

Spatial Variability Analysis and Zoning of Soil Compaction Using Different Geostatistical Methods

VAHID BAHRPOUR¹, ABBAS ROHANI^{2*}, MOHAMMAD HOSSEIN ABBASPOUR-FARD³, SAEID ZARIFNESHAT⁴ AND MOHAMMAD HOSEIN AGHKHANI⁵

1. Former M.Sc. Student, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2. Associated Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
3. Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
4. Associated Professor, Agricultural engineering research department, khorasan razavi agricultural and natural resources research and education center, AREEO, Mashhad, Iran.
5. Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

(Received: Feb. 17, 2017- Revised: Oct. 20, 2017- Accepted: Feb. 7, 2018)

ABSTRACT

One of the important soil properties, which is related to the soil-plant relationship, is soil compaction. The aim of this study is to investigate the spatial variations of soil compaction using different Geostatistic methods, affected by conservation tillage. To evaluating the Geostatistic, soil samples were taken for regular grid of 10×10 meters in 117 points. The area of study was a 1.2 hectare land in Agricultural Research Center located in the vicinity of Mashhad in Khorasan Razavi province, the soil cone index was measured at the depth of 0-35 cm. After Geostatistic analysis and semivariogram for estimating variables using the kriging methods (EBK) and Deterministic interpolation methods in GS⁺ and Arc (GIS). Criteria for evaluation in this research are the values of root mean square error (RMSE), mean error (ME), using the cross-validation method. The results showed that the empirical Bayesian kriging methods (EBK) and Ordinary Kriging (OK) are the best model to estimate soil compaction region.

Key words: Soil compaction, Conservation tillage, Geostatistics, Interpolation, Kriging

بررسی تغییرات مکانی و پهنه بندی فشردگی خاک با استفاده از روش های مختلف زمین آماری

وحید بحرپور^۱، عباس روحانی^{۲*}، محمد حسین عباسپورفرد^۳، سعید ظریف نشاط^۴، محمد حسین آق خانی^۵
 ۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد،

ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳. استاد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴. استادیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی،

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

۵. استاد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۸/۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۱/۱۸)

چکیده

یکی از خصوصیات مهم در رابطه متقابل بین خاک و گیاه فشردگی خاک می باشد. هدف این مطالعه، بررسی تغییرات مکانی فشردگی خاک با استفاده از روش های مختلف زمین آماری، تحت تاثیر شیوه های خاک ورزی حفاظتی است. جهت ارزیابی زمین آماری، نمونه برداری خاک در ۱۱۷ نقطه در ابعاد ۱۰×۱۰ متر صورت گرفت. منطقه مورد مطالعه، زمینی به وسعت ۱/۲ هکتار از اراضی مرکز تحقیقات کشاورزی استان خراسان رضوی بود، شاخص مخروطی خاک در عمق ۳۵-۰ سانتی متر اندازه گیری شد. بعد از آنالیزهای زمین آماری و تعیین نیم تغییرنما، برای تخمین متغیرها از روش کریجینگ و روش درون یابی قطعی در محیط GS+ و Arc GIS استفاده شد. معیار ارزیابی در این پژوهش مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) با استفاده از روش ارزیابی متقابل بود. نتایج به دست آمده نشان دادند که روش های کریجینگ بیزی تجربی (EBK) و کریجینگ معمولی (OK) به ترتیب بهترین الگو برای تخمین فشردگی خاک منطقه می باشند.

واژه های کلیدی: فشردگی خاک، خاک ورزی حفاظتی، زمین آمار، درون یابی، کریجینگ

مقدمه

شده قادر به ارائه مجموعه‌ی وسیعی از تخمین‌گرهای آماری به منظور به برآورد خصوصیت مورد نظر در نقاط نمونه‌برداری نشده است (Hasani pak, 1998).

در یکی دو دهه اخیر، به موازات پیشرفت سخت افزاری و نرم افزاری و ارائه سامانه اطلاعات جغرافیایی، شاهد توجه و گرایش روز افزون به پردازش و مدل‌سازی داده‌های مکانی هستیم. با توجه به اینکه خصوصیات پارامترهای زیست محیطی دارای ماهیتی پویا و متغیر است و دارای تغییرات مکانی هستند لذا می‌توان پارامترهایی را که بیانگر این خصوصیات است به صورت یک متغیر در نظر گرفت و از طریق روش‌های آماری به بررسی تغییرپذیری آن پرداخت (Huang et al, 2006). از این رو تحقیقات زیادی برای تعیین دقیق ویژگی‌های سخت لایه شخم و الگوی فضایی آن تحت تاثیر روش های خاک‌ورزی جهت کاربرد خاک‌ورزی مکان- ویژه^۴ انجام گرفته است (Raper et al, 2005; Kilic et al, 2004; Fulton et al, 1996).

تجزیه تحلیل تغییرات مکانی و نقشه‌برداری از سخت لایه شخم موجب درک بهتر از تنوع تراکم خاک و خاک‌ورزی دقیق، فرایند تصمیم گیری را برای اصلاح خاک مزرعه بهبود می‌بخشد. در خصوص فشردگی خاک و ارزیابی تغییرات آن، کاسترینانو و همکاران با استفاده از روش های زمین آماری کریجینگ^۵ به بررسی مشکلات ناشی از فشردگی خاک در مزارع کشت گندم در جنوب ایتالیا پرداختند (Castrignano et al, 2002). Kilic et al. (2004) در آزمایش دیگری با استفاده از روش‌های یاد شده تغییرات فضایی فشردگی خاک در ارتباط با برخی خواص فیزیکی خاک در ترکیه مورد ارزیابی قرار دادند. در مطالعه دیگری که در کشور ایتالیا انجام شد تغییرات مقاومت مکانیکی و محتوی رطوبت خاک در زمین های پوشیده از چمن و زیر کشت انگور با استفاده از روش آمار کلاسیک و روش زمین آمار مورد بررسی قرار گرفت (Ferrero et al, 2005). همچنین Tekeste et al. (2009) از تخمین گرهای زمین آماری برای پیش بینی سخت لایه شخم در اراضی جنوب شرقی امریکا استفاده کردند. در یک پژوهش دیگر (Utset & Cid, 2001) تغییرات فضایی مقاومت نفوذ به خاک را در شرایط مختلف رطوبتی در منطقه فرالسول با استفاده از تخمین‌گرهای کریجینگ مورد ارزیابی قرار دادند. در ایران نیز از این روش‌ها در موارد مختلفی استفاده شده است. برای مثال در پژوهشی که توسط Masumi et al., (2008) انجام گرفت، اثر فشردگی و

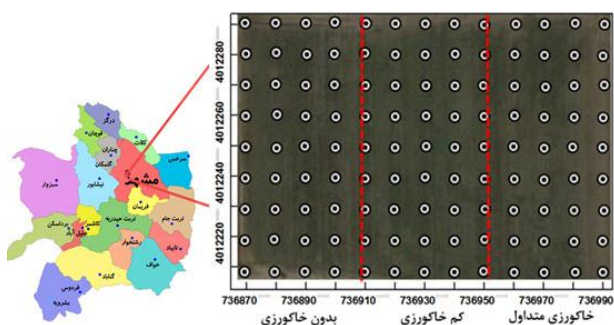
بسیاری از خاک‌های مناطق مختلف دنیا دارای لایه‌ی فشرده شده‌ای می‌باشد که از بین بردن این لایه نیاز به خاک‌ورزی عمیق دارد که سالیانه هزینه بالایی را به خود اختصاص می‌دهد (Khalilian, & Hallman, 1996). بررسی محققین نشان داده است که فشردگی خاک می‌تواند اثر منفی بر رشد گیاه، آب ذخیره شده در خاک، کارایی استفاده آب توسط گیاه، ویژگی های رشد و نمو گیاه، توسعه و توزیع ریشه در خاک، جذب مواد غذایی توسط ریشه و عملکرد گیاه داشته باشد (Kilic et al, 2004). فشردگی خاک در زمین‌های کشاورزی عمدتاً به وسیله عبور ماشین آلات سنگین در طی عملیات خاک‌ورزی، کاشت، کوددهی و در نهایت برداشت ایجاد می‌شود (Usowicz & Lipiec, 2009). کشاورزان هر ساله یا هر چند سال یک‌بار در مزرعه برای از بین بردن سخت لایه شخم^۱ به صورت یکپارچه از زیرشکن استفاده می‌کنند، این عملیات ممکن است در بعضی نقاط غیرضروری باشد و باعث افزایش مصرف سوخت گردد (Adamchuk et al, 2008). بنابراین، علاقه محققان به تعیین موقعیت مکانی سخت لایه شخم افزایش یافته است (Adamchuk et al, 2008). تعیین موقعیت سخت لایه شخم به چندین عامل نظیر محتوی رطوبت خاک، بافت خاک و همچنین زمین مورد بررسی از لحاظ کاربرد ادوات بستگی دارد (Clark, 1999). بررسی‌ها نشان داده است سطوح فشردگی بالاتر از ۲ مگاپاسکال مانع رشد ریشه گیاهان و ایجاد مشکلات زهکشی و کاهش عبور آب به عمق خاک می‌گردد (Ayers, & Perumpral, 1982).

تهیه نقشه مقاومت فشردگی خاک برای توسعه کشاورزی دقیق^۲ امری ضروری است. در کشاورزی دقیق مدیریت به گونه‌ای است که تغذیه گیاهی و استفاده از مواد شیمیایی متناسب با نوع نیاز مزرعه و خاک می‌باشد، حال این ویژگی را می‌توانیم در مدیریت خاک‌ورزی نیز سوق دهیم (Castrignano et al, 2002). یکی از روش‌های غیرمستقیم در تهیه نقشه‌های ویژگی‌های مختلف خاک، زمین آمار^۳ است. در این روش فرض بر آن است که کمیت اندازه گیری شده در هر نقطه از منطقه مطالعاتی تابعی از مختصات جغرافیایی آن نقطه است (Rejman et al, 1998). زمین آمار شاخه‌ای از علم آمار کاربردی است که با استفاده از اطلاعات بدست آمده از نقاط نمونه برداری

4. Site-Specific
5. Kriging

1. Soil compaction
2. Precision farming
3. Geostatistics

دستگاه GPS ساخت شرکت GARMIN مدل VISTA HCX که دقت آن ۳ متر و نرخ داده برداری آن یک ثانیه است صورت گرفت. شکل (۱) نمایی از الگوی نمونه برداری را نمایش می دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و نمایی از شبکه برداری

اندازه گیری شاخص مخروطی^۵

آزمایش نفوذ سنجی پس از آبیاری زمین و در اولین زمانی که امکان ورود به زمین وجود داشت انجام گردید. با استفاده از یک دستگاه فروسنج مخروطی دستی نقاط رئوس شبکه با مش بندی ۱۰ در ۱۰ متر مورد آزمون فروسنجی قرار گرفت. دستگاه برای اندازه گیری شاخص مخروطی از لایه ۰ تا ۵۰ سانتی متری با فواصل عمق یک سانتی متر تنظیم گردید. برای اندازه گیری شاخص مخروطی خاک از دستگاه فروسنج الکتریکی^۶ مدل Eijkelkmap ساخت کشور هلند استفاده گردید. از مخروط استاندارد با زاویه راس ۶۰ درجه، قطر اسمی ۱۱/۲۸ میلیمتر و سطح یک سانتی متر مربع استفاده شد و سرعت نفوذ درون خاک ۲ سانتی متر در ثانیه بود. اندازه گیری شاخص مخروطی خاک به ازای هر سانتی متر فرو رفتن مخروط در داخل خاک، نیروی مقاومت خاک را اندازه گرفته و شاخص مخروطی خاک را برحسب (MPa) محاسبه و ثبت می نماید (Sims & O'Neill, 1994). میانگین رطوبت خاک در زمان اندازه گیری شاخص مخروطی خاک در عمق ۰-۳۰ سانتی متر به ترتیب برای بدون خاکورزی، کم خاکورزی و خاکورزی متداول ۱۶/۵، ۱۵ و ۱۴/۵ درصد بود.

روش های آماری مورد استفاده

توصیف آماری داده ها: به منظور بررسی چگونگی توزیع داده ها و دستیابی به خلاصه ای از اطلاعات آماری هر خصوصیت، توزیع فراوانی با کمک ویژگی های آن شامل میانگین، میانه،

زمان بر مقاومت خاک تحت تاثیر استفاده از لولر مجهز به سامانه کنترل لیزری بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی خاک با روش های آماری کلاسیک و زمین آمار تخمین زده شد، نتایج این بررسی نشان داد روش درون یابی کریجینگ دقت بالایی در پیش بینی تغییر پذیری مکانی فشردگی خاک دارد. همچنین Gohari et al. (2007) برای ارزیابی نفوذسنج مخروطی پشت تراکتوری جهت تهیه نقشه های تغییرات مقاومت خاک از تخمین گره های زمین آماری استفاده کردند.

هدف این مطالعه، بررسی تغییرات مکانی فشردگی خاک با استفاده از روش های مختلف زمین آماری، تحت تاثیر شیوه های خاکورزی حفاظتی و متداول زراعی می باشد. همچنین بررسی مزایای قابل توجه استفاده از شیوه های خاکورزی حفاظتی به ویژه سیستم خاکورزی بدون شخم و کم خاکورزی در بهبود خواص فیزیکی به ویژه فشردگی خاک با استفاده از تکنیک زمین آمار می باشد.

مواد و روش ها

این آزمایش در ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی طرق مشهد و در آخرین سال زراعی اجرای طرح پنج ساله (۹۴-۹۵) انجام گردید (شکل ۱). منطقه مورد نظر از لحاظ موقعیت جغرافیایی در طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی قرار گرفته بود. متوسط ارتفاع منطقه از سطح دریا ۹۸۵ متر، میانگین بارندگی ۲۵۶ میلی متر و میانگین حداکثر و حداقل درجه حرارت سالانه به ترتیب ۲۲/۳ و ۹/۱ درجه سانتیگراد بود. اقلیم منطقه طبق روش آمبروزه خشک و سرد محسوب می شود. برای انجام تحقیق پلاتی به ابعاد ۹۰ در ۱۳۰ متر در یک مزرعه گندم تحت مدیریت سه شیوه خاکورزی شامل: خاکورزی متداول^۱ (شخم + دیسک + تسطیح + کاشت با بذر کار)، کم خاکورزی^۲ (دیسک سبک + کاشت با بذر کار) و بدون خاکورزی^۳ (کاشت مستقیم با بذر کار) انتخاب شد، که هر کدام از تیمارها به ابعاد ۹۰ در ۴۰ متر در نظر گرفته شده بودند. جهت نمونه برداری از خاک در پلات مورد نظر شبکه بندی به صورت سیستماتیک به ابعاد ۱۰ در ۱۰ متر (۱۱۷ نقطه) به وسیله دوربین و متر انجام گردید. موقعیت جغرافیایی نقاط شبکه با سیستم مختصات متریک (UTM)^۴ و با استفاده از یک

1. Conventional tillage
2. Minimum tillage
3. No tillage
4. Universal Transverse Mercator

5. Cone Index
6. Penetrometer

روش های درون یابی^{۱۱}

در این تحقیق جهت پیش بینی پراکنش مکانی فشردگی خاک، پهنه بندی با کمک نرم افزار Arc GIS 10.3 انجام گرفت، نقشه فشردگی خاک به روش های درون یابی قطعی^{۱۲} (روش وزن دهی معکوس، توابع پایه شعاعی) و درون یابی زمین آماری (کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی، کریجینگ بیزی تجربی) تهیه شد، و در نهایت با استفاده از آزمون ارزیابی متقابل مناسب ترین روش درون یابی انتخاب گردید (Wie et al, 2008; Shi et al, 2007).

روش های درون یابی قطعی

روش وزن دهی فاصله معکوس (IDW)^{۱۳}

در روش وزن دهی فاصله معکوس فرض اساسی بر این است که میزان همبستگی و تشابه بین همسایه ها با فاصله بین آنها متناسب است که می توان آن را به صورت تابعی با توان معکوس از فاصله هر نقطه همسایه تعریف کرد. لازم به ذکر است که تعریف شعاع همسایگی و توان مربوط به تابع عکس فاصله از مسائل مهم در این روش محسوب می شود. در روش وزن دهی فاصله معکوس، مقدار فاکتور وزنی (λ_i) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می شود:

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-\alpha}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه D_i : فاصله بین نقطه برآورد شده و مقدار مشاهده شده در نقطه α : i توان معادله و n : تعداد نقاط مشاهده شده می باشد (Robinson & Metternicht, 2006).

روش توابع پایه شعاعی (RBF)^{۱۴}

روش توابع پایه شعاعی از جمله روش های درون یابی است که در آنها سطح تخمین از مقادیر مشاهده ای عبور می کند. تفاوت این روش با روش وزن دهی معکوس فاصله (IDW) در این است که در روش توابع پایه شعاعی (RBF) مقادیر بیش از حداکثر مقادیر مشاهده ای و یا کمتر از حداقل مقادیر مشاهده ای در سطح تخمین وجود دارد اما در روش (IDW) این امر امکان پذیر نیست (Lee et al, 2011). روش توابع پایه شعاعی (RBF) معمولاً زمانی مورد استفاده قرار می گیرد که هدف تخمین سطوح هموار با استفاده از تعداد زیاد نقاط نمونه باشد (Johnston et al, 2001; Cheng & Xie, 2009). استفاده از این توابع برای سطوح با شیب ملایم از قبیل ارتفاع منجر به ارائه نتایج مطلوبی خواهد شد (Johnston et al, 2001).

حداقل، حداکثر، انحراف معیار، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی توسط نرم افزار Minitab 17 مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی آزمون نرمال بودن توزیع متغیرها، آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^۱ در سطح معنی داری ۵ درصد استفاده شد (Kravchenko, & Bullock, 1999).

آنالیزهای زمین آماری: الگو های تغییرنا^۲ به وسیله

نرم افزار GS+9 رسم و بهترین الگوی تغییرنا انتخاب گردید، پهنه بندی فشردگی خاک با کمک نرم افزار Arc GIS 10.3 انجام گرفت. تابع نیم تغییرنا رابطه (۱)، ابزاری کلیدی در نظریه متغیرهای ناحیه ای و روش های برآورد زمین آماری است. سمی واریوگرام به منظور تشخیص پیوستگی مکانی یک متغیر شناخته می شود. پیوستگی مکانی بدین معنا است که نمونه های مجاور تا فاصله مشخصی به هم وابستگی دارند و چنین فرض می شود که وابستگی بین نمونه ها را می توان به صورت مدل ریاضی تحت عنوان سمی واریوگرام یا نیم تغییرنا ارائه کرد (Nielsen & Wendroth, 2003).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن h : فاصله در جهت مشخص بین موقعیت x_i+h و x ; $N(h)$: تعداد جفت نمونه ها به فاصله h از یکدیگر؛ $\gamma(h)$: مقدار تغییرنا برای فاصله h ; $Z(x_i)$: مقدار نمونه در نقطه x_i ; $Z(x+h)$: مقدار نمونه در نقطه $x+h$ است.

در این بررسی با استفاده از نرم افزار GS+9 نیم تغییرنا برای متغیرهای مطالعه شده محاسبه گردید و جهت ارزیابی بهترین برازش مدل های تئوری (خطی^۳، نمایی^۴، گوسی^۵، کروی^۶، سهمی^۷) بر نیم تغییرنا تجربی از آماره مجموع مربعات باقی مانده (RSS)^۸ و ضریب تبیین (R2) استفاده گردید. برای پی بردن به قدرت ساختار (وابستگی) مکانی متغیر از نسبت $(C_0/(C+C_0))$ استفاده می شود که در آن C_0 اثر قطعه ای^۹ و C_0+C آستانه^{۱۰} نیم تغییرناست (Trangmar et al, 1986). اگر مقدار این نسبت کمتر از ۲۵ درصد باشد، متغیر دارای وابستگی مکانی قوی، اگر بین ۲۵ تا ۷۵ درصد باشد، دارای وابستگی مکانی متوسط، و اگر بیشتر از ۷۵ درصد باشد، دارای وابستگی مکانی ضعیف است (Robinson & Metternicht, 2006).

1. Kolmogorov-Smirnov
2. Semivariogram
3. Linear
4. Exponential
5. Gaussian
6. Spherical
7. Parabolic
8. Residual Sums of Squares
9. Nugget Effect
10. Sill

11. Interpolation
12. Deterministic
13. Inverse Distance Weighting
14. Radial Basic Kriging

روش درون یابی زمین آماری

کریجینگ ساده (SK)^۱

در این روش علاوه بر فرض مستقل بودن میانگین از مختصات (فرضیه پایایی) و عدم روند، فرض دیگر این است که مقدار میانگین معلوم باشد. در این حالت منطقه مورد تخمین باید محدود به بخشی باشد که میانگین فرض شده در آن صادق باشد. در این نوع کریجینگ مقدار متغیر در نقطه مورد تخمین با رابطه (۳) محاسبه می شود (Khosravi & Abbasi, 2016):

$$Z(x_0) = m + \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i) - m] \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن m : میانگین متغیر؛ λ_i : وزن مربوط به هر داده؛ $Z(x_i)$: مقدار متغیر در نقاط اندازه گیری؛ $Z(x_0)$: مقدار متغیر تخمین زده شده می باشد. مقدار واریانس تخمین کریجینگ ساده از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$\sigma^2(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_0) \quad (\text{رابطه ۴})$$

کریجینگ معمولی (OK)

کریجینگ معمولی به عنوان یکی از قوی ترین و پرکاربردترین روش های تخمین زمین آماری محسوب می گردد. در این روش مقدار میانگین مجهول است ولی فرض می شود که مقدار آن مستقل از مختصات است (شرط پایایی). روابط حاکم بر آن شامل رابطه (۵) و (۶) است:

$$\widehat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن $Z(x_0)$: مقدار تخمین متغیر Z در نقطه نمونه برداری نشده x_0 ؛ $Z(x_i)$: مقدار مشاهداتی متغیر Z در نقطه های نمونه برداری x_i ؛ λ_i : وزن تعلق گرفته به هر مشاهده در نقطه x_i (Agrawal et al, 1995; Vauclin et al, 1983).

کریجینگ بیزی تجربی (EBK)^۲

این روش یک روش درون یابی زمین آماری است که سختی های مربوط به ساختن یک مدل کریجینگ معتبر را خودکار می نماید، به عبارت دیگر در تحلیل های زمین آماری، نیاز به تنظیم دستی پارامترها به منظور دستیابی به نتایج دقیق است، اما در روش کریجینگ بیزی تجربی به طور اتوماتیک این پارامترها طی یک فرآیند شبیه سازی محاسبه می گردد. فرق دیگر این روش با سایر روش های کریجینگ این است که در این

روش خطاهای مربوط به برآورد نیم تغییرنا در نظر گرفته می شود. این در حالی است که در سایر روش های کریجینگ، نیم تغییرنا از مکان های با داده های مشخص استفاده می کند و سپس از این تغییرنا برای پیش بینی در مکان های نامشخص استفاده می شود. در نتیجه از آن جایی که عدم قطعیت برآورد نیم تغییرنا را در محاسبات وارد نمی نمایند، منجر به برآورد خطای استاندارد پیش بینی می شوند (Knotters et al, 2010; Krivoruchko et al, 2012).

ارزیابی روش های درون یابی

برای ارزیابی تخمین گرهای استفاده شده از تکنیک ارزیابی متقابل^۳ استفاده شد. در این روش برای کلیه نقاط مشاهده ای در هر مرحله یک نقطه مشاهده ای حذف و با استفاده از بقیه نقاط مشاهده ای آن نقطه برآورد می شود. معیارهای مختلفی برای ارزیابی کارایی روش های میان یابی وجود دارد که در این تحقیق از معیارهای آماری میانگین خطا (ME) رابطه (۷)، مجذور میانگین مربعات خطای تخمین (RMSE) رابطه (۸)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSSE) رابطه (۹) و ضریب تبیین (R^2) رابطه (۱۰) استفاده شد.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)| \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}}{n} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$RMSSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{Z^*(x_i) - Z(x_i)}{\sigma^*(x_i)} \right]^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در آن ها: $Z^*(x_i)$: مقدار برآورد شده شاخص مخروطی؛ $Z(x_i)$: مقدار اندازه گیری شده متغیر شاخص مخروطی؛ n : تعداد داده ها؛ می باشد.

میانگین خطا (ME) معیاری از صحت مدل است که مقدار صفر آن نشان دهنده صحت ۱۰۰ درصد و هر قدر مقدار آن از صفر فاصله داشته باشد حاکی از کم شدن صحت مدل است. مجذور میانگین مربعات خطای تخمین (RMSE) معیاری از صحت تخمین است و هر اندازه RMSE یک متغیر کوچک تر باشد، صحت آن بیشتر خواهد بود. خطای جذر میانگین مربعات (RMSSE) در ارزیابی های کریجینگ مورد استفاده قرار می گیرد و هر چقدر به یک نزدیک تر باشد بیانگر خطای کمتر این روش می باشد. ضریب تبیین (R^2) باید به عدد یک نزدیک

1. Simple Kriging

2. Empirical Bayesian kriging

3. Cross validation

نمایی و کروی به عنوان مناسبترین مدل بر نقاط نیم تغییرنمای تجربی انتخاب گردید. جهت تعیین بهترین مدل‌های برازش داده شده بر نیم تغییرنمای تجربی مواردی که دارای بالاترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین میزان مجموع مربعات خطا (RSS) بودند انتخاب شدند (Ferrero et al, 2005). همچنین این مدل‌ها جهت بررسی تغییرپذیری فشردگی خاک در مطالعات زیادی به کار گرفته شده است (Kilic et al, 2004; Ferrero et al, 2005; Tekeste et al, 2009). به منظور بررسی وضعیت همسانگردی شاخص مخروطی، نیم تغییرنما در چهار جهت ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه ترسیم گردید. با توجه به اینکه برای شاخص مخروطی خاک میزان سقف و دامنه تاثیر آن‌ها در جهات مختلف یکسان بود لذا همسانگردی آن تأیید گردید. مقدار دامنه تأثیر برای شاخص مخروطی از ۲۱ تا ۲۱۰ متر متغیر بود، دامنه تأثیر واریوگرام تابعی از مقیاس منطقه و فاصله نمونه‌برداری می‌باشد. بدیهی است دامنه تأثیر بزرگتر بر ساختار مکانی گسترده‌تر و پیوستگی مکانی بیشتر در مقادیر متغیر مورد نظر دلالت دارد. عوامل ذاتی تشکیل دهنده خاک بیشترین تأثیر را در دامنه تأثیر دارد (Sun et al, 2006). طبق نتایج بدست آمده نسبت اثر قطعه ای به آستانه ($C_0/C+C_0$) برای شاخص مخروطی از ۰/۰۴ تا ۵۰ درصد متغیر بوده و در عمق ۲۰-۰ دارای وابستگی مکانی قوی و عمق ۳۵-۲۰ دارای وابستگی مکانی متوسط بودند. Ferrero et al (2005) ساختار مکانی دقیقی را برای اعماق ابتدایی خاک بدست آورده بودند.

باشد تا نشان دهنده مناسب بودن تخمین باشد (Johnston et al, 2001; Webster & Oliver, 2007).

نتایج و بحث

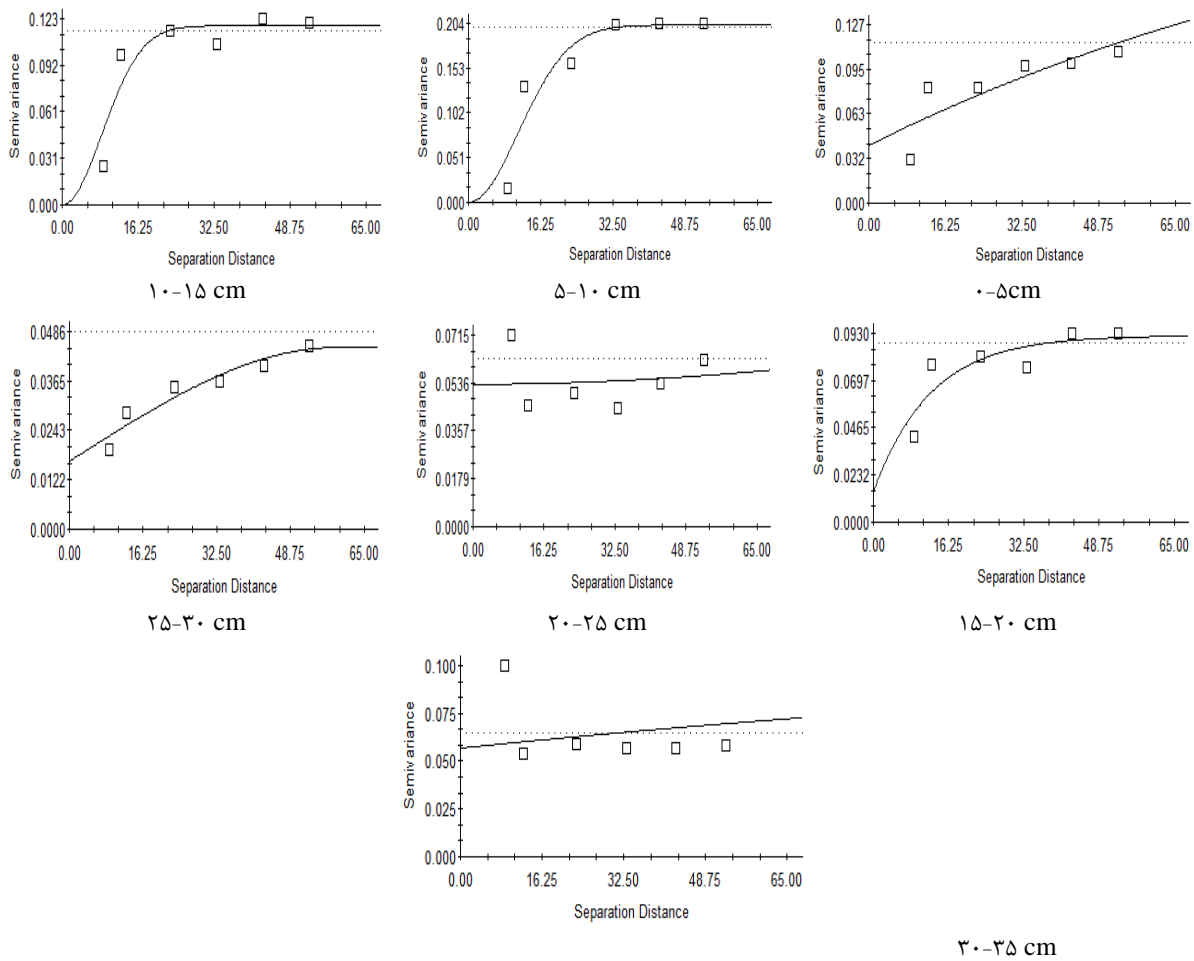
توصیف آماری خصوصیات متغیر شاخص مخروطی در جدول (۱) خلاصه شده است. مقادیر شاخص مخروطی از ۰/۳۲ مگاپاسکال برای عمق ۵-۰ سانتی متر تا ۳/۰۲ مگاپاسکال برای عمق ۲۰-۱۵ سانتی متر متغیر بودند. نتایج نشان می‌دهد که در کلیه اعماق داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد نرمال بوده و نتایج آزمون کولگروف-اسمیرنوف نیز آن را تأیید می‌کند اما در عمق ۱۵-۱۰ سانتی متر داده‌ها نرمال نبوده که با استفاده از تبدیل لگاریتمی داده‌ها نرمال گردیدند. نتایج تحقیقات نشان داده‌اند خواص استاتیکی خاک مانند خواص فیزیکی و فشردگی و تراکم خاک دارای توزیع نرمال می‌باشند (Warrick & Nielsen, 1980). مقادیر درصد ضریب تغییرات شاخص مخروطی در عمق ۲۰-۰ سانتی متر بالا می‌باشد که نشان دهنده بالا بودن تغییرپذیری شاخص مخروطی در لایه‌های رویی خاک به علت کاربرد فعال ادوات خاک‌ورزی و مدیریت زراعی در اعماق ابتدایی خاک می‌باشد. Kilic et al (2004) در ارزیابی روش‌های درون‌یابی برای تغییرات مکانی فشردگی خاک نشان دادند در عمق‌های ابتدایی خاک میزان ضریب تغییرات شاخص مخروطی بیشتر از عمق‌های پایین تر خاک می‌باشد. پس از تحلیل آماری داده‌ها، واریوگرام تجربی برای متغیرهای مختلف در اعماق تعیین شده تهیه شد. مدل گوسی،

جدول ۱- توصیف آماری متغیر شاخص مخروطی قبل (الف) و بعد (ب) از نرمال شدن

ب	الف				عمق (cm)		
۱۰-۱۵	۳۰-۳۵	۲۵-۳۰	۲۰-۲۵	۱۵-۲۰	۱۰-۱۵	۵-۱۰	۰-۵
۱۱۷	۱۱۷	۱۱۷	۱۱۷	۱۱۷	۱۱۷	۱۱۷	۱۱۷
-۰/۶۲	-۰/۶۸	-۰/۹۰	-۰/۷۶	-۰/۸۰	-۰/۵۴	-۰/۳۲	-۰/۳۲
۱/۱۱	۲/۰۴	۲/۳۵	۲/۵۵	۲/۹۵	۳/۰۲	۲/۸۰	۱/۲۷
۰/۳۸۶۲	۱/۳۳	۱/۴۷	۱/۵۱	۱/۶۲	۱/۵۵	۱/۳۲	۰/۷۷
-۰/۴۱	۱/۲۹	۱/۴۵	۱/۴۶	۱/۵۴	۱/۵۰	۱/۳۳	۰/۷۶
۰/۳۳۹	-۰/۳۲	-۰/۳۲	-۰/۳۶	-۰/۴۸	-۰/۵۱	-۰/۵۰	-۰/۲۴
-۰/۳۰	-۰/۱۰	-۰/۴۳	-۰/۲۴	-۰/۵۵	-۰/۵۵	-۰/۲۴	-۰/۱۲
-۰/۰۶	۲/۱۷	۲/۶۰	۲/۶۸	۲/۵۶	۲/۹۵	۳/۰۸	۲/۳۲
۸۷/۸۲	۲۴/۰۶	۲۱/۷۶	۲۳/۸۴	۲۹/۶۲	۳۲/۹۰	۳۷/۸۷	۳۱/۱۶

جدول ۲- پارامترهای نیم تغییر نما و معیارهای انتخاب مدل مناسب

RSS	R^2	نسبت واریانس (درصد)	تأثیر	دامنه	مقدار آستانه	اثر قطعه ای	مدل انتخابی	عمق (cm)
				(m)	Sill(C_0+C)	Nugget(C_0)		
۱/۲۰۰E-۰۳	۰/۷۸۷		۱۶/۱۱	۱۲۵	۰/۲۵۳	۰/۴۰۹	نمایی	۰-۵
۳/۳۴۶E-۰۳	۰/۸۷۸		۰/۰۴	۲۷	۰/۲۰۲۲	۰/۰۰۰۱	گوسی	۵-۱۰
۱/۱۶۶E-۰۳	۰/۸۴۲		۰/۰۸	۲۱	۰/۱۱۸۲	۰/۰۰۰۱	گوسی	۱۰-۱۵
۴/۶۰۶E-۰۴	۰/۷۳۶		۱۶/۲۱	۳۷	۰/۰۹۱۹	۰/۰۱۴۹	نمایی	۱۵-۲۰
۵/۵۵۶E-۰۴	۰/۱۱		۵۰	۲۱۰	۰/۱۰۶۳	۰/۰۵۳۱	گوسی	۲۰-۲۵
۳/۱۸۰E-۰۵	۰/۹۲۱		۳۷/۳۴	۵۹	۰/۰۴۴۶	۰/۰۱۶۶	کروی	۲۵-۳۰
۲/۰۴۷E-۰۳	۰/۲۷۹		۵۰	۲۱۰	۰/۱۱۵	۰/۰۵۷	نمایی	۳۰-۳۵



شکل ۲- واریوگرام تجربی شاخص مخروطی و مدل های مناسب برازش داده شده در عمق ۰-۳۵ سانتی متر

پهنه بندی فشردگی خاک

پس از فرایند پردازش اطلاعات که شامل بررسی پیوستگی مکانی داده‌ها، ارزیابی نیم‌تغییرنما، تبدیل داده‌ها به داده‌های نرمال می‌باشد، روش‌های مناسب جهت انجام درون‌یابی و تولید سطوح فشردگی انتخاب گردیدند. این روش‌ها شامل روش‌های درون‌یابی قطعی نظیر روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) و روش توابع پایه شعاعی (RBF) و همچنین درون‌یابی زمین‌آماري مانند روش کریجینگ ساده (SK)، کریجینگ معمولی (OK) و روش کریجینگ بیزی تجربی موسوم به روش (EBK) می‌باشند. با توجه به ارزیابی متقابل که براساس معیارهای آماری بدست می‌آید نتایج بدست آمده برای عمق ۰-۳۵ سانتی‌متر به شرح ذیل می‌باشد (جدول ۴ و ۳).

در ارزیابی درون‌یابی قطعی، روش توابع پایه شعاعی (RBF) در تمامی اعماق به جز عمق ۱۰-۱۵ سانتی‌متر دقیق‌تر از روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) بود، این امر با توجه به اینکه مقادیر R^2 در روش (RBF) بیشتر از روش (IDW) بود و همچنین به دلیل کمتر بودن مقادیر خطای (ME) و

(RMSE) در این روش نسبت به روش (IDW) قابل تصدیق است لذا با توجه به نتایج فوق می‌توان گفت روش توابع پایه شعاعی (RBF) نتایج بهتری نسبت به روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) مهیا می‌کند (جدول ۳).

در ارزیابی زمین‌آماري (جدول ۴) نیز در عمق ۰-۵ و ۲۵-۲۰ سانتی‌متر روش کریجینگ معمولی (OK) خطای (RMSE) کمتر و R^2 بیشتری نسبت به روش کریجینگ ساده (SK) و کریجینگ بیزی تجربی (EBK) نشان داد. در اعماق ۵-۱۰، ۱۰-۱۵، ۲۰-۲۵ و ۲۵-۳۰ روش کریجینگ بیزی تجربی (EBK) دارای دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها بود. نتایج نشان داد که روش (EBK) نسبت به سایر روش‌های کریجینگ عملکرد بهتری را از لحاظ معیارهای آماری و از لحاظ تطابق با واقعیت‌های منطقه از خود نشان می‌دهد. میرزایی و زکی زاده بیان کردند که روش کریجینگ بیزی تجربی (EBK) نسبت به تمام روش‌های زمین‌آماري نظیر کریجینگ معمولی (OK) و وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) دارای دقت بالاتری در ارزیابی و تخمین داده‌ها می‌باشد (Mirzaei & Sakizadeh, 2016).

جدول ۴- مقایسه دقت تخمین گره‌های زمین آماری در تخمین مقادیر

خصوصیات شاخص مخروطی				عمق خاک	درون	مدل یابی
RMSSE	ME	RMSE	R ²			
۱/۰۴۲۳	-۰/۰۰۸	۰/۲۱۱	۰/۸۰۵	۰-۵	SK	
۱/۰۵۶۶	-۰/۰۰۸	۰/۴۴۳	۰/۸۰۰	۵-۱۰		
۱/۰۲۵۸	-۰/۰۰۸	۰/۴۸۸	۰/۷۴۲	۱۰-۱۵		
۱/۰۴۷۱	-۰/۰۰۲	۰/۴۶۹	۰/۶۶۱	۱۵-۲۰		
۱/۰۵۲۰	-۰/۰۰۱	۰/۳۳۴	۰/۸۲۴	۲۰-۲۵		
۱/۰۴۰۷	-۰/۰۰۲	۰/۳۲۰	۰/۸۵۵	۲۵-۳۰		
۱/۰۴۳۷	-۰/۰۰۳	۰/۳۰۳	۰/۷۶۳	۳۰-۳۵		
۱/۰۱۴۶	-۰/۰۰۱	۰/۱۹۹	۰/۹۳۹	۰-۵		
۱/۰۴۶۴	-۰/۰۰۵	۰/۴۴۲	۰/۸۰۶	۵-۱۰		
۰/۹۹۷۰	-۰/۰۰۹	۰/۴۸۸	۰/۷۵۳	۱۰-۱۵		
۱/۰۲۷۹	-۰/۰۱۴	۰/۴۷۱	۰/۷۲۵	۱۵-۲۰	OK	
۱/۰۴۹۸	-۰/۰۰۶	۰/۲۵۹	۰/۸۴۲	۲۰-۲۵		
۱/۰۱۱۹	۰/۰۰۲	۰/۲۵۸	۰/۹۲۱	۲۵-۳۰		
۱/۰۲۸۴	۰/۰۰۳	۰/۳۰۱	۰/۸۳۲	۳۰-۳۵	EBK	
۱/۰۱۱۱	-۰/۰۰۳	۰/۲۰۸	۰/۹۱۲	۰-۵		
۰/۹۸۰۵	۰/۰۳۳	۰/۴۳۳	۰/۹۰۴	۵-۱۰		
۱/۰۰۲۰	-۰/۰۰۳	۰/۴۷۷	۰/۸۸۷	۱۰-۱۵		
۰/۹۹۰۶	-۰/۰۱۳	۰/۴۷۱	۰/۷۵۹	۱۵-۲۰		
۱/۰۵۶۳	-۰/۰۰۶	۰/۳۳۴	۰/۸۴۲	۲۰-۲۵		
۰/۹۵۷۶	-۰/۰۰۳	۰/۲۵۳	۰/۹۳۹	۲۵-۳۰		
۱/۰۱۱۵	-۰/۰۰۲	۰/۲۹۲	۰/۸۷۶	۳۰-۳۵		

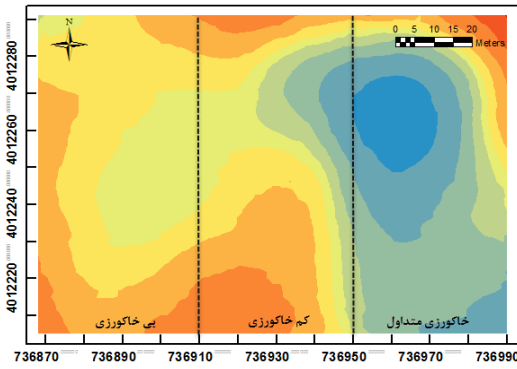
جدول ۳- مقایسه دقت تخمین گره‌های درون یابی قطعی در تخمین مقادیر

خصوصیات شاخص مخروطی				عمق خاک	مدل درون یابی
خطا	R ²	RMSE	ME		
۰/۷۹۶	۰/۲۱۲	-۰/۰۰۱	۰-۵	IDW	
۰/۷۷۲	۰/۴۴۶	-۰/۰۲۵	۵-۱۰		
۰/۶۸۲	۰/۴۹۰	-۰/۰۰۵	۱۰-۱۵		
۰/۵۰۲	۰/۴۸۱	-۰/۰۱۵	۱۵-۲۰		
۰/۸۱۰	۰/۳۳۸	۰/۰۰۱	۲۰-۲۵		
۰/۸۵۴	۰/۳۳۵	-۰/۰۰۳	۲۵-۳۰		
۰/۷۱۹	۰/۳۰۷	-۰/۰۰۱	۳۰-۳۵		
۰/۸۰۶	۰/۲۱۱	-۰/۰۰۷	۰-۵		
۰/۷۹۰	۰/۴۴۶	-۰/۰۰۱	۵-۱۰		
۰/۵۸۱	۰/۴۹۲	-۰/۰۰۶	۱۰-۱۵		
۰/۵۵۲	۰/۴۷۵	-۰/۰۰۲	۱۵-۲۰	RBF	
۰/۸۲۳	۰/۳۳۶	-۰/۰۰۶	۲۰-۲۵		
۰/۸۵۴	۰/۳۳۳	-۰/۰۰۲	۲۵-۳۰		
۰/۷۵۴	۰/۳۰۵	-۰/۰۰۷	۳۰-۳۵		

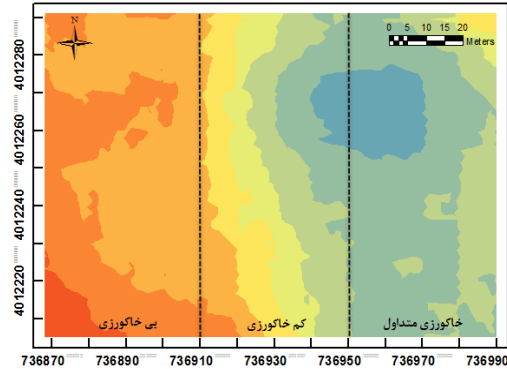
(Liu et al, 2005؛ Fasinmirin & Reichert, 2011). در ناحیه کم خاک‌ورزی (مرکز) در عمق ۱۰-۰ سانتی‌متری به دلیل استفاده از دیسک و عدم برگرداندن کامل خاک باعث تحت تاثیر قرار گرفتن شاخص مخروطی و کاهش آن شده است اما در عمق‌های ۱۰-۳۵ سانتی‌متری به علت کاهش تاثیر ابزار خاک‌ورز و تغییر کمتر خاک مقدار شاخص مخروطی رو به افزایش بود. در ناحیه خاک‌ورزی متداول (شرق) به دلیل استفاده از گاواهن برگرداندار و دیسک در عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری به دلیل برگردان کردن کامل خاک و تغییر وضعیت خاک دارای شاخص مخروطی کمتری نسبت به سایر روش‌های خاک‌ورزی بود، اما در عمق ۳۵-۲۰ سانتی‌متری به دلیل نیروی عمودی گاواهن بر کف شیار شخم مقدار شاخص مخروطی نسبت به سایر شیوه‌های خاک‌ورزی افزایش پیدا کرده است. طبق گزارشات بدست آمده عملیات خاک‌ورزی موجب کاهش شاخص مخروطی و مقاومت خاک در خاک‌ورزی متداول می‌گردد (Topa et al, 2011؛ Vaz et al, 2011).

پهنه بندی

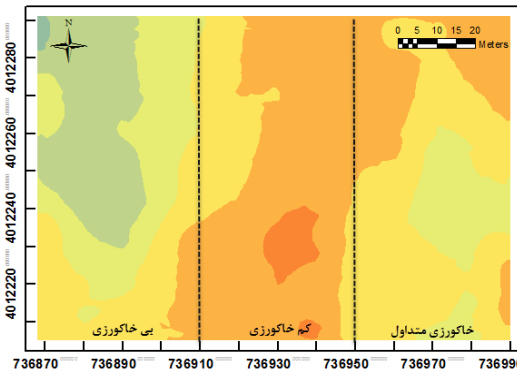
نتایج حاصل از نقشه پهنه‌بندی فشردگی خاک در محدوده مورد مطالعه نشان داد (شکل ۳)، با توجه به داده‌های بدست آمده از شاخص مخروطی خاک نمونه‌های برداشت شده از منطقه مورد مطالعه، سه ناحیه خاک‌ورزی برای تهیه نقشه فشردگی خاک مشخص گردید. نواحی خاک‌ورزی شامل: بدون خاک‌ورزی (شرق)، کم خاک‌ورزی (مرکز) و خاک‌ورزی متداول (غرب) می باشد. در ناحیه بدون خاک‌ورزی (غرب) به دلیل عدم انجام عملیات خاک‌ورزی ذرات خاک در لایه‌های سطحی ۱۰-۰ سانتی‌متر میزان شاخص مخروطی نسبت به سایر روش‌های خاک‌ورزی بیشتر می‌باشد. اما در عمق ۳۵-۱۰ سانتی‌متر به دلیل وجود ریشه و بقایای گیاهی و افزایش تخلخل مقدار شاخص مخروطی دارای روند نزولی بود. طبق آزمایشات بدست آمده، شیوه بدون خاک‌ورزی به علت کاهش میزان خلل و فرج و همچنین افزایش وزن مخصوص ظاهری دارای شاخص مخروطی بیشتری نسبت به سایر روش‌های خاک‌ورزی می‌باشند



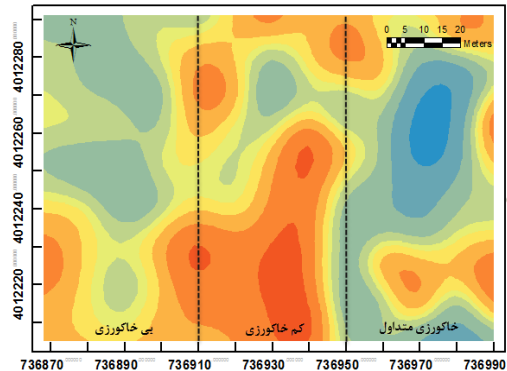
۵-۱۰ سانتی متر



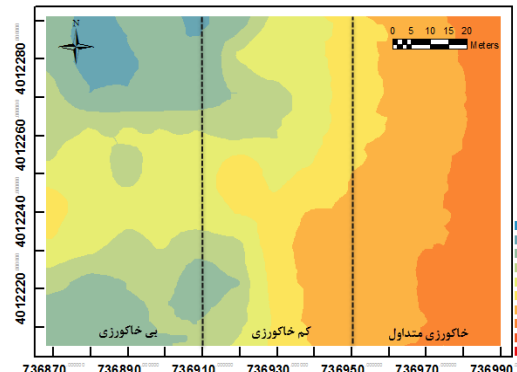
۰-۵ سانتی متر



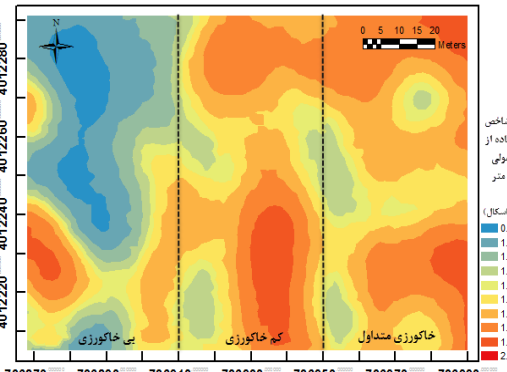
۱۵-۲۰ سانتی متر



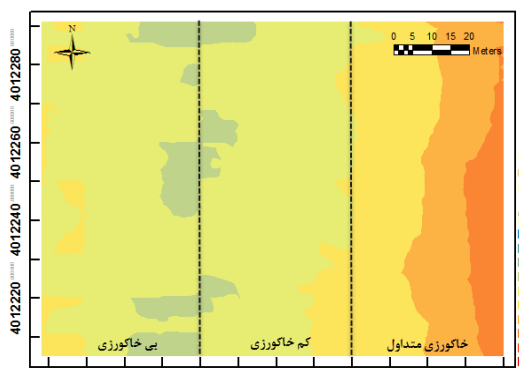
۱۰-۱۵ سانتی متر



۲۵-۳۰ سانتی متر



۲۰-۲۵ سانتی متر



۳۰-۳۵ سانتی متر

شکل ۳- پهنه بندی خصوصیات شاخص مخروطی خاک در عمق ۰-۳۵ سانتی متر

می‌باشیم. نتایج نشان داد که، مدل کریجینگ در درون‌یابی از دقیق ترین مدل‌هایی است که در تهیه نقشه‌های پراکندگی فشردگی خاک می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. به دلیل اینکه این مدل فاقد خطای سیستماتیک است و در تخمین‌ها دارای حداقل واریانس می‌باشد و جایگاه ویژه‌ای در درون‌یابی‌ها بدست آورده است. لذا می‌تواند از گزینه‌های مدیریت توسعه و کاهش ریسک تولید و اثرات زیان‌آور فشردگی خاک ناشی از ترافیک در مزارع باشد. به طور عمده نقشه‌های فشردگی خاک با هدف ارائه روش‌های مدیریتی تهیه می‌گردد و از طرفی با توجه به هزینه‌های زیاد مصرف سوخت و معایب زیرشکن‌ها، بنابراین تهیه نقشه‌های فشردگی برای مدیریت بهتر زمین‌ها همراه با کاهش هزینه‌های اقتصادی، ضروری به نظر می‌رسد.

REFERENCES

- Adamchuk, V.I., Ingram, T.J., Sudduth, K.A. and Chung, S.O. (2008). On-the-go mapping of soil mechanical resistance using a linear depth effect model. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 1885-1894.
- Agrawal, O.P., Rao, K.V.G.K., Chauhan, H.S. and Khandelwal, M.K.. (1995). Geostatistical analysis of soil salinity improvement with subsurface drainage system. *Transactions of the ASAE*, 38(5), 1427-1433.
- Ayers, P.D. and Perumpral, J.V. (1982). Moisture and density effect on cone index. *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1169-1172.
- ASAE Standards, 46 Ed. (1999b). EP542. Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Burgess, T.M. and Webster, R. (1980). Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. *Journal of soil science*, 31(2), 315-331.
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Novak, J.M., Turco, R.F. and Konopka, A.E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil science society of America journal*, 58(5), 1501-1511.
- Castrignano, A., Maiorana, M., Fornaro, F. and Lopez, N. (2002). 3D spatial variability of soil strength and its change over time in a durum wheat field in Southern Italy. *Soil and Tillage Research*, 65(1), 95-108.
- Cheng, X.F. and XIE, Y. (2009). Spatial Distribution of Soil Organic Carbon Density in Anhui Province Based on GIS [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 4, p.011.
- Clark, R.L. (1999). Evaluation of the potential to develop soil strength maps using a cone penetrometer (No. 993109). ASAE Paper.
- Davis, B.M. (1987). Uses and abuses of cross-validation in geostatistics. *Mathematical geology*, 19(3), 241-248.
- Fasinmirin, J.T. and Reichert, J.M. (2011). Conservation tillage for cassava (Manihot esculenta crantz) production in the tropics. *Soil and Tillage Research*, 113(1), 1-10.
- Ferrero, A., Usowicz, B. and Lipiec, J. (2005). Effects of tractor traffic on spatial variability of soil strength and water content in grass covered and cultivated sloping vineyard. *Soil and Tillage Research*, 84(2), 127-138.
- Fulton, J.P., Wells, L.G., Shearer, S.A. and Barnhisel, R.I. (1996). Spatial variation of soil physical properties: a precursor to precision tillage. *ASAE Paper*, 961002, pp.1-9.
- Gohari, M. and Hemmat, A. (2007). The introduction of a cone penetrometer behind tractor used for mapping soil resistance. *Journal of The new findings Agriculture*. 1(3), 234-240. (In Farsi).
- Hasani-Pak, A.A. (1998). Geostatistics. *Tehran University Press* (4th ed). 360p. (In Farsi).
- Huang, S.W., Jin, J.Y., Yang, L.P. and Bai, Y.L., 2006. Spatial variability of soil nutrients and influencing factors in a vegetable production area of Hebei Province in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 75(1-3), pp.201-212.
- Johnston, K., Ver Hoef, J.M., Krivoruchko, K. and Lucas, N. (2001). Using ArcGIS geostatistical analyst (Vol. 380). Redlands: Esri.
- Khalilian, A. and Hallman, R.R., 1996, July. Energy Requirements of Conservation Tillage Tools in Coastal Plain Soils. In Proc. *Conservation Tillage Conference for Sustainable Agriculture*, SP (pp. 96-07).
- Kilic, K., Özgöz, E. and Akbaş, F. (2004). Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. *Soil and Tillage Research*, 76(1), 1-11.
- Khosravi, Y. and Abbasi, A. (2016). Spatial analysis of environmental data with geostatistics. Azar kelk Press (1th ed). 274p. (In Farsi).
- Knotters, M., Heuvelink, G.B.M., Hoogland, T. and

نتیجه‌گیری

تفاوت عمده مطالعه حاضر و وجه تمایز آن با سایر مطالعات به ویژه تحقیقاتی که درباره تغییرات مکانی خاک انجام گرفته، نحوه نمونه‌برداری منظم آن و ارائه روشی گام به گام برای مطالعات زمین‌آماری می‌باشد که در این گونه تحقیقات بسیار مهم است. به طور کلی با استفاده از روش‌های تخمین می‌توان نقشه‌های کیفی خاک‌ها را برای استفاده در مدیریت خاص مزرعه‌ای فراهم نمود، زیرا تغییرات به قالبی پیوسته از اطلاعات تبدیل می‌گردند. لذا با توجه به اینکه مزارع مختلف در ایران دارای محدودیت فشردگی و نیز تغییرپذیری زیاد مکانی از نظر تراکم می‌باشد. این مسئله نشان می‌دهد که برای اصلاح و مدیریت فشردگی خاک نیاز به تهیه نقشه‌های تراکم خاک

- Walvoort, D.J.J. (2010). A disposition of interpolation techniques. *Wageningen University and Research Centre, Statutory Research Tasks Unit for Nature and the Environment*: Wageningen, The Netherlands.
- Kravchenko, A. and Bullock, D.G., 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal*, 91(3), pp.393-400.
- Krivoruchko, K. (2012). Empirical bayesian kriging. Esri: Redlands, CA, USA.
- Liu, S., Zhang, H., Dai, Q., Huo, Z., Xu, K. and Ruan, H. (2005). Effects of no-tillage plus inter-planting and remaining straw on the field on cropland eco-environment and wheat growth. *Ying yong sheng tai xue bao, The journal of applied ecology/Zhongguo sheng tai xue xue hui, Zhongguo ke xue yuan Shenyang ying yong sheng tai yan jiu suo zhu ban*, 16(2), 393-396.
- Masumi, A. ali beygi, H. Hemmat, A. (2008). The short term effects on soil compaction and land leveling. In: *Proceeding of 5th National Congress of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization*. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Farsi).
- Mirzaei, R. and Sakizadeh, M. (2016). Comparison of interpolation methods for the estimation of groundwater contamination in Andimeshk-Shush Plain, Southwest of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(3), 2758-2769.
- Nielsen, D.R. and Wendroth, O. (2003). *Spatial and temporal statistics: sampling field soils and their vegetation*. Catena Verlag.
- Raper, R.L., Schwab, E.B. and Dabney, S.M. (2005). Measurement and variation of site-specific hardpans for silty upland soils in the Southeastern United States. *Soil and Tillage Research*, 84(1), 7-17.
- Robinson, T.P. and Metternicht, G. (2006). Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. *Computers and electronics in agriculture*, 50(2), 97-108.
- Rejman, J., Turski, R. and Paluszek, J. (1998). Spatial and temporal variations in erodibility of loess soil. *Soil and Tillage Research*, 46(1), 61-68.
- Sims, B.G. and O'Neill, D.H., 1994. Testing and evaluation of agricultural machinery and quipment: *Principles and practices (No. 110)*. Food & Agriculture Org.
- Sun, Y., Ma, D., Lammers, P.S., Schmittmann, O. and Rose, M. (2006). On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil and tillage Research*, 86(2), 209-217.
- Shi, J., Wang, H., Xu, J., Wu, J., Liu, X., Zhu, H. and Yu, C. (2007). Spatial distribution of heavy metals in soils: a case study of Changxing, China. *Environmental Geology*, 52(1), 1-10.
- Tekeste, M.Z., Raper, R.L., Schwab, E.B. and Seymour, L. (2009). Soil drying effects on spatial variability of soil hardpan attributes on pacolet sandy loam soil. *Transactions of the ASABE*, 52(3), 697-705.
- Topa, D., Ailincăi, C. and Jităreanu, G. (2011). Soil compaction influence on winter wheat yield and soil physical properties. *Lucrări Științifice-Seria Agronomie*, 54, pp.306-310.
- Trangmar, B.B., Yost, R.S. and Uehara, G. (1986). Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in agronomy*, 38, pp.45-94.
- Utset, A. and Cid, G. (2001). Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. *Soil and Tillage Research*, 61(3), 193-202.
- Usovich, B. and Lipiec, J. (2009). Spatial distribution of soil penetration resistance as affected by soil compaction: The fractal approach. *Ecological Complexity*, 6(3), 263-271.
- Vaz, C.M., Manieri, J.M., De Maria, I.C. and Tuller, M. (2011). Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*, 166(1), 92-101.
- Vauclin, M., Vieira, S.R., Vachaud, G. and Nielsen, D.R. (1983). The use of cokriging with limited field soil observations. *Soil Science Society of America Journal*, 47(2), 175-184.
- Warrick, A.W. and Nielsen, D.R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. pp. 319-344
- Webster, R. and Oliver, M.A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists*. John Wiley & Sons.
- Wei, J.B., Xiao, D.N., Zeng, H. and Fu, Y.K.. (2008). Spatial variability of soil properties in relation to land use and topography in a typical small watershed of the black soil region, northeastern China. *Environmental geology*, 53(8), 1663-1672.