



ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های درون‌یابی در تخمین شاخص فرسایش‌پذیری معادله جهانی تلفات خاک (مطالعه موردی: بخشی از حوزه دشت یزد- اردکان)

• فرزانه فتوحی فیروزآباد

دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد (نویسنده مسئول)

• حمیدرضا عظیم‌زاده

دانشیار گروه محیط زیست و پژوهشکده مناطق خشک و بیابانی دانشگاه یزد

• علی طالبی

دانشیار گروه آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد

تاریخ دریافت: اسفند ماه ۱۳۸۹ تاریخ پذیرش: تیر ماه ۱۳۹۱

تلفن تماس نویسنده مسئول: ۰۹۱۳۲۵۹۵۰۳۹

Email: farzaneh.fotouhi@gmail.com

چکیده

فرسایش‌پذیری از عوامل اصلی و مؤثر در ایجاد فرسایش خاک است که به عنوان جز جدانشدنی از توابع ریاضی مدل‌های فرسایش همچون معادله جهانی تلفات خاک محسوب می‌شود. تحقیق حاضر در بخشی از دشت یزد- اردکان به عنوان یکی از دشت‌های تیپ مناطق خشک با هدف تعیین الگوی توزیع مکانی فرسایش‌پذیری خاک (K) و مقایسه روش‌های درون‌یابی ساده، معمولی و جهانی کریجینگ انجام شد. روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی-تصادفی از ۳۷ نقطه با توزیع تقریباً یکنواخت از عمق ۱۰ سانتی‌متر خاک نمونه‌برداری انجام شد. نفوذپذیری با استفاده از روش حلقه مضاعف اندازه‌گیری گردید. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و دانه‌بندی به روش هیدرومتری، مواد آلی به روش‌های استاندارد آزمایش شد. سپس شاخص فرسایش‌پذیری خاک با روش ویشمایر و اسمیت برآورد گردید. آزمون نرمال بودن داده‌ها انجام شد و با استفاده از تغییرنماهای $ArcGIS9.3$ الگوی تغییرات تعیین و پهنه‌بندی به روش‌های کریجینگ معمولی، جهانی، ساده و عکس مجذور فاصله برای ضریب K صورت گردید. از شاخص‌های میانگین مطلق اشتباهات، میانگین اریبی اشتباهات، ریشه دوم میانگین مربع خطا و درصد بهبود نسبی به منظور کنترل و اعتبارسنجی روش‌های درون‌یابی استفاده شد. شاخص فرسایش‌پذیری در دشت سرلخت در محدوده 0.0072 ± 0.0055 ، در دشت سرپانداژ 0.0037 ± 0.005 و در دشت سر پوشیده 0.0133 ± 0.0173 تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر متغیر است. نتایج رسم نیم تغییرنما و انتخاب مدل مناسب بر آن نشان داد که در روش‌های کریجینگ ساده و جهانی مدل کروی و در کریجینگ معمولی مدل گوسی دارای بهترین برازش است. از لحاظ شاخص‌های MAE ، MBE ، $RMSE$ و RI روش کریجینگ معمولی دارای صحت بیشتر و خطای کمتری است. در مجموع دقت روش‌های مختلف کریجینگ در تخمین ضریب K از روش عکس مجذور فاصله بیشتر است.

کلمات کلیدی: پهنه‌بندی فرسایش‌پذیری خاک، کریجینگ جهانی، کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی، معکوس فاصله.

Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi) No 103 pp: 12-21

Comparative Evaluation of interpolation methods of estimation of soil erodibility factor of Universal Soil Loss Equation (Case study: Yazd- Ardakan plain)

By: F. Fotouhi Firoozabad, PhD student of Watershed management engineering, yazd university, Iran. (Corresponding Author; Tel: +989132595039). H.R. Azimzadeh, Associated professor of Environmental Engineering Department, Natural Resources and Desert studies faculty, Yazd university, Iran. A. Talebi, Associated professor of Watershed management of Natural Resources, Desert studies faculty, Yazd university, Iran.

One of the most important parameter of soil erosion is soil erodibility. Soil erodibility (K-USLE) plays the main role in mathematical function of erosion models as well as Universal Soil Loss Equation (USLE). In recent paper, the objectives are including determination the spatial pattern of soil erodibility of USLE in part of Yazd Ardakan plain as a typical arid plain of center of Iran and comparison and evaluation the kinds of kriging interpolation procedure consist simple, ordinary and universal. Soil was sampled in 37 points from 0-10 cm soil depth in almost uniform distribution by random classification sampling pattern. Infiltration was determined by double ring method. Soil samples were analyzed in laboratory with standard methods consist grain size distribution and organic matter. Soil erodibility was calculated by method of Wischmeier and Smith. Normality test was carried out. ArcGIS 9.3 was applied to determine the spatial pattern of K-USLE and the effective parameters using simple, ordinary, universal and Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation methods. MAE (Mean Absolute Error), MBE (Mean Bias Error), RMSE (Root Mean Square Error) and RI (Relative Improvement) were calculated for evaluation the interpolation procedures. K-USLE were varied at about 0.0055 ± 0.0072 , 0.005 ± 0.0037 and 0.0173 ± 0.0133 ton.hr/MJ.mm in fine, medium and coarse gravely plains, respectively. The result shows Gaussian model was fitted on ordinary kriging as well as spherical was applied for simple and universal kriging. In addition, the result shows the ordinary kriging have the minimum bias in compare to the else interpolating procedures. Finally, the kriging procedures are more accurate and precision than IDW.

Keywords: Soil Erodibility Zonation, Universal Kriging, Ordinary Kriging, Simple Kriging, Inverse Distance Weighting.

مقدمه

فرسایش‌پذیری یکی از عوامل اصلی و مؤثر در ایجاد فرسایش خاک است که وابسته به ویژگی‌های ذاتی خاک می‌باشد. در معادله جهانی تلفات خاک ($USLE^1$) به صورت مستقیم، در پلات‌های استاندارد ویشمایر و اسمیت اندازه‌گیری یا غیر مستقیم برآورد می‌نمایند. روش مستقیم علی‌رغم دقت مناسب، به سبب وقتگیر بودن و جنبه‌های اقتصادی زیاد مورد توجه نمی‌باشد، لیکن استفاده از مدل‌ها هر روز توسعه بیشتری پیدا می‌کند (Ghorbani Vagheie و Bahrami، ۲۰۰۵). روش‌های مرسوم، تغییرپذیری مکانی شاخص فرسایش‌پذیری خاک را به صورت دقیق نشان نمی‌دهد و هیچ اطلاعاتی از دقت برآورد آن‌ها به کاربر ارائه نمی‌کند و مقدار آن‌ها در سراسر تیپ خاک ثابت است (ایوبی و حسینعلی‌زاده، ۱۳۸۶). به عبارت دیگر با برآورد مقدار فرسایش‌پذیری در یک نقطه به عنوان شاهد واحد نقشه، مقدار آن به کل واحد تعمیم داده می‌شود و نقشه‌ها عمدتاً به صورت واحد نقشه و تکه‌ای^۲ می‌باشد. این در حالی است که با کمک علم آمار و به صورت تخصصی‌تر، از علم زمین‌آمار^۳ می‌توان اطلاعات نقطه‌ای موجود در منطقه مطالعاتی از شاخص فرسایش‌پذیری خاک را به نقشه پیوسته از آن تبدیل نمود یا به عبارت دیگر با عمل درون‌یابی، نقشه‌ای پیوسته از این شاخص برای منطقه مطالعاتی تهیه نمود. علاوه بر آن این امکان وجود دارد تا دقت هر نقشه و سطح اطمینان به آن را مشخص نمود.

در روش‌های آمار کلاسیک به دلیل در نظر نگرفتن پراکنش نقاط و فاصله مکانی و یا زمانی آن‌ها، امکان دستیابی به دقت مطلوب، همیشه امکان‌پذیر نمی‌باشد.

امروزه با گسترش و توسعه کامپیوتر، امکان استفاده از مدل‌های پیچیده زمین‌آماري آسان شده است. زمین‌آمار در علوم آب و خاک کاربرد زیادی پیدا کرده است. بخصوص در چند سال اخیر، تحقیقات زیادی در رابطه با تغییرات مکانی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک از قبیل بافت عناصر شیمیایی موجود در خاک به عمل آمده است. روش تخمین و برآورد متغیر پیوسته را در مناطق نمونه‌گیری نشده در داخل ناحیه‌ای که مشاهدات نقطه‌ای پراکنده شده‌اند، درون‌یابی^۴ می‌گویند (قهرودی تالی، ۱۳۸۴). تکنیک‌های درون‌یابی به دو شیوه کلی انجام می‌شود، روش اول متقن^۵ نامیده می‌شود که در این شیوه درون‌یابی بر اساس تعیین سطح از نقاط نمونه‌گیری شده و بر پایه شباهت‌ها مانند روش وزن‌دهی عکس فاصله (IDW^6) یا درجه هموارسازی (توابع پایه شعاعی^۷) انجام می‌شود. روش دوم درون‌یابی زمین‌آماري است که یکی از روش‌های آن کریجینگ^۸ نامیده می‌شود و بر اساس ویژگی‌های آماری نقاط نمونه‌گیری شده می‌باشد. تکنیک‌های درون‌یابی زمین‌آماري کمیت همبستگی مکانی نقاط نمونه برداری شده را مدنظر قرار داده و تخمین را بر اساس موقعیت قرارگیری مکان نمونه‌های اندازه‌گیری نشده انجام می‌دهد (محمدی، ۱۳۸۵).

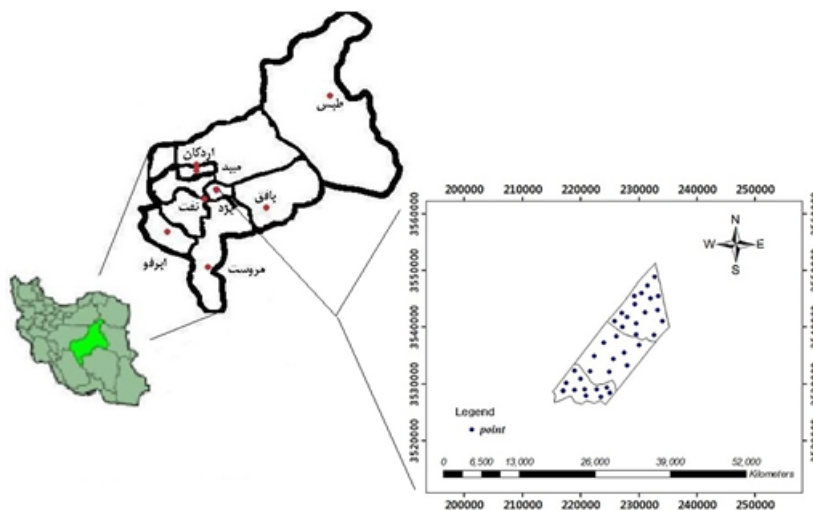
با هم اختلاف دارد. Sun و همکاران (۲۰۱۲) برخی از خصوصیات خاک را با استفاده از الگوریتم کریجینگ- رگرسیون محلی آنالیز و پیش بینی کردند. نتایج ارزیابی حاکی از آن است که روش کریجینگ- رگرسیون همیشه بهترین پیشگویی‌ها را نشان نمی‌دهد اما در موارد خاص ممکن است بالاترین دقت را در پیشگویی خصوصیات خاک داشته باشد.

به سبب تنوع روش‌های درون‌یابی لازم است تا کم خطاترین روش در ارزیابی تغییرات عوامل زمینی مشخص گردد لذا در این مقاله تلاش شده است تا تعدادی از رایج‌ترین روش‌های درون‌یابی نرم افزار ArcGIS نظیر کریجینگ معمولی، ساده و جهانی به همراه روش عکس مجذور فاصله مورد ارزیابی قرار گیرد. به کمک روش‌های درون‌یابی اشاره شده، پهنه‌بندی شاخص فرسایش‌پذیری آبی خاک صورت پذیرفته است.

مواد و روش‌ها مشخصات کلی منطقه

در مناطق خشک و نیمه خشک به سبب عدم وجود پوشش متراکم گیاهی و همچنین رخدادهای ناگهانی و سیلابی به سبب بالا بودن ضریب تغییرات بارندگی، وقوع فرسایش آبی انکارناپذیر است. رسوبات آبی اراضی بالادست در این مناطق منبع تغذیه فرسایش بادی در مناطق پست دشت می‌باشد. لذا بررسی وضعیت فرسایش آبی کمک خواهد کرد تا یکی از مهمترین منابع تغذیه رسوبات بادی بیشتر شناخته شود. منطقه مورد مطالعه واقع در ۲۰ کیلومتری شهر یزد در عرض ۳۵°۲۶'۳۰" تا ۳۵°۱۷'۱۲" شمالی و طول ۶۱°۱۰'۲۱" تا ۶۱°۱۸'۲۳" شرقی واقع شده و در واقع نواری طولی است بین کوه خضرآباد در بالادست و شهرهای اشکذر و زارچ در پایین دست قرار دارد که دشت‌سرای لخت، اپانداز و پوشیده را در بر می‌گیرد.

حداکثر ارتفاع این ترانسکت در بخش مجاور کوهستان، ۱۷۸۳ متر و حداقل آن با ارتفاع ۱۱۴۱ متر در محل حاشیه رخساره تپه‌های ماسه‌ای در مجاور جاده یزد- اردکان بوده و مساحت این مقطع طولی، ۲۰۸ کیلومترمربع است. شکل (۱) موقعیت مقطع مورد مطالعه را در استان یزد و دشت یزد- اردکان نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

عظیم زاده و همکاران (۱۳۸۴) از روش کریجینگ جهت تخمین درصد سنگفرش بیابانی و سرعت آستانه فرسایش بادی استفاده نمودند. به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش کریجینگ معمولی شیوه‌ای مناسب و دقیق جهت تهیه نقشه توزیع پوشش رگ و خطوط هم سرعت آستانه می‌باشد. با بررسی مدل‌های برازش شده برای توزیع سنگفرش بیابانی نشان دادند الگوی تغییرات گوسی است. صارمی و همکاران (۱۳۸۶) در تحقیقی با پهنه‌بندی مقادیر سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از تکنیک زمین آمار به این نتیجه رسیدند که روش کریجینگ نسبت به IDW با استفاده از مدل کروی مناسب‌ترین روش جهت میان‌یابی می‌باشد. Creutin و Obled (۱۹۸۲) و Salas و Tabios (۱۹۸۵) در مقایسه روش کریجینگ با چندین تکنیک درون‌یابی دیگر از جمله IDW جهت برآورد توزیع بارش سالیانه به این نتیجه رسیدند که کریجینگ نسبت به روش‌های دیگر برتری نسبی دارد. در برخی از مطالعات نشان دادند که معمولاً کارایی کریجینگ بهتر از IDW می‌باشد (Hosseini و همکاران، ۱۹۹۴؛ Dalthorp و همکاران، ۱۹۹۹؛ Kravchenko و Bullock، ۱۹۹۹؛ Kravchenko و Reinstorf، ۲۰۰۳؛ همکاران، ۲۰۰۵). Yasrebi و همکاران (۲۰۰۹) با ارزیابی و مقایسه روش‌های کریجینگ معمولی و IDW جهت پیش‌بینی تغییرات مکانی برخی از خصوصیات شیمیایی خاک به این نتیجه رسیدند که روش کریجینگ معمولی مناسب‌ترین روش برای پیش‌بینی و طراحی توزیع مکانی خصوصیات شیمیایی خاک می‌باشد. Baskan و همکاران (۲۰۱۰) الگوی گوسی به روش کریجینگ را در تهیه نقشه پهنه‌بندی شاخص K مورد استفاده قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که نقشه تهیه شده دارای اعتبار مناسب است. واعظی و همکاران (۲۰۱۰) با مقایسه تغییرپذیری مکانی عامل فرسایش‌پذیری خاک برآورد شده و اندازه‌گیری شده در USLE در شمال غربی ایران به این نتیجه رسیدند که شبیه‌ساز نمایی مناسب‌ترین مدل برای نشان دادن تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری برآورد و اندازه‌گیری شده است. Motaghian و Mohammadi (۲۰۱۱) با پیش‌بینی تغییرات مکانی شاخص پایداری خاکدانه‌ها و کربن آلی خاک با استفاده از فناوری زمین آمار به این نتیجه رسیدند که الگوی مکانی متغیرهای اندازه‌گیری شده خاک در اندازه‌های متفاوت خاکدانه‌ها،

عمق، مشخصات ساختمان سطحی خاک به عنوان متغیر مؤثر در فرسایش‌پذیری مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۲) نحوه نمونه‌برداری از خاک سطحی را نشان می‌دهد. کدهای ساختمان خاک نیز بر اساس اندازه و شکل خاکدانه‌ها و نفوذ آب در خاک از جداول پیشنهادی ویشمایر و اسمیت تعیین گردید (Wischmeier و Smith، ۱۹۷۸). نفوذپذیری خاک بر اساس سرعت نهایی نفوذ و با روش استوانه‌های مضاعف در صحرا اندازه‌گیری گردید.



شکل ۲- نحوه نمونه‌برداری از خاک سطحی

عملیات صحرائی

در این تحقیق در ابتدا به کمک نقشه‌های توپوگرافی، عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای ETM^+ و با استفاده از نرم افزار ArcGIS مرز منطقه مطالعاتی را مشخص و نقشه‌های واحدهای سنگ‌شناسی، زمین‌شناسی و رخساره‌های ژئومورفولوژی بر اساس سیستم مختصات UTM از منطقه مطالعاتی تهیه گردید. با کمک نقشه‌های مذکور، با استفاده از روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی-تصادفی، نمونه‌های خاک تا عمق ۱۰ سانتی‌متری در درون رخساره‌ها برداشت شد. در همین

روش‌های درون‌یابی

روش‌های مختلفی برای برآورد متغیرهای با تغییرات زمانی و مکانی وجود دارد. تفاوت عمده‌ی این روش‌ها مربوط به نحوه محاسبه وزنی است که به نقاط مشاهده شده‌ی اطراف نقطه‌ی مجهول داده می‌شود.

روش درون‌یابی معکوس فاصله (IDW)

در روش IDW، به هر یک از نقاط، وزنی بر اساس فاصله بین هر نقطه تا موقعیت نقطه مجهول تخصیص می‌یابد. این اوزان توسط توان وزن‌دهی کنترل می‌شود، به طوری که توان‌های بزرگتر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد تخمین را کاهش می‌دهد و توان‌های کوچکتر وزن‌ها را به طور یکنواخت‌تری بین نقاط همسایه توزیع می‌کند. در این روش مقدار فاکتور وزنی با استفاده از فرمول (۲) محاسبه می‌گردد:

$$Z^*(x_0) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^a}} Z(x_i) = \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

عملیات آزمایشگاهی و محاسباتی

پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، آزمایش‌های لازم مطابق روش‌های استاندارد روی آن‌ها انجام گرفت. توزیع دانه‌بندی خاک به روش هیدرومتر، درصد شن خیلی ریز با استفاده از الک تر، درصد ماده آلی به روش والکی بلاک^۱ تعیین گردید (Klut، ۱۹۸۶). سپس شاخص فرسایش‌پذیری از فرمول ذیل محاسبه گردید (Smith و Wischmeier، ۱۹۸۷).

$$K = \frac{\{2.1M^{1.14}(10^{-4})(12-a) + 3.25(b-2) + 2.5(c-3)\}}{100} \quad (1)$$

که در آن M ، a ، b و c به ترتیب حاصلضرب مجموع درصد سیلت و شن بسیار ریز در ۱۰۰ منهای درصد رس، درصد مواد آلی، کد ساختمان و کد نفوذپذیری نیم‌رخ خاک است. در این معادله عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) با لحاظ ضریب ۰/۱۳۱۷ بر حسب تن ساعت بر مگازول میلی‌متر ارائه شد (Donahue و Miller، ۱۹۹۰). برای تحلیل داده‌ها با نرم افزار SPSS، 16 جهت اثبات فرض نرمال بودن داده‌ها از آزمون غیر پارامتری کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد.

تغییر مختصات جغرافیایی است. به عبارت دیگر بخش قطعی مؤلفه متغیر ناحیه‌ای برابر با مقداری ناشناخته است و از طریق معادله‌ای خطی و ساده بین متغیر ناحیه‌ای و مختصات قابل تخمین است. رابطه حاکم بر کریجینگ معمولی مانند معادله (۴) خواهد بود. با این تفاوت که در این حالت بخش مؤلفه قطعی مقداری نامشخص است.

کریجینگ جهانی^{۱۵}

در شرایطی که هر دو مؤلفه تغییرپذیری (قطعی و تصادفی) به طور همزمان در ساختار مکانی متغیر ناحیه‌ای وجود داشته باشد و مؤلفه‌ی قطعی در بر گیرنده روند و تغییرات بلند دامنه و عامل روند قابل شناسایی باشد، آنگاه می‌توان با استفاده از توابع آماری غیر خطی، اقدام به مدلسازی روند کرد و پس از کسر آن از مقادیر متغیر مورد مطالعه، واریوگرام باقیمانده‌های حاصل از روند را محاسبه نمود. به عبارت دیگر کریجینگ جهانی عبارت از مدل‌سازی توابع واریوگرام در شرایط حضور روند بلند دامنه است. بر خلاف نام نهاده شده بر تخمین‌گر کریجینگ جهانی، در عمل دامنه کاربردی کریجینگ جهانی به دلیل دشواری در محاسبات مربوط به واریوگرام در حضور روند و همچنین، محدودیت‌های مربوط به مدل‌سازی روند و مقید بودن به استفاده از توابع چند متغیره مرتبه اول و دوم، تخمین‌گر جامعی محسوب نمی‌شود. این روش را می‌توان "کریجینگ در حضور روند" نامید (محمدی، ۱۳۸۵).

به منظور بررسی و مطالعه تغییرات مکانی فرسایش‌پذیری خاک، ابتدا واریوگرام‌های تجربی به طور مجزا برای هر سه روش کریجینگ ساده، معمولی و جهانی و در جهات مختلف جغرافیایی ترسیم و مورد بررسی قرار گرفت. ناهمسانگردی با محاسبه و ترسیم واریوگرام‌های تجربی همه جهته و در جهات مختلف تعیین گردید. برای بررسی دقت روش‌های میان‌یابی و انتخاب بهترین روش میان‌یابی، روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از مهمترین این روش‌ها تکنیک ارزیابی دوجانبه^{۱۶} می‌باشد. این تکنیک بر این اساس است که در هر مرحله یک نقطه مشاهده‌ای حذف شده و با استفاده از بقیه نقاط مشاهده‌ای، آن نقطه برآورد می‌شود. این کار برای کلیه نقاط مشاهده‌ای تکرار می‌شود، به طوری که در آخر به تعداد نقاط مشاهده‌ای، برآورد وجود خواهد داشت. معیارهای میانگین خطای انحراف (اریبی خطا) (MBE) ^{۱۷}، میانگین مطلق خطا (دقت) (MAE) ^{۱۸}، ریشه دوم میانگین مربع خطا $(RMSE)$ ^{۱۹} و درصد بهبود نسبی (RI) ^{۲۰} برای ارزیابی کارایی روش‌های مختلف و بر اساس روابط زیر استفاده شد:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)| \quad (۵)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)) \quad (۶)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (۷)$$

که در آن λ_i وزن ایستگاه i ام، di فاصله بین نقطه تخمین تا هر کدام از نمونه‌های واقع در همسایگی آن، $Z(x_i)$ مقدار نمونه‌های واقع در همسایگی محل تخمین، $Z^*(x_0)$ مقدار برآورد در محل مورد تخمین و α توان وزن‌دهی می‌باشد.

روش درون‌یابی کریجینگ

یکی از روش‌های استفاده شده کریجینگ است که بهترین تخمین‌گر خطی ناریب $(B.L.U.E)$ ^{۱۱} نام گرفته است. روش فوق یک روش تخمین زمین‌آمار است که با استفاده از مقادیر معلوم و نیم تغییرنا^{۱۱}، مقادیر مجهول را برآورد می‌کند. نیم تغییرنا با نماد نشان داده می‌شود و به شرح زیر محاسبه می‌گردد:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (۳)$$

که در آن $\gamma(h)$ مقدار نیم تغییرنا برای جفت نقاط به فاصله h از هم‌دیگر، $n(h)$ تعداد زوج نقاط، $Z(x_i)$ مقدار مشاهده شده متغیر $Z(x_i + h)$ و x مقدار مشاهده شده متغیر به فاصله h از x می‌باشد. شرط استفاده از این تخمین‌گر این است که، متغیر Z دارای توزیع نرمال باشد. در غیر اینصورت یا باید از کریجینگ غیرخطی استفاده کرد و یا اینکه به نحوی توزیع متغیرها را به نرمال تبدیل کرد.

کریجینگ ساده^{۱۳}

گاهی اوقات دسترسی به اطلاعاتی در مورد میانگین متغیر تصادفی مورد نظر، از طریق تجارب و مطالعات قبلی، امکان پذیر است. در چنین وضعیتی، از اطلاعات حاضر می‌توان به منظور بهبود و ارتقای تخمین استفاده کرد. سیستم کریجینگ ساده، چارچوب محاسباتی مورد نظر را فراهم می‌کند. تخمین‌گر کریجینگ ساده به شکل ترکیب خطی وزن‌دار است و جهت استفاده از آن بایستی واریوگرام‌ها دارای حد آستانه باشد $(Kravchenko, 2003)$. مقدار متغیر ناحیه‌ای $Z(x)$ در هر نقطه را می‌توان به دو مؤلفه قطعی و تصادفی تقسیم نمود. در کریجینگ ساده فرض بر آن است که بخش قطعی مؤلفه ثابت و شناخته شده و برابر با $L(x)$ بخش غیر قطعی و تصادفی مؤلفه می‌باشد. در این حالت رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$z(x) = \mu + L(x) \quad (۴)$$

بدین لحاظ در کریجینگ ساده در هر موقعیت به دلیل مشخص بودن μ مقدار $L(x)$ نیز دقیقاً مشخص شده است. البته بدیهی است که ثابت در نظر گرفتن بخش قطعی مؤلفه (μ) ، اغلب غیر واقعی است. لیکن در شرایطی که به اطلاعات دسترسی وجود دارد، چنین فرض امکان‌پذیر است. در روش کریجینگ ساده نیز پس از رسم واریوگرام می‌توان به مقدار خطای اندازه‌گیری و درون‌یابی دست یافت.

کریجینگ معمولی^{۱۴}

در این روش نیز فرض می‌شود مقدار متغیر ناحیه‌ای از دو مؤلفه قطعی و تصادفی تشکیل یافته است. تفاوت این روش با کریجینگ ساده آن است که بخش مؤلفه‌ی قطعی دارای روندی خطی همگام با

در کلاس ۳ قرار داشتند. دامنه تغییرات فرسایش پذیری خاک در رخصاره‌های دشت سر لخت ۰/۲۷۶۶ - ۰/۱۴۰۰۰، دشت سر اپانداز ۰/۱۳۲ - ۰/۰۱۳۲ و دشت سر پوشیده ۰/۰۴۶ - ۰/۰۰۲ تن ساعت بر مگاژول میلی‌متر می‌باشد. شاخص فرسایش پذیری اندازه‌گیری شده خاک از طریق تبدیل لگاریتمی، نرمال شد. شکل ۳- الف) نمودار هیستوگرام توزیع داده‌های شاخص فرسایش پذیری آبی (K) قبل از نرمال سازی و ۳- ب) پس از نرمال سازی به روش تبدیل لگاریتمی را نشان می‌دهد.

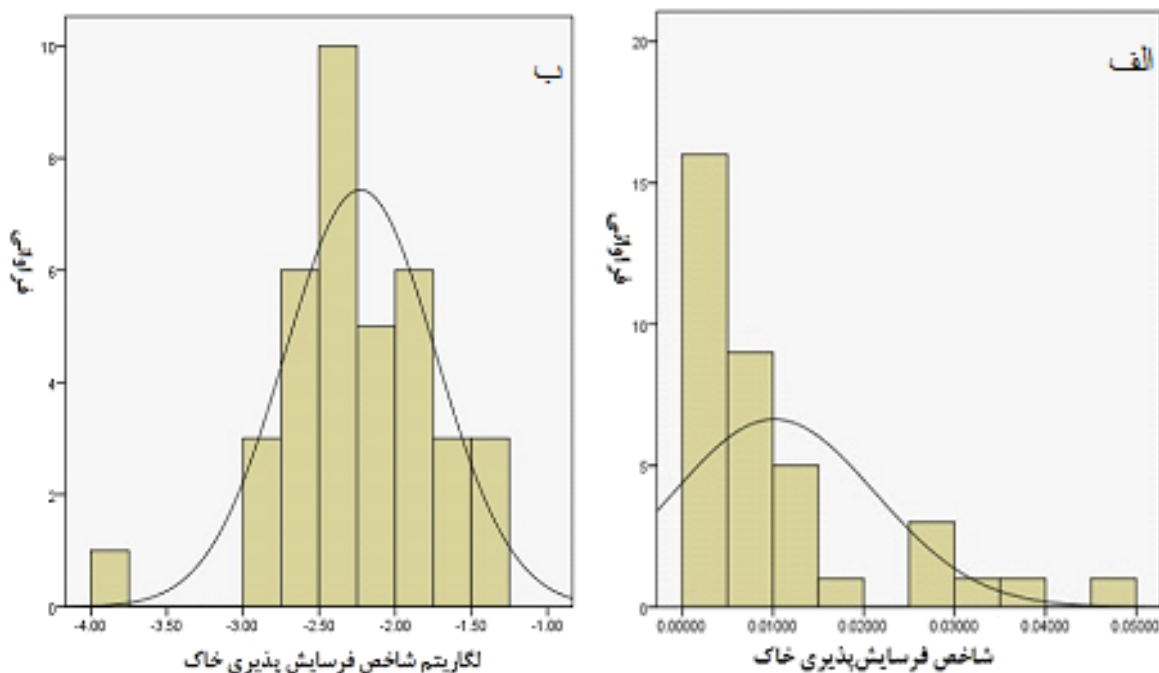
نتایج نشان داد که واریوگرام‌های فرسایش پذیری آبی (K) با مدل کروی سازگاری دارد به جزء در روش کریجینگ معمولی که واریوگرام مربوط به آن با مدل گوسی برازش داده شد. نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش پذیری خاک با تکنیک‌های مختلف زمین آماری شامل کریجینگ معمولی، کریجینگ جهانی، کریجینگ ساده، معکوس فاصله با توان دو ترسیم گردید. شکل‌های (۴)، (۵)، (۶) و (۷) نقشه‌های پهنه‌بندی فرسایش پذیری خاک را با روش‌های مذکور نشان می‌دهد. شکل (۸) تغییرنامه‌های همه جهت‌های درون‌یابی کریجینگ معمولی، ساده و جهانی را نشان می‌دهد.

$$RI = \frac{100 |RMSE_{best} - RMSE_{current}|}{RMSE_{current}} \quad (8)$$

که در آن‌ها، $RMSE_{current}$ ، $RMSE_{best}$ ، n ، $Z(x_i)$ ، $Z^*(x_i)$ به ترتیب مقدار برآورد شده متغیر مورد نظر، مقدار اندازه‌گیری شده متغیر مورد نظر، تعداد داده‌ها، ریشه دوم میانگین مربع خطای بهینه و ریشه دوم میانگین مربع خطای محاسبه شده می‌باشد. به منظور بررسی تغییرات مکانی و تهیه نقشه پهنه‌بندی فرسایش پذیری خاک از نرم افزار ArcGIS استفاده گردید.

نتایج

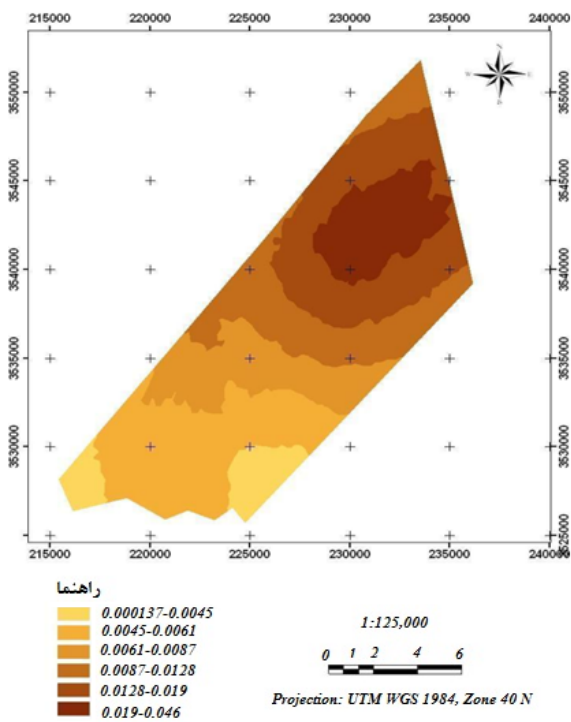
نتایج تجزیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نشان داد که خاک‌ها عمدتاً بافت سبک شنی تا لوم شنی با ماده آلی کم و آهکی است. خاک‌های مورد بررسی از نظر شکل ساختمانی دانه‌ای و اسفنجی خیلی ریز تا ریز بوده و کد ساختمانی آنها بر اساس USLE (۱ و ۲) بود. نفوذپذیری نیم‌رخ خاک زیاد تا خیلی زیاد (۱۸/۴ سانتی‌متر در ساعت) و بر اساس USLE غالباً در کلاس ۱، ۲ و در برخی موارد



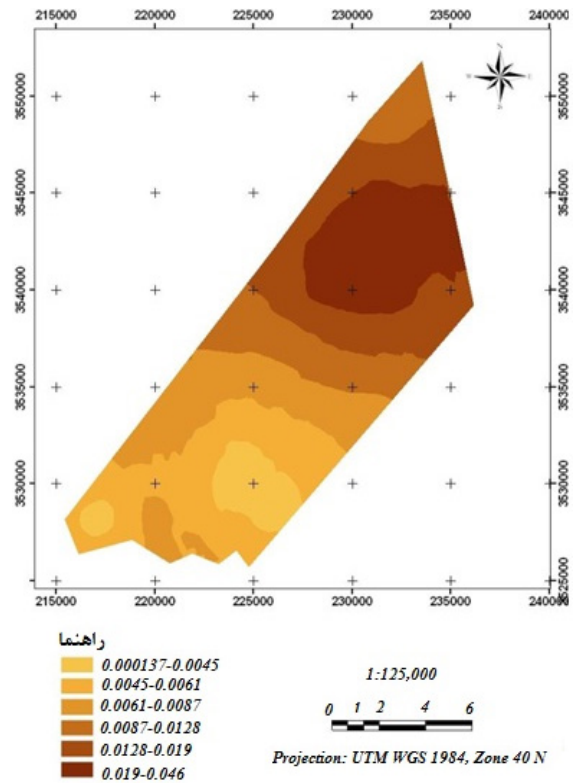
شکل ۳- هیستوگرام توزیع داده‌های شاخص فرسایش پذیری آبی (K) قبل از نرمال سازی (الف) و پس از نرمال سازی به روش لگاریتمی (ب)

اثر قطعه‌ای به سقف وجود ندارد. ارزیابی دقت و صحت روش‌های درون‌یابی ذکر شده با شاخص‌های میانگین مطلق خطا (دقت)، میانگین خطای انحراف (میانگین آریبی خطا)، ریشه دوم میانگین مربع خطا و درصد بهبود نسبی در جدول (۲) گزارش شده است. مقادیر MAE و MBE میزان صحت^{۲۱} را نشان می‌دهند.

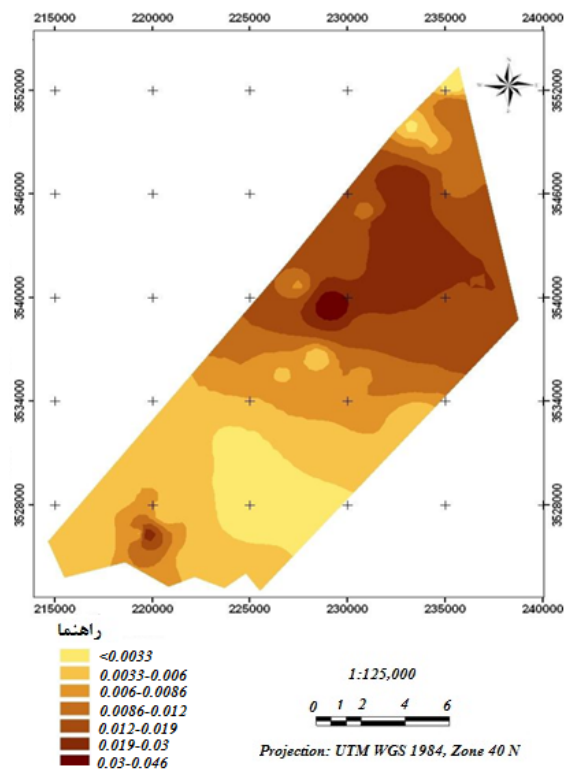
نتایج رسم نیم تغییرنما و انتخاب مدل مناسب بر آن نشان داد که در روش‌های کریجینگ ساده و جهانی مدل کروی و در کریجینگ معمولی مدل گوسی دارای بهترین برازش است. جدول (۱) پارامترهای تغییرنمای روش‌های درون‌یابی به کار رفته شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول (۱) آمده است اختلاف قابل ملاحظه‌ای در اثر قطعه‌ای و سقف نیم تغییرنما و به دنبال آن نسبت



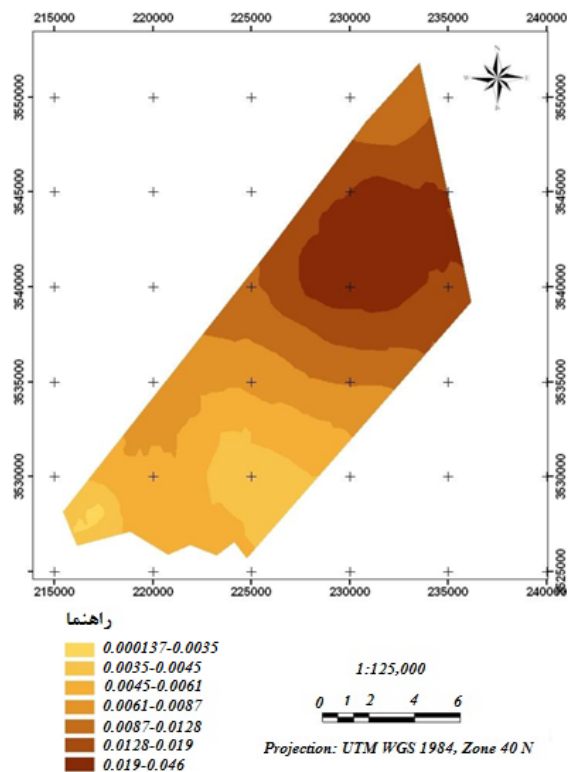
شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی فرسایش‌پذیری خاک به روش کریجینگ معمولی



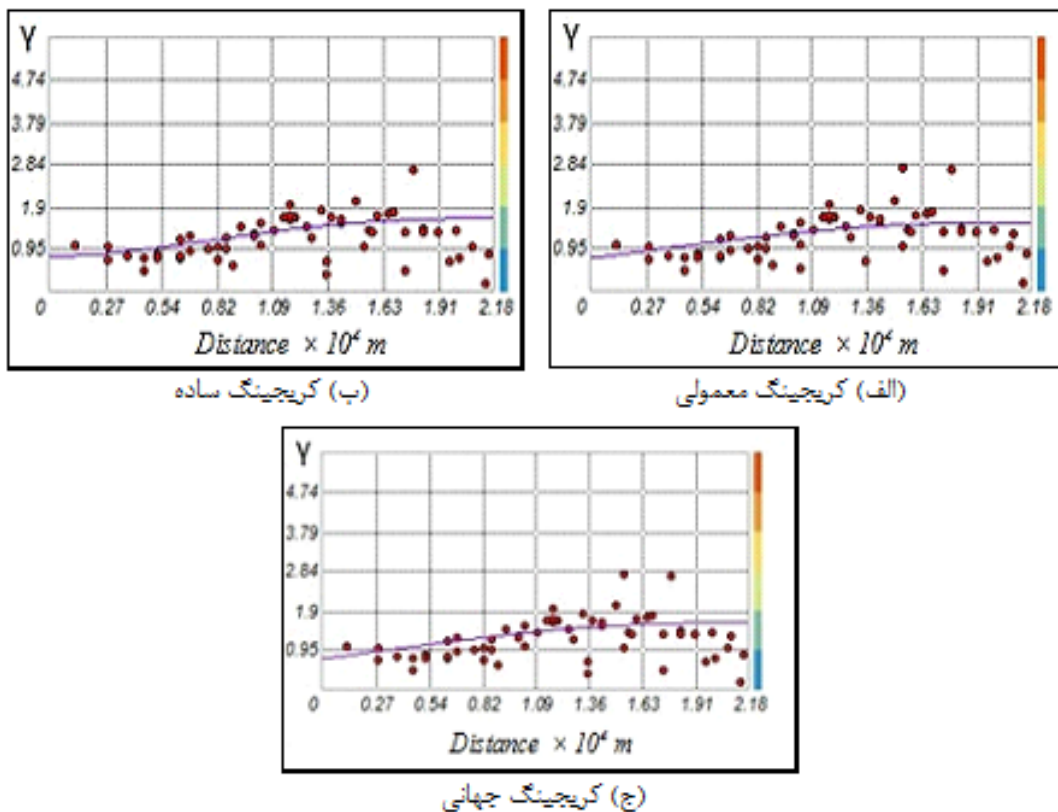
شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی فرسایش‌پذیری خاک به روش کریجینگ ساده



شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی فرسایش‌پذیری خاک به روش تابع معکوس فاصله



شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی فرسایش‌پذیری خاک به روش کریجینگ جهانی



شکل ۸- تغییرنماهای همه جهته روش‌های درون‌یابی کریجینگ معمولی (الف)، ساده (ب) و جهانی (ج)

جدول ۱- پارامترهای تغییرنمای روش‌های درون‌یابی به کار رفته شده

روش‌های درون‌یابی	پارامتر	مدل	اثر قطعه‌ای ($Mj.mm/Ton.h$)	سقف ($Mj.mm/Ton.h$)	دامنه تأثیر (متر)	وابستگی مکانی
کریجینگ معمولی	گوسی	۰/۷۹	۱/۶۷	۲۲۹۴۵/۴	۰/۴۷	
کریجینگ ساده	کروی	۰/۷۲	۱/۵۲	۲۱۳۶۰/۹	۰/۴۷	
کریجینگ جهانی	کروی	۰/۷۲	۱/۵۹	۲۰۴۳۳	۰/۴۵	

خاک دارای ناهمسانگردی هندسی در محور دشت‌سر لخت به پوشیده است. به عبارت دیگر تغییرات در جهت عرض دشت بیشتر از جهت طولی آن است. این نتایج با بررسی‌های عظیم زاده و همکاران (۱۳۸۴)، صارمی و همکاران (۱۳۸۶) انطباق دارد. مقایسه مقادیر MAE تخمین‌گرهای کریجینگ معمولی، جهانی، ساده و معکوس فاصله نشان می‌دهد، کمترین مقدار MAE مربوط به کریجینگ معمولی و بیشترین آن مربوط به معکوس فاصله است. از لحاظ این پارامتر اختلاف چندانی بین تخمین‌گرهای مختلف کریجینگ وجود ندارد. دلیل این امر را در روند تغییر شاخص فرسایش‌پذیری در جهات طول و عرض جغرافیایی بایستی جستجو نمود.

بحث

فرسایش‌پذیری معادله تلفات جهانی فرسایش آبی، عاملی مهم در فرآیند فرسایش است. از آنجا که عوامل مختلفی نظیر پوشش سنگفرش بیابانی، درصد مواد آلی، درصد شن، سیلت، نفوذپذیری و ساختمان خاک در آن مؤثر است و این عوامل دارای تغییرات مکانی است. فرسایش‌پذیری نیز دارای تغییر مکانی است. شاخص فرسایش‌پذیری در دشت‌سر لخت در محدوده 0.0055 ± 0.0072 ، در دشت‌سر اپانداژ 0.005 ± 0.0037 و در دشت‌سر پوشیده 0.0173 ± 0.0133 تن ساعت بر مگاژول میلیمتر متغیر است. بررسی واریوگرام‌های رسم شده در جهات مختلف طولی و عرضی دشت نشان می‌دهد تغییرات مکانی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

جدول ۲- ارزیابی صحت روش‌های درون‌یابی فرسایش‌پذیری خاک در ArcGIS

RMSE	(%)RI	MBE	MAE	شاخص‌های آماری نوع تخمینگر
۰/۰۰۹۷	۱۸/۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۶۵	کریجینگ معمولی
۰/۰۰۹۸	۱۸/۳	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۶۷	کریجینگ جهانی
۰/۰۰۹۹	۱۸/۵	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۶۸	کریجینگ ساده
۰/۰۱۰۷	۲۰/۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۷۶	معکوس فاصله

فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از روش زمین‌آمار و GIS (مطالعه موردی حوزه آبخیز مهر سبزواری)، مجله منابع طبیعی ایران، ۶۰(۲): ۳۶۹-۳۸۲.

۲. صارمی نائینی، م.ع.، زارعیان جهرمی، م.، اختصاصی، م.ر. محمدیان بهبهانی، ع. ۱۳۸۶. پهنه‌بندی مقادیر سرعت آستانه فرسایش بادی با استفاده از زمین‌آمار (مطالعه موردی: محدوده شهر یزد). دهمین کنگره علوم خاک ایران، کرج، ۴ تا ۶ شهریور ۱۳۸۶. ۱۱۳۶-۱۱۳۷.

۳. عظیم‌زاده، ح.ر.، اختصاصی، م.ر. محمدی، ج. رفاهی، ح.ق. ۱۳۸۴. کاربرد زمین‌آمار (ژئواستاتیسیتیک)، به روش کریجینگ در تخمین درصد سنگفرش بیابانی و سرعت آستانه فرسایش بادی، اولین همایش ملی فرسایش بادی، ایران، ۴ تا ۶ بهمن ۱۳۸۴. ۵۷۷-۵۶۶.

۴. قهرودی تالی، م. ۱۳۸۴. سیستم اطلاعات جغرافیایی در محیط سه بعدی. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد تربیت معلم. ۲۷۳ ص.

۵. محمدی، ج. ۱۳۸۵. پدومتری. جلد دوم، آمار مکانی، انتشارات پلک. ۴۵۳ ص.

6. Alexandra, K. and Bullock, G. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties, *Agronomy Journal*, :91 400-393.

7. Baskan, D., Cabel, H., Akgul, S. and Erpul, G. 2010. Conditional Simulation of USLE/RUSLE Soil erodibility factor by geostatistics in a Mediterranean Catchment, Turkey, *Environmental Earth Science*. 1187-1179 :60.

8. Creutin, J.D. and Obled, C. 1982. Objective analysis and mapping techniques for rainfall fields: An objective comparison. *Water Resource Research*, 431-413 :(2)18.

9. Dalthorp, D., Nyrop J. and Villani, M. 1999. Estimation of local mean population densities of Japanese beetle grubs (Scarabaeidae: Coleoptera). *Environmental Entomology*, 265-255 :(2)28.

10. Ghorbani Vagheie, H. and Bahrami, H.A.

مقادیر MAE و MBE در حالت ایده‌آل بایستی مساوی صفر باشند. مقادیر مثبت یا منفی این دو پارامتر به ترتیب نشان‌دهنده برآورد بیشتر ۲۲ یا کمتر از مقدار واقعی ۲۳ می‌باشد (Isaaks و ۱۹۸۹، Serivastava، Wakernagel، ۲۰۰۲). در واقع MAE معرف دقت روش و مقدار متوسط خطاست که هر چه به صفر نزدیکتر باشد، نشان‌دهنده دقت بیشتر است و MBE نشانگر میانگین انحراف معیار مقدار برآوردی از مقدار مشاهده شده است که مسلماً هر چه کمتر باشد مطالعه دارای دقت بیشتری است (Alexandra و Bullock، ۱۹۹۹).

با توجه به شاخص‌های MAE، MBE، RMSE و RI که برای مقایسه روش‌های درون‌یابی بکار گرفته شده، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که روش کریجینگ معمولی دارای صحت بیشتر و خطای کمتری است. شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق در مقالات زیر نیز مورد تأکید قرار گرفته است. Isaaks و Serivastav (۱۹۸۹) پیشنهاد کردند که MAE و RMSE می‌تواند به عنوان معیاری که هر دو ویژگی انحراف (اریبی) و دقت روش را در بردارند، برای مقایسه دقت روش‌ها بکار روند. همچنین *Journal* (۱۹۸۹)، متذکر شد که MAE معیار قویتری نسبت به MBE می‌باشد که در اکثر تحقیقات برای مقایسه دقت روش‌های میان‌یابی به کار می‌رود. روشی که کمترین مقدار شاخص RMSE و RI را داشته باشد، به عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب می‌شود.

بر اساس نتایج حاصل از تحقیق حاضر، تداوم بررسی‌ها برای مناطق دیگر کشور با تنوع خاکی متفاوت از لحاظ بافت خاک و سنگریزه ضروری است. بدین ترتیب تأثیرگذاری ذرات رس و سیلت در شاخص فرسایش‌پذیری خاک (K) بهتر بررسی خواهد شد. همچنین در ایران دو پارامتر مهم و تأثیرگذار یعنی شوری و قلیائیت (شوری-سدیمی) می‌تواند سهم مهمی در این شاخص داشته باشد. همچنین تبیین تیمارهای مختلف و اندازه‌گیری اثرات این دو پارامتر بر شاخص فرسایش‌پذیری خاک (K) با استفاده از باران‌ساز پیشنهاد می‌گردد.

منابع مورد استفاده

۱. ایوبی، ش.، و م. حسینعلی‌زاده. ۱۳۸۶. بررسی تغییرات مکانی

- at the Catchment Scale Using Geostatistical Techniques. *Pedosphere*. 399-389 :(3)21.
19. Miller, R.W., and Donahue, R.L. 1990. "Soils: An introduction to soils and plant growth", Prentice- Hall International, P:454.
20. Reinstorf, F., Binder, M., Schirmer, M., Grimm-Strele, J. and Walther, W. 2005. Comparative assessment of regionalization methods of monitored atmospheric deposition loads. *Atmospheric Environmental*, 3674-3661 :(20)39.
21. Sun, W., Minasny, B. and McBratney, A. 2012. Analysis and prediction of soil properties using local regression-kriging. *Geoderma*. -16 :172-171 23.
22. Tabios, G.Q. and Salas, J.D. 1985. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resources Bulletin*, 380-365 :(3) 21.
23. Vaezi, A.R., Bahrami, H.A. Sadeghi, S.H. R. and Mahdian, M. H. 2010. Spatial Variability of Soil Erodibility Factor (K) of the USLE in North West of Iran. *JAST*, 252-241 :12.
24. Wakernagel, H. 2002. *Multivariate geostatistics*. Springer Press, 387 PP.
25. Wischmeier, W.H. and Smith, D.D. 1978. "Predicting rainfall erosion losses : a guide to conservation planning". *Agriculture Handbook* NO. 537. US Department of Agriculture, Washington DC., pp. 27-13.
26. Yasrebi, J., Saffari, M., Fathi, H., Karimian, N., Moazallahi, M. and Gazni, R. 2009. Evaluation and Comparison of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighting Methods for Prediction of Spatial Variability of Some Soil Chemical Parameters. *Research Journal of Biological Sciences*. 102-93 :(1)4.
2005. "Spatial changes of USLE and RUSLE soil erodibility index using GIS case study: North East of Lorestan Province". *Proceedings of the Third National Conference of Erosion & Sediment (In Persian)*. Tehran. Iran.
11. Hosseini, E., Gallichand J. and Marcotte, D. 1994. Theoretical and experimental of spatial interpolation methods for soil salinity analysis. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 1807-1799 :(2) 37.
12. Isaaks, E.H. and Serivastava, R.M. 1989. *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University. Press. 561 PP.
13. Journel, A.G. 1989. In: *Fundamental of Geostatistics in Five Lesson, Short Course in 6 Geology*, Vol 8. American Geophysical Union.
14. Klut, A. 1986. "Methods of Soil Analysis" Part : I. *Physical and Mineralogical Methods*. 2nd Ed. Soil Science Society American Journal. 1188 PP.
15. Kravchenko, A. and Bullock, D.G. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal*, 91 400-393 :(4).
16. Kravchenko, A.N. 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society of America Journal*, :(2) 67 1571-1564.
17. McCormack, D.E., Young, K.K. and Darby, G.M. 1984. "Rock fragments and the k factor of the universal soil loss equation, Erosion and Productivity of soils Containing Rock Fragments", 81-73.
18. Mohammadi, J. and Motaghian, M.H. 2011. Spatial Prediction of Soil Aggregate Stability and Aggregate-Associated Organic Carbon Content

