰/۰۲
	خطی	۰/۲۳	۰/۳۷	۱۹۲۷۰	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۱۰
	گوسی	۰/۲۵	۰/۵۰	۲۲۲۵۰	۰/۵۰	۰/۳۶	۰/۰۲
Q50	کروی	۴۹/۹۱	۲۹۱/۳	۲۴۵۱۰	۰/۸۶	۰/۵۹	۷۳۷
	نمایی	۴۰/۳۰	۲۸۱/۵	۲۵۶۱۰	۰/۸۵	۰/۶۸	۷۲۰۵
	خطی	۳۸/۴۷	۱۸۲/۷	۱۹۲۷۰	۰/۷۸	۰/۷۵	۷۳۸۵
	گوسی	۶۲/۱۰	۳۳۵/۱	۲۴۱۱۰	۰/۸۵	۰/۸۱	۴۱۶۴

*نشان E-8

درون‌یابی مورد نظر انجام شد. معیارهای مختلفی برای مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده وجود دارد که در این مطالعه از دو روش میانگین خطای مطلق (MAE) و ریشه دوم مربع میانگین خطا (RMSE) استفاده شد.

روش‌های زمین‌آماري

درون‌یابی‌های کریجینگ معمولی و عام جزء روش‌های زمین‌آماري هستند. تخمین این دو روش بر اساس ساختار مکانی موجود در محیط صورت می‌گیرد. برای انجام این دو روش، داده‌های آماری مورد استفاده باید دارای ویژگی‌هایی از جمله، داشتن توزیع نرمال داده‌ها، تغییرات کم میانگین و واریانس و همچنین برای کریجینگ معمولی نبود روند در داده‌ها است. بر اساس نتایج آماری به‌دست آمده از سه شاخص مورد بررسی تنها داده‌های Q₃₀ و Q₅₀ دارای شرایط فوق بودند و بنابراین از این روش‌ها برای درون‌یابی استفاده شد. برای شاخص Q از روش‌های غیر زمین‌آماري استفاده شد. آزمون همسانگردی نیز برای داده‌ها، با رسم واریوگرام‌های مختلف در

از ۲۵ درصد نشان‌دهنده ساختارپذیری قوی، میزان شاخص بین ۲۵ تا ۷۵ درصد نشان‌دهنده ساختارپذیری متوسط و بیش از ۷۵ درصد، نشان‌دهنده ساختارپذیری ضعیف است (۱۹). نسبت $C/(C0+C)$ کمیتی است که برای طبقه‌بندی میزان وابستگی مکانی متغیرها به‌کار می‌رود. اگر نسبت گفته شده بیش از ۷۵ باشد، این حالت نشان‌دهنده ساختارپذیری قوی است (۴ و ۲۶). نتایج این تحقیق نشان داد که ساختارپذیری تمام شاخص‌ها به‌جز Q₃₀ بسیار قوی بوده و بنابراین با توجه نتایج اولیه از جمله نرمال بودن یا نبودن و همچنین روند واریوگرام‌ها روش مناسب برای درون‌یابی انتخاب شد.

مقایسه و ارزیابی روش‌های درون‌یابی

در این مطالعه بر اساس نتایج آنالیز آماری و همچنین تفسیر واریوگرام‌ها، روش‌های زمین‌آماري و قطعی برای تهیه نقشه مطابق جدول ۵ استفاده شد. برای ارزیابی این مدل‌ها از روش اعتبارسنجی متقاطع استفاده شد. در این روش برای هر یک از نقاط مشاهده شده، برآورد تخمینی با به‌کارگیری روش

جدول ۵. مقایسه روش‌های درونیابی برای شاخص‌های Q, Q30 و Q50

پارامترهای آماری		متغیر	مدل درونیابی	نوع درونیابی
MAE	RMSE			
۳/۳۵۷	۶/۰۱۶	Q50	کریجینگ معمولی	مدل‌های زمین آماری
۰/۴۴۶	۰/۵۵۷	Q30		
۲/۲۸۶	۶/۱۵	Q50	کریجینگ عام	
۰/۱۳۲	۰/۵۰۵	Q30		
۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۹۴	Q	فاصله وزنی معکوس	
۰/۱۳۵	۰/۵۴۰	Q30		
۱/۸۹۷	۳/۹۴	Q50		
۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۹	Q	تابع شعاعی	مدل‌های قطعی
۰/۵۱۰	۰/۵۴	Q30		
۲/۵۶۷	۵/۹۶	Q50		
۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۸۶	Q	چندجمله‌ای محلی	
۰/۲۹۶	۰/۵۱۹	Q30		
۲/۱۵۸	۵/۳۸	Q50		

وزنی معکوس برای پارامتر Q50 با مقادیر کمترین میزان خطا (RMSE) ۳/۹۴ و میانگین خطای مطلق (MAE) با مقادیر ۱/۸۹ بهترین عملکرد را بین مدل‌های مورد بررسی داشت. در رابطه با شاخص Q مدل چندجمله‌ای محلی با کمترین میزان خطا (۰/۰۰۸۶) و کمترین خطای مطلق (۰/۰۰۲۱) بهترین عملکرد را داشت (جدول ۵). به‌طور خلاصه نتایج ارزیابی مدل‌ها بر اساس کمترین میزان خطا به شرح زیر است:

میزان $Q > LPI > RBF > IDW$,

میزان $Q_{30} > UK > LPI > IDW > RBF > OK$ و

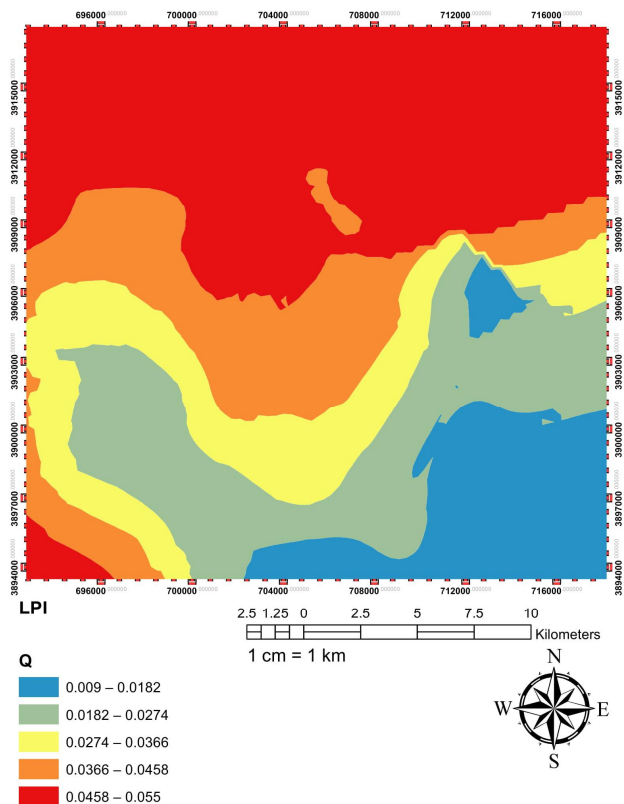
میزان $Q_{50} > IDW > LPI > RBF > OK > UK$.

نقشه‌های میزان فرسایش برای اساس بهترین روش درونیابی در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ ارائه شده است. نتایج نشان داد که

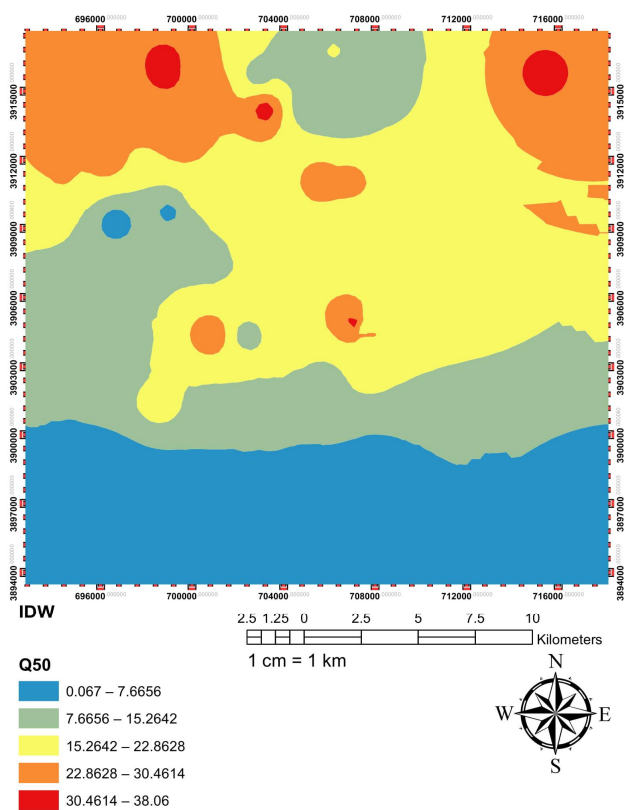
جهت‌های گوناگون انجام شد. یکسان بودن واریوگرام‌ها نشان دهنده همسانگرد بودن توزیع داده‌ها در منطقه است. نتایج نشان داد که کریجینگ عام برای شاخص Q30 با کمترین میزان خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) به ترتیب با خطاهای ۰/۵۰۵ و ۰/۱۲۳ بهترین روش برای درونیابی این شاخص انتخاب شد. برای شاخص‌های دیگر روش‌های مطلق نتایج بهتری در مقایسه با روش‌های زمین آماری نشان دادند.

روش‌های قطعی یا معین

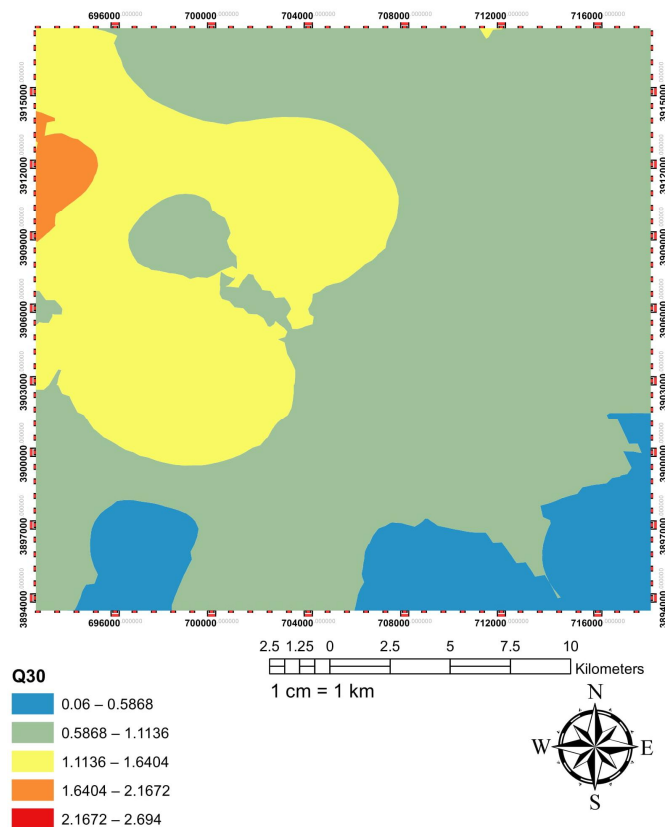
از روش‌های غیر زمین آماری، روش‌های فاصله وزنی معکوس، تابع شعاعی و چندجمله‌ای محلی برای مقایسه با کریجینگ معمولی و عام استفاده شد. نتایج نشان داد که روش فاصله



شکل ۳. نقشه پراکنش میزان شاخص Q با روش LPI (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۴. نقشه پراکنش میزان شاخص Q50 با روش IDW (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۵. نقشه پراکنش میزان شاخص Q30 با روش K (رنگی در نسخه الکترونیکی)

دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش کریجینگ با مدل کروی، ساختار فضایی مناسب‌تر و مقادیر خطای کمتری دارد. عظیم‌زاده (۴) در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که کریجینگ معمولی روش دقیق برای برآورد سرعت آستانه فرسایش بادی است. روش کریجینگ یکی از روش‌های درون‌یابی با دقت بالاست که بهترین تخمین نااریب و با کمترین مقدار واریانس را فراهم می‌نماید (۴). محاسبه مقدار خطای هر برآورد به‌منظور تعیین تعداد داده‌های مناسب برای کاهش خطا از مزیت‌های مهم روش کریجینگ است (۹ و ۲۶). نقشه‌های حاصل از پهنه‌بندی میزان فرسایش برای مدیریت و کنترل هدررفت خاک توسط سازمان‌های محیط زیست، منابع طبیعی و آبخیزداری بسیار حائز اهمیت است، همچنین با شناسایی نقاط بحرانی و فوق بحرانی فرسایش می‌توان با اقدامات مناسب باعث کاهش خسارات این پدیده بر محیط

هدررفت خاک بین ۰/۰۲۷ تا ۰/۰۵۵ تن در هکتار در سال در بیش از ۷۰ درصد از منطقه مورد مطالعه برای شاخص Q وجود دارد. برای شاخص Q₅₀، بیش از ۷۰ درصد منطقه هدررفت خاک بین ۷/۶۵ تا ۳۸/۰۶ تن در هکتار در سال و برای شاخص Q₃₀ بیش از ۹۰ درصد هدررفت خاک بین ۰/۵۸ تا ۲/۶۹ تن در هکتار در سال فرسایش وجود دارد. دلیل هدررفت بالای خاک در این منطقه به علت بارش پایین (کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر در سال)، تبخیر و تعرق بالا (بالای ۲۱۰۰ میلی‌متر در سال) پوشش گیاهی ناکافی و دشت بودن منطقه است. لازم به ذکر است که نوع بافت خاک منطقه (غالب لومی شنی) و سرعت باد در منطقه از دیگر عوامل تأثیرگذار مهم دیگر روی میزان هدررفت خاک در منطقه مورد مطالعه است. فتوحی و همکاران (۶) با بهره‌گیری از زمین‌آمار و سامانه اطلاعات جغرافیایی، پهنه‌بندی سرعت آستانه فرسایش بادی را به‌کمک داده‌های حاصل انجام

زیست، آلودگی هوا، سلامت انسان و غیره شده و اقدامات ضروری برای مهار و کنترل فرسایش بادی انجام داد.

نتیجه گیری

نتایج همچنین نشان داد که بیشترین مقدار فرسایش شاخص Q_{50} است و کمترین و بیشترین میزان فرسایش در این شاخص به ترتیب ۰/۰۶۷ و تقریباً ۳۹ تن در هکتار در سال است. کمترین و بیشترین میزان فرسایش ذرات در شاخص Q_{30} به ترتیب ۰/۰۶۰ و ۲/۶۹۴ تن در هکتار در سال است. کمترین و بیشترین فرسایش شاخص Q به ترتیب ۰/۰۰۹ و ۰/۰۵۵ تن در هکتار در سال است نتایج همچنین نشان داد که بین شاخص های Q_{50} با Q_{30} همچنین بین Q و Q_{50} همبستگی مثبت و معنی داری در سطح یک درصد وجود دارد بین شاخص های Q_{50} با Q_{30} همبستگی مثبت معناداری در سطح یک درصد وجود دارد و مقدار فرسایش خاک با شاخص Q_{50} همبستگی مثبت و معنادار دارد به این معنا که با افزایش شاخص Q_{30} ، میزان

شاخص Q_{50} نیز افزایش می یابد. نتایج نشان داد که روش فاصله وزنی معکوس برای پارامتر Q_{50} با مقادیر کمترین میزان خطا (RMSE) ۳/۹۴ و میانگین خطای مطلق (MAE) با مقدار ۱/۸۹ بهترین عملکرد را بین مدل های مورد بررسی داشت. در رابطه با شاخص Q مدل چندجمله ای محلی با کمترین میزان خطا (۰/۰۰۸۶) و کمترین خطای مطلق (۰/۰۰۲۱) بهترین عملکرد داشت. برای شاخص Q_{30} روش کریجینگ عام بهترین عملکرد را برای درونیابی این شاخص نشان داد. شناسایی و اولویت بندی مناطق با پتانسیل بالای فرسایش می تواند برای مجریان، مدیران و تصمیم گیران حوزه مبارزه با فرسایش بادی و گرد و غبار در اجرای سریع و مناسب تر برنامه های مدیریتی نقش بسزایی داشته باشد. به عبارتی دیگر، شناسایی و اولویت بندی مناطق بحرانی فرسایش بادی با استفاده از نقشه های موجود می تواند در اجرای صحیح طرح ها و پروژه های مربوطه حائز اهمیت باشد.

منابع مورد استفاده

1. Akhtesasi, M. and A. Zare Chahuki. 2016. Evaluation of prediction of IRIFR1 wind erosion and comparison with direct measurement of wind erosion using wind erosion measuring machine (WEmeter) in Segzi plain, Isfahan. *Iranian Rangeland Research Journal* 23(2): 264-225 .
2. Akhtesasi, M. and H. Ahmadi. 1997. Qualitative and quantitative study of wind erosion and sediment estimation in Ardakan-Yazd plain. *Iranian Journal of Natural Resources* 12(1): 50-59.
3. Amin, P. and H. R. Azimzadeh. 2015. The effect of desert pavement on soil wind erodibility and wind erosion threshold velocity (Case Study: Ebrahimabad basin of Mehriz (Yazd)). *Quantitative Geomorphological Research* 4(2): 90-104.
4. Azimzadeh, H. R., M. R. Akhtesasi, J. Mohammadi and H. G. Refahi. 2005. Application of Kriging geostatistics in estimation of desert pavement percentage and wind erosion threshold speed, 1st National Conference on Wind Erosion, Iran.
5. Black, C. A. 1965. *Methods of Soil Analysis*, American Society of Agronomy Madison, WI.
6. Fotouhi Firouzabad, F., H. R. Azimzadeh and A. S. Talebi. 2014. Comparative evaluation of interpolation methods in estimating the erodibility index of the global soil loss equation (Case study: part of Yazd-Ardakan plain). *Watershed Research* 103: 21-13.
7. Hashemi, Z., M. Javadi and A. S. Miri. 2010. Evaluation of wind erosion and its sedimentation potential using IRFR model in Zakak region of Sistan and Baluchestan province. *Journal of Natural Resources Science and Technology* 6(3): 41-48.
8. Isaaks, E. and R. Srivastava. 1989. *Applied Geostatistics*, New York Oxford University Press.
9. Jianbing, W., A. Boucher and T. Zhang. 2008. A SGeMS code for pattern simulation of continuous and categorical variables: FILTERSIM. *Computers and Geosciences* 4(12): 1863 -1876.
10. Karimi, R. 2015. *Easy Guide to Statistical Analysis with SPSS*, Hemgham Publication, Hengham.
11. Klute, A. 1988. *Methods of Soil Analysis 2d ed.*, pt. 1; Physical and Mineralogical Methods, Soil Science, USA.
12. Mihanprast, S. 2015. Evaluation of wind erosion severity using IRIFR method and determination of severity of

- harvest, transportation and sedimentation zones (study area, south of Semnan). Master Thesis, Semnan University, Iran.
13. Nazari Samani, A. S., A. Ehsani, A. Gliwari and M. Abdolshahnejad. 2015. Comparison of results of RWEQ and IRIFR models in determining land management impact on wind erosion. *Journal of Desert Management* 6: 53-39.
 14. Pi, H. 2017. Evaluation of two empirical wind erosion models in arid and semi-arid regions of China and the USA. *Environmental Modelling & Software* 91: 28-46.
 15. Refahi, H. A. 2006. Wind erosion and its control. University of Tehran Publications, Tehran.
 16. Saremi Naeni, M. A., A. Jahromi Farmers, M. A. Akhtesasi and A. S. Mohammadian Behbahani. 2007. Zoning of wind erosion threshold velocity values using geostatistics (Case Study: Yazd City Area). 10th Iranian Soil Science Congress, Karaj, Iran.
 17. Shakarian, N., Gh. Zahatabyan and B. Shakarian. 2010. The Impact of dust and microbes and their pollutions on human health. Second National Conference on Wind Erosion, Yazd, Iran.
 18. Tang, J. 2011. Influence of biological aggregating agents associated with microbial population on soil aggregate stability. *Applied Soil Ecology* 47(3): 153-159.
 19. Torabi, H., N. Dwatgar and Sh. Qasemi. 2016. Investigation of spatial variation and zoning of some physical and chemical properties of surface soil and their influence on agricultural management in South Tehran. *Journal of Soil Research and Soil and Water Sciences* 30(2): 12-25.
 20. Vaezi, A. R., H. A. Bahrami, S. H. R. Sadeghi and M. H. Mahdian. 2010. Spatial Variability of Soil Erodibility Factor (K) of the USLE in North West of Iran. *Journal Of Agricultural Science And Technology (JAST)* 12: 252-241.
 21. Xie, Y. 2011. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis. *Chemosphere* 82(3): 468-476.
 22. Xuan, J., G. Liu and K. Du. 2000. Dust emission inventory in Northern China. *Atmospheric Environment* 34: 4565-4570.
 23. Xuan, J., I. N. Sokolik, J. Hao, F. Guo, H. Mao and G. J. Yang. 2004. Identification and characterization of sources of atmospheric mineral dust in East Asia. *Atmospheric Environment* 38: 6239-6252.
 24. Xuan, J. 1999. Dust emission factors for environment of Northern China. *Atmospheric Environment* 33: 1767-1776.
 25. Zare Chahouki, M. A., M. Zare Ernani, A. Zare Chahouki and L. Khalasi Ahvazi. 2010. Application of spatial statistical methods in predictive models of plant species habitat. *Journal of Arid Biom Scientific and Research* 1(1): 13-23.
 26. Zare Chahouki, M., M. Abbasi and H. Azarniwand. 2015. Spatial distribution map of some soil properties using geostatistical methods (Case study: Middle Talegan rangelands). *Range Journal* 12: 56-67.

Comparison of Interpolation Methods for the Mapping of Wind Erosion using the USEPA Model

E. Moradi and D. Namdar Khojasteh^{1*}

(Received: December 07-2019; Accepted: July 05-2020)

Abstract

Wind erosion is one of the environmental problems worldwide, particularly in arid and semi-arid areas of Iran. Different methods and models have been proposed to measure and monitor wind erosion in the recent years. One of the accurate models for measuring wind erosion is the USEPA model. The purpose of this study was to evaluate the quantification of wind erosion with the USEPA model and the comparison of different interpolation methods for drawing high-precision soil erosion mapping. For this purpose, 50 samples from 0-30 depth were taken from the study area. Based on the analysis of the physical properties of the soil, including the distribution of the primary and secondary particle sizes, climatic parameters such as evaporation and transpiration, rainfall, wind speed and also, the vegetation and topography characteristics of the area, the erosion rates of Q , Q_{30} and Q_{50} were measured. Interpolation methods including general kriging, IDW, LPI and RBF were compared. The results showed that the highest erosion emission rate of Q_{50} was 39 ton ha⁻¹. The highest and lowest erosion rates for the Q_{30} index were 0.060 and 2.694 ton ha⁻¹, respectively; for the Q index, the highest and lowest erosion rates were 0.009 and 0.055 ton ha⁻¹, respectively. The results also showed that the IDW method for the Q_{50} index with the minimum error rate (RMSE) values of 3.94 and the mean absolute error (MAE) with the value of 1.89 had the best performance among the studied models. The LPI model Q had the best performance with the lowest error (0.0086) and absolute error (0.0021).

Keywords: Spatial Distribution, Kriging, Interpolation, Wind Erosion

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahed University.
Corresponding author, Email: d.namdarkhojasteh@shahed.ac.ir