

ارزیابی روش‌های زمین آمار جهت تخمین و پهنه‌بندی عناصر غذایی پر مصرف اولیه

در برخی اراضی کشاورزی استان گلستان

حسین کاظمی پشت مساری^{1*}، زین العابدین طهماسبی سروسنایی²، بهنام کامکار³، شعبان شتایی⁴ و سهراب صادقی⁵

تاریخ دریافت: 90/2/24 تاریخ پذیرش: 90/11/3

1 و 2- دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه زراعت، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3 و 4- دانشیار، گروه زراعت و گروه جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

5- عضو هیات علمی، مجتمع آموزش عالی علمی کاربردی، جهاد کشاورزی جهرم

* مسئول مکاتبه: E-mail: hossein_k_p@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش با استفاده از روش‌های مختلف زمین آمار مانند کریجینگ، وزن‌دهی فاصله معکوس، توابع پایه شعاعی، چندربعی معکوس و چندجمله‌ای موضعی، تغییرات مکانی مقادیر نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل استفاده در اراضی کشاورزی استان گلستان مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور بالغ بر 505 نمونه خاک در سال 1387 از مزارع تهیه شد و مقادیر این عناصر برای هر نمونه اندازه‌گیری گردید. معیارهای ارزیابی در این پژوهش، میانگین مطلق خطا، میانگین انحراف خطا و ریشه دوم میانگین مربعات باقیمانده با استفاده از روش اعتبارسنجی جکنایف بودند. نتایج بدست آمده نشان داد روش کریجینگ، بهترین الگو برای تخمین نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل استفاده در این منطقه می‌باشد زیرا بالاترین صحت و کمترین خطا را دارا بود. همچنین روش چندجمله‌ای موضعی درجه 3 نامناسب‌ترین الگو جهت تخمین مقادیر این عناصر شناخته شد. تجزیه و تحلیل نیم‌تغییرنماها نشان داد که نیتروژن کل و پتاسیم قابل استفاده با مدل نمایی و فسفر قابل استفاده با مدل کروی بهترین برازش را داشتند. نتایج پهنه‌بندی نشان داد که غلظت نیتروژن و فسفر قابل استفاده در بخش‌های شمال و شرق اراضی مورد مطالعه کمتر از سایر مناطق است.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، پتاسیم، زمین آمار، فسفر، نیتروژن

Evaluation of Geostatistical Methods for Estimating and Zoning of Macronutrients in Agricultural Lands of Golestan Province

H Kazemi Poshtmasari^{1*}, Z Tahmasebi Sarvestani², B Kamkar³, Sh Shataei⁴ and S Sadeghi⁵

Received: 14, May 2011 Accepted: 19, February 2012

^{1,2}PhD Student and Assoc. Prof., Univ. of Tarbiat Modares, Iran

^{3,4}Assoc. Profs., Gorgan Univ. of Agric. Sci. and Nat. Resour., Iran

⁵Lecturer, Applied Higher Education Complex of Jahrom, Iran

*Corresponding author: E-mail: hossein_k_p@yahoo.com

Abstract

In this research, the spatial distribution of N, P and K in agricultural lands of Golestan province were evaluated using different geostatistical methods such as Kriging, Inverse Distance Weighting, Radial Basis Function, Inverse Multiquadric and Local Polynomial. For this purpose, 505 soil samples were collected from fields in 2008 and concentrations of these elements were measured for each sample. The performance criteria for evaluation were Mean Absolute Error, Mean Bias Error and Root Mean Square Error with the Jackknife methods. The results showed that Kriging was the best method for estimating N, P and K. Because, it showed the highest accuracy and the lowest error for estimating of these elements. Local Polynomial (degree3) was also found as the most unsuitable method for estimating of these elements. Semivariograms analysis indicated that N and K were the best fitted by Exponential models, also P by Spherical model. Result of zoning showed that amounts of N and P were lower in north and east regions of the study lands.

Keywords: Geostatistics, Nitrogen, Phosphorus, Potassium, Zoning

برتری این شاخه از آمار نسبت به شاخه کلاسیک آن، فراشمولی بودن آن است، بطوری که می توان آمار کلاسیک را حالت خاصی از آن دانست. اساس این شاخه از آمار بر تعریف و توسعه روابط متغیر ناحیه ای بنا شده است. تخمین های زمین آماری تحت عنوان کریجینگ نامیده می شود و روش های گوناگونی دارد. روش های مختلف زمین آمار بسته به نوع متغیر، دقت متفاوتی دارند. در کل می توان گفت زمین آمار به بررسی متغیرهایی می پردازد که دارای ساختار مکانی هستند و یا به عبارتی بین مقادیر، فاصله و جهت قرار

مقدمه

وجود تغییرات مکانی در ویژگی های خاک امری معمول است ولی شناخت این تغییرات به ویژه در اراضی کشاورزی جهت برنامه ریزی دقیق و مدیریت امری ضروری است. آگاهی از این مسئله برای افزایش سود و نیل به بهره برداری پایدار ضرورت دارد (ایوبی و همکاران 1386).

زمین آمار به مفهوم اروپایی آن، شاخه ای از آمار است که در آن مختصات داده های مربوط به جامعه بررسی و ساختار مکانی آن ها، مورد مطالعه می گردد.

رگرسیون- کریجینگ نسبت به دو روش دیگر، این روش حداکثر صحت را برای تخمین نیتروژن کل به کمک داده‌های ماده آلی داراست.

ناترز و همکاران (1995) در تحقیقی روش‌های مختلف زمین‌آماری را برای تخمین عمق خاک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که روش کریجینگ ترکیب شده با رگرسیون، نسبت به روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ صحت بیشتری دارد. ایستوک و کوپر (1998) در تحقیقی، روش کریجینگ را در برآورد عناصر سنگین مورد استفاده قرار دادند. آنان به این نتیجه رسیدند که این روش بهترین برآورد کننده خطی ناریب برای عنصر سرب در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. تریانتافیلیس و همکاران (2001) با مقایسه پنج روش زمین آمار برای برآورد شوری، دریافتند روش کریجینگ رگرسیونی برآورد بهتری را نسبت به روش‌های کریجینگ معمولی، کریجینگ سه بعدی و کوکریجینگ ارائه می‌دهد. در منطقه‌ای در استان سی‌چوان⁴ چین از روش کوکریجینگ برای میان‌یابی غلظت عنصر مس در خاک‌های زراعی استفاده شد. این کار براساس 623 نمونه خاک صورت گرفت. نتایج نشان داد که در شرایط برابر از نظر تعداد نمونه، ریشه دوم میانگین مربعات باقی مانده⁵ (RMSE) حاصل از روش کوکریجینگ در مقایسه با کریجینگ معمولی، از 0/9 تا 7/77 درصد کاهش نشان داد. صحت تخمین متغیر مس با استفاده از کوکریجینگ نسبت به کریجینگ حتی در هنگامی که تعداد نمونه‌ها 10 درصد کاهش داده شد بیشتر بود (پنگ و همکاران 2009). اسماعیل و جونوسی (2009) تغییرات مکانی عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم را در باغی در مالزی با استفاده از روش‌های زمین آماری و با کمک نرم‌افزار GS⁺ مورد بررسی قرار دادند. نقشه‌های حاصل از میان‌یابی نشان داد که مناطقی از این باغ با کمبود نیتروژن روبروست در حالی‌که مقادیر فسفر و پتاسیم در حد کفایت است. این محققین استفاده از این نقشه‌ها را برای مدیریت کودی کارآمدتر در این باغ توصیه کردند. یوان و کای

گرفتن مقادیر ارتباطی مکانی وجود دارد (حسنی پاک 1386).

ابزاری که همبستگی مکانی بین مقادیر یک متغیر در یک ناحیه را بررسی می‌نماید، نیم تغییر نما¹ نام دارد که نمودار واریانس بر مبنای فاصله بین نمونه‌هاست (محمدی 1385). نیم‌تغیر نما قلب زمین آمار و رکن اصلی آن است که ساختار ارتباط مکانی بین نمونه‌ها را نشان می‌دهد (وبستر و الیور 2000). تغییر واریانس بین نقاطی به فاصله h از یکدیگر، می‌تواند همبستگی متقابل بین مقدار متغیر را بین این نقاط نشان دهد. در صورت وجود ساختار مکانی، طبیعی است که وابستگی مقدار متغیر در نقاط نزدیک به هم بیشتر از نقاط دور از هم باشد. هدف اصلی از برقرار کردن تابع نیم تغییر نما آن است که بتوان ساختار تغییرپذیری متغیر را نسبت به فاصله مکانی شناسایی نمود (حسنی پاک 1386).

فاتحی و همکاران (1388) از روش کریجینگ معمولی برای تهیه نقشه پراکنش فسفر قابل جذب، پتاسیم قابل جذب و کربن آلی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اسلام آباد غرب در استان کرمانشاه استفاده کردند. نتایج نشان داد که بهترین مدل برازش یافته برای کربن آلی و فسفر قابل جذب، مدل کروی و برای پتاسیم قابل جذب، مدل نمائی است. سکوتی اسکوتی و مهدیان (2011) تغییرات مکانی عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم در دشت ارومیه را بررسی و نقشه‌های پراکنش مکانی این عناصر را با روش‌های میان‌یابی کریجینگ، میانگین متحرک وزنی و کوکریجینگ تهیه کردند. صحت این نقشه‌ها با استفاده از تکنیک اعتبارسنجی متقابل² ارزیابی شد.

ایوبی و همکاران (1386) جهت میان‌یابی مکانی نیتروژن کل خاک به کمک ماده آلی در بخشی از اراضی سرخنکلاته استان گلستان، از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و رگرسیون استفاده کردند. نتایج نشان داد با توجه به حداقل بودن مقادیر خطای تخمین و میانگین مربعات خطا (MSE)³ در روش

¹ Semi-variogram

² Cross validation

³ Mean square error

⁴ Sichuan

⁵ Root mean square error

مختلف و کاربرد یکنواخت کودها، سبب می‌شود که برخی خاک‌ها کود بیشتر و برخی کمتر از حد نیاز خود کود دریافت کنند (سکوتی اسکویی و مهدیان 2011). با توجه به نقش مؤثر عناصر پرمصرف نیتروژن، فسفر و پتاسیم در تولید محصولات کشاورزی، هدف این پژوهش بررسی تغییرات مکانی عناصر پرمصرف اولیه در محدوده اراضی کشاورزی استان گلستان بر اساس روش‌های مختلف میان‌یابی است تا بتوان به یک الگوی صحیح میان‌یابی دست یافت و از آن الگو جهت تهیه نقشه این عناصر با هدف مدیریت زراعی بهتر تولید محصولات کشاورزی در کوتاه مدت استفاده کرد

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان گلستان حدود 21500 کیلومتر مربع مساحت دارد. این استان در مختصات بین $36^{\circ} 44'$ تا $38^{\circ} 5'$ عرض شمالی و $53^{\circ} 51'$ تا $14^{\circ} 56'$ طول شرقی قرار دارد. آب و هوای استان را می‌توان با توجه به خصوصیات دما و بارش به سه نوع معتدل خزری مرطوب، کوهستانی (معتدل و سرد) و نیمه‌خشک (نیمه بیابانی) تقسیم کرد. استان گلستان تنها استان شمالی و ساحلی کشور است که دارای شرایط بیابانی و نیمه‌بیابانی است و چهار تا پنج ماه خشک دارد. بیش از 35 درصد از کل وسعت استان را مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهد. گرمای زیاد، خشکی شدید و کمبود آب، شوری خاک، طوفان‌های همراه با گرد و خاک از ویژگی‌های اقلیمی این منطقه است. استان گلستان به دلیل شرایط متنوع اقلیمی، منابع خاک متفاوتی دارد، بطوری که از قسمت جنوبی استان به سمت شمال، مطابق با کاهش نزولات جوی، منابع خاک نیز از نظر کیفی کاهش می‌یابد. بیش از 30% از مساحت استان با مشکل شوری روبروست (بی‌نام 1388).

نمونه‌برداری

به منظور تهیه نقشه‌های رقومی ویژگی‌های خاک اراضی کشاورزی، اطلاعات و داده‌های خام 505

(2010) به منظور ارزیابی تغییرات مکانی غلظت نترات در شهر کونیا در کشور ترکیه، از روش کریجینگ معمولی استفاده کردند. طبق نقشه حاصل از میان‌یابی نترات، آلودگی نتراتی سفره‌های آب زیرزمینی، اغلب در مرکز شهر مشاهده شد. آنان دلیل این تجمع را به نترات حاصل از فاضلاب صنعتی نسبت دادند. آیشاه و همکاران (2010) میان‌یابی برخی از خصوصیات شیمیایی خاک منطقه شالیزار سلانگور در مالزی را با استفاده از 138 نمونه انجام دادند. در این مطالعه از مدل نمایی برای برازش نیم تغییر-نما این عناصر استفاده شد. نقشه‌های حاصل از روش کریجینگ نشان داد که بخشی وسیعی از منطقه دارای نیتروژن اضافی است. کارزماریک و رنمان (2011) با روش کریجینگ، الگوی تجمع فسفر را در زمینی باتلاقی حاصل از فاضلاب بررسی کردند. نتایج نشان داد که غلظت عنصر فسفر در ارتباط با آلومینیوم، آهن و کلسیم می‌باشد. در این مطالعه بیشترین همبستگی بین توزیع مکانی کلسیم و فسفر مشاهده شد.

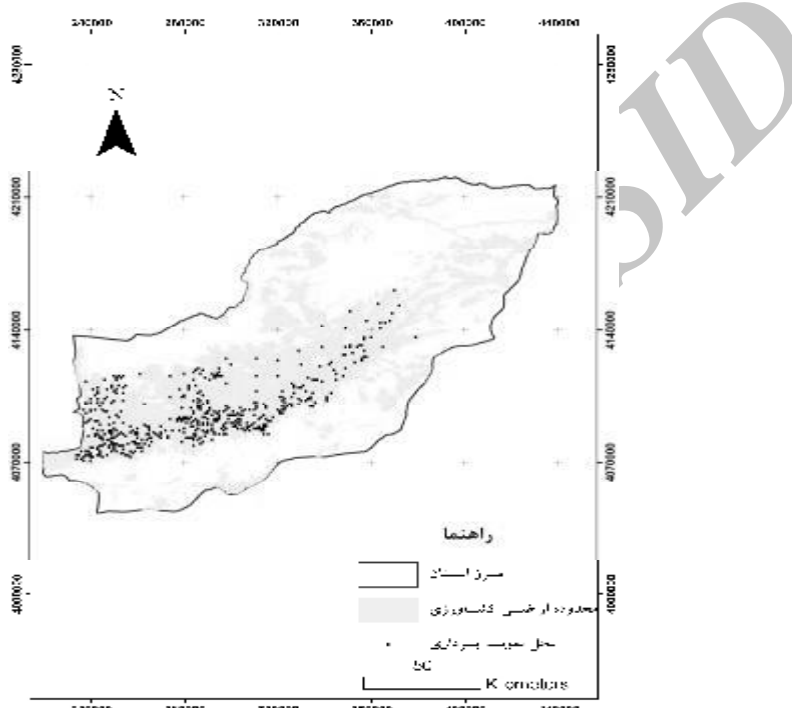
لیوید و آنکسون (2004) از پنج روش زمین آماری برای برآورد و پیش بینی مقدار NO_2 (دی اکسید نیتروژن) در انگلستان استفاده کردند. نتایج نشان داد که روش کریجینگ ساده با میانگین تغییر یافته موضعی¹ (SKLM) برآورد بهتری براساس معیار اعتبارسنجی متقابل دارد و روش‌های کریجینگ معمولی و وزندهی معکوس فاصله در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند.

یک بخش مهم تأثیرگذار در تولیدات کشاورزی، مدیریت تغذیه گیاه و حاصلخیزی خاک است. کودهای شیمیایی مهم‌ترین منبع تأمین عناصر غذایی گیاه بوده و استفاده درست و بهینه از آنها در حصول نتیجه مورد نظر، حفظ نظام اکولوژیکی محیط و تضمین سلامت مصرف‌کنندگان تولیدات کشاورزی نقش اساسی دارند. برای اعمال مدیریت کودی صحیح لازم است تا از میزان عناصر غذایی خاک جهت حصول عملکرد بهتر، اطلاع کاملی داشت. عدم آگاهی از تغییرات خاک در نقاط

¹ Simple kriging with a locally varying mean

نقطه از استان، از بخش آب و خاک مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان تهیه شد نمونه‌برداری از عمق 0-30 سانتی‌متر بوسیله مته در سال 1387 صورت گرفت. نمونه‌ها هوا خشک گردیده و سپس از الک 2 میلی متری عبور داده شدند. برای اندازه‌گیری نیتروژن از دستگاه کجل تک و برای استخراج فسفر قابل استفاده از روش اولسن (اولسن و همکاران

1954) و برای استخراج پتاسیم قابل استفاده از عصاره گیر استات آمونیوم و بر اساس روش کارتر (1993) عمل شد. وضعیت پراکنش نقاط نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه در شکل 1 نشان داده شده است. انتخاب این نقاط در محدوده اراضی کشاورزی استان صورت گرفته است.



شکل 1- منطقه مورد مطالعه و وضعیت پراکنش نقاط نمونه‌برداری خاک در اراضی کشاورزی استان گلستان

روش‌های زمین‌آمار در این آزمایش از تابع نیم تغییرنا جهت نشان دادن تغییرات یک متغیر با در نظر گرفتن فاصله استفاده شد که معادله آن به صورت زیر است:

روش‌های زمین‌آمار

در این آزمایش از تابع نیم تغییرنا جهت نشان دادن تغییرات یک متغیر با در نظر گرفتن فاصله استفاده شد که معادله آن به صورت زیر است:

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

که در آن $\gamma(h)$ مقدار نیم تغییرنا در فاصله h ، $Z(x_i)$ و $Z(x_i + h)$ مقدار متغیر در نقاط $x_i, (x_i + h)$ و $N(h)$ تعداد جفت نمونه‌های بکار رفته به ازای هر فاصله

¹ Spherical

² Exponential

³ Gaussian

کریجینگ

اساس ضریب تخصیص داده شده، با بدست آوردن رابطه درجه اول، دوم و یا سوم بین مقادیر متغیر در نقاط همسایگی x ، y و z و حداقل سازی اطلاعات محاسبه شده، میان یابی صورت می گیرد (روپرت 1996).

تابع پایه شعاعی

از جمله روش های درون یابی است که در آن سطح تخمین از مقادیر مشاهده ای عبور می کند. از خصوصیات این روش که حالتی از شبکه عصبی مصنوعی می باشد، این است که مقادیر بیشتر از حداکثر مشاهده ای و یا کمتر از حداقل مشاهده ای در سطح تخمین وجود دارد. روش تابع پایه شعاعی بر اساس پنج تابع مختلف درون یابی داده ها را انجام می دهد که هسته اصلی توابع، مجموع مقادیر مربعات $(h^2 + R^2)$ است که به ترتیب R عامل هموار کننده³ و h ترسیم ناهمسان گرد⁴ مرتبط با فاصله نقاط هستند (کارسون و فولی 1991). توابعی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت عبارتند از: چندربعی معکوس⁵، چندربعی⁶ و نواری کم ضخامت⁷.

فاصله معکوس وزن دار

در این روش برای هر کدام از نقاط اندازه گیری شده، بر اساس فاصله بین آن نقطه تا موقعیت نقطه مجهول وزن مشخصی در نظر گرفته می شود. سپس این اوزان توسط توان وزن دهی کنترل می شود، به طوری که توان های بزرگتر اثر نقاط دورتر از نقطه مورد برآورد را کاهش داده و توان های کوچکتر وزن ها را به طور یکنواخت تری بین نقاط هم جوار توزیع می کنند. البته باید توجه داشت که این روش بدون توجه به موقعیت و آرایش نقاط، فقط فاصله آنها را در نظر می گیرد، یعنی نقاطی که دارای فاصله یکسانی از نقطه برآورد هستند دارای وزن یکسانی می باشند

کریجینگ یک روش برآورد زمین آماری است که بر پایه میانگین متحرک وزن دار استوار است. به طوری که می توان گفت این روش بهترین برآورد کننده خطی ناریب می باشد (محمدی 1385). شرط ناریب بودن در سایر روش های تخمین، نظیر روش چندجمله ای و وزن دهی معکوس فاصله نیز اعمال می شود، ولی ویژگی کریجینگ آن است که در عین ناریب بودن، واریانس تخمین نیز در کمترین مقدار می باشد. بنابراین کریجینگ همراه هر تخمین، مقدار خطای آن را نیز می دهد که با استفاده از این ویژگی منحصر به فرد آن می توان قسمت های واجد خطای زیاد که برای کاهش خطا به داده های بیشتری نیاز دارند را مشخص نمود (حسنی پاک 1386). این برآورد کننده بصورت زیر تعریف می شود:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad [2]$$

در این معادله $Z^*(x_i)$ تخمین مقدار متغیر Z در نقطه x و λ_i وزن آماری اختصاص یافته به مقادیر Z در نقطه x_i است. شرط استفاده از این تخمین گر آن است که متغیر Z توزیع نرمال داشته باشد. در صورتی که متغیر مورد نظر توزیع نرمال نداشته باشد باید از کریجینگ غیرخطی استفاده نمود یا با استفاده از روش های تبدیل داده ها توزیع متغیر مورد نظر را تبدیل به نرمال نمود (حسنی پاک 1386، محمدی 1385). در این تحقیق از روش کریجینگ با مدل های کروی، گوسی و نمایی استفاده شد

چند جمله ای موضعی

این روش حداقل مجزورات متناسب را بین نقاط شناسایی شده در محدوده بیضوی شکل، به عنوان وزن نقطه تخصیص می دهد. در این روش بر

³Smoothing factor -

⁴Anisotropically rescaled factor

⁵Inverse multiquadric

⁶Multiquadric

⁷Thin plate spline

¹Linear

²Linear to sill

ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{K=1}^N (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2} \quad [6]$$

در این معادلات $Z^*(X_i)$ مقدار برآورد شده در نقطه X_i ، $Z(X_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه X_i و N تعداد نقاط می‌باشد.

صحت مدل با MAE تعیین می‌شود که مقدار صفر آن نشان‌دهنده صحت 100 درصد است و هر قدر مقدار آن از صفر فاصله داشته باشد حاکی از کم شدن صحت مدل است. معیار ارزیابی MBE بیانگر میانگین انحراف است. این معیار علاوه بر دارا بودن علامت مثبت (بیش برآوردی مدل) و یا منفی (کم برآوردی مدل) مقدار انحراف از مقادیر مشاهده شده را نیز نشان می‌دهد. MBE برابر صفر نشان می‌دهد که برآورد مدل خوب بوده و در آن هیچ گونه انحرافی وجود ندارد. معمولاً هر قدر مقدار این دو معیار و همچنین ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) کمتر باشد صحت روش بیشتر است. از نظر تئوری هرگاه این دو معیار برابر صفر شوند نمایانگر این است که مقدار تخمین زده شده یک کمیت دقیقاً برابر مقدار واقعی آن است (مهیدیان 1385). در این تحقیق از نرم‌افزارهای GS+ و ArcGIS نسخه 9/3 استفاده شد.

نتایج و بحث

توصیف آماری داده‌ها

قبل از انجام محاسبات زمین آماری بررسی‌های متداول آماری از قبیل آزمون نرمال بودن توزیع داده‌ها صورت گرفت. بوسیله آزمون کولموگروف-اسمیرنوف مشخص شد که فسر قابل استفاده از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کند. داده‌های این عنصر با روش لگاریتمی نرمال شدند. چولگی و کشیدگی عنصر فسفر در سطح احتمال 5 درصد معنی‌دار بود. آمار توصیفی متغیرهای مورد مطالعه در جدول 1 آمده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد مقدار نیتروژن کل در منطقه مورد مطالعه از مقدار 0/22- 0/02 درصد

(مهیدیان 1385، تقی زاده مهرجردی و همکاران 1387). مقدار عامل وزنی با استفاده از رابطه 3 محاسبه می‌شود.

$$\lambda_i = \frac{D_i^{-\alpha}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-\alpha}} \quad [3]$$

که در آن: λ_i وزن نقطه i ام، D_i فاصله نقطه i ام تا نقطه مجهول و α معادل توان وزن‌دهی می‌باشد

معیار اعتبار سنجی

در این تحقیق از روش اعتبارسنجی جک‌نایف¹ برای برآزش صحت تخمین روش‌های میان‌یابی استفاده شد. این روش بر این اساس استوار است که هر بار یکی از نقاط معلوم حذف شده و سپس مقدار آن نقطه از روی نقاط مجاور مقداری برآورد گردید، سپس مقدار واقعی به محل واقعی برگردانده شد و برای تمامی نقاط، این عمل تکرار شد (حسینی پاک 1386). در نهایت با توجه به مقادیر مشاهده شده و برآورد شده دقت هر روش با توجه به معیارهای آماری میانگین مطلق خطا² (MAE)، میانگین اریب خطا³ (MBE) و خطای برآورد (ریشه دوم میانگین مربعات) (RMSE) محاسبه گردید (وبستر و الیور 2000). مقدار این معیارها با استفاده از روابط 4 تا 6 بدست آمد:

میانگین مطلق خطا (MAE):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)|}{n} \quad [4]$$

میانگین انحراف خطا (MBE):

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i))}{n} \quad [5]$$

¹Jackknife

²Mean absolute error

³Mean bias error

آن به همراه پتاسیم قابل استفاده بیش از 35 درصد است. در طبقه بندی وایلدینگ (1985) متغیرهای خاکی که دارای ضریب تغییرات بالاتر از 35 درصد باشند در گروه متغیرهای با تغییرپذیری زیاد قرار می گیرند.

و مقدار پتاسیم قابل استفاده از 417-84 میلی گرم در کیلوگرم در نوسان می باشد. دامنه تغییرات فسفر قابل استفاده در اراضی کشاورزی استان گلستان بین صفر تا 100 میلی گرم در کیلوگرم متغیر و ضریب تغییرات

جدول 1- آمار توصیفی متغیرهای خاک

متغیر	واحد	میانگین	کمینه	بیشینه	چولگی	کشیدگی	ضریب تغییرات (%)	انحراف معیار
نیتروژن	درصد	0/12	0/02	0/22	0/83	2/52	30	0/036
فسفر	میلی گرم در کیلوگرم	14/07	0	100	2/18	6/76	88/7	12/49
پتاسیم	میلی گرم در کیلوگرم	260/87	84	417	0/08	1/89	35/17	91/75
pH	-	6/48	5/57	7/9	0/09	-0/65	6/23	0/404

0/418 بدست آمد. در حالت ایده ال باید مقدار اثر قطعه ای صفر باشد اما در واقعیت نیم تغییرناهمای تجربی مقادیر بالاتر از صفر را نشان می دهند که این به دلیل ظهور جزء تصادفی متغیر می باشد. اثر قطعه ای به علت وجود تغییرات در فواصل نمونه برداری و یا به دلیل خطای نمونه برداری و اندازه گیری بروز می کند (حسنی پاک 1386).

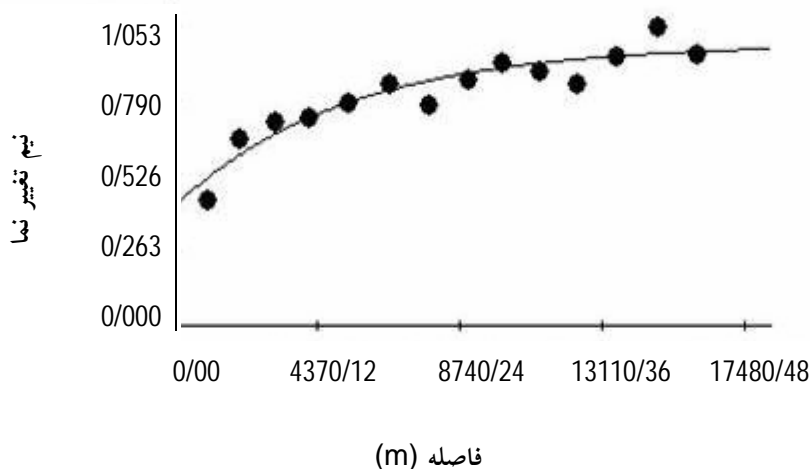
در بین روش های مختلف زمین آماری، روش کریجینگ دارای کمترین خطا و بالاترین صحت بود. بعد از روش کریجینگ، مدل تابع چندربعی معکوس در روش تابع پایه شعاعی در مکان بعدی قرار گرفت. از بین 12 روش-مدل مورد استفاده در این مطالعه، روش چند جمله ای موضعی درجه 3، بالاترین خطا و کمترین صحت را نشان داد و نامناسب ترین روش شناخته شد (جدول 3).

برآورد نیتروژن کل

برای بررسی وجود یا عدم وجود وابستگی مکانی نیتروژن کل در محدوده زمین های کشاورزی استان گلستان پس از برازش چندین مدل نیم تغییرنا، بر پایه آماره مجموع مربعات باقی مانده، مدل نمایی به عنوان مناسب ترین مدل برگزیده شد (شکل 2). پارامترهای این مدل در جدول 2 آمده است. نسبت اثر قطعه ای به آستانه برای نیتروژن 0/57 بدست آمد. این نسبت برای ارزیابی ساختار مکانی داده ها مورد بررسی قرار می گیرد. وقتی این نسبت کمتر از 0/25 باشد متغیر مورد نظر دارای ساختار مکانی ضعیف می باشد، بین 0/25-0/75 باشد، از ساختار مکانی متوسط برخوردار است و هنگامی که بزرگتر از 0/75 باشد ساختار مکانی قوی است (شی و همکاران، 2007). در این برازش مقدار اثر قطعه ای برای نیتروژن کل

جدول 2- پارامترهای نیم تغییرنا متغیرهای مورد مطالعه

متغیر	مدل برازش شده	اثر قطعه ای	سقف	دامنه تاثیر (متر)	نسبت اثر قطعه ای به سقف	مجموع مربعات باقی مانده
نیتروژن کل	نمایی	0/418	0/98	15720	0/57	3/11
فسفر قابل استفاده	کروی	0/235	0/629	26130	0/62	2/660
پتاسیم قابل استفاده	نمایی	0/431	1/02	7530	0/56	0/01



شکل 2- نیم تغییر نمای تجربی و مدل برازش داده شده به آن نیتروژن کل خاک

جدول 3- نتایج ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در تخمین نیتروژن کل خاک در اراضی کشاورزی استان گلستان

روش	مدل	MAE	MBE	RMSE
کریجینگ	کروی	0/170	0/002	0/230
	نمایی	0/170	0/002	0/229
	گوسی	0/171	0/002	0/231
تابع پایه شعاعی	چند ربعی	0/181	0/002	0/246
	چند ربعی معکوس	0/172	0/005	0/231
	نواری کم ضخامت	0/217	-0/003	0/290
	درجه 1	0/177	-0/002	0/238
چند جمله‌ای موضعی	درجه 2	0/195	-0/001	0/262
	درجه 3	0/364	-0/086	1/340
	توان 1	0/173	0/006	0/232
وزن‌دهی فاصله معکوس	توان 2	0/177	0/007	0/237
	توان 3	0/183	0/007	0/246

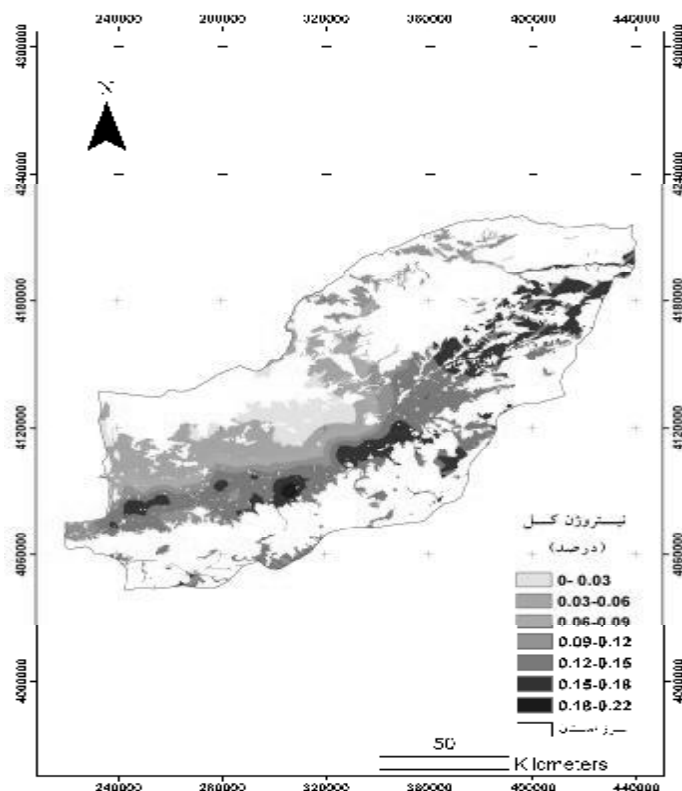
می‌رسد که روش مناسب زمین‌آمار در برآورد یک متغیر، به نوع متغیر و عوامل منطقه‌ای مؤثر بر آن بستگی دارد و نمی‌توان روش منتخب در یک منطقه را به سایر مناطق تعمیم داد (نقی‌زاده مهرجردی 1387، دلبری و همکاران 1383).

نقشه پهنه‌بندی نیتروژن کل در 7 کلاس در شکل 3 نشان داده شده است. با توجه به ساده بودن محاسبات و کم هزینه بودن تخمین نیتروژن خاک با

برای ارزیابی تغییرات مکانی غلظت نیترات آب زیرزمینی در شهر کنیا ترکیه نیز از روش کریجینگ معمولی استفاده شد (یوان و کای 2010). در آزمایشی، جاکسون و کالدول (1993) برای برازش نیترات و نیتروژن معدنی به ترتیب از مدل‌های نمایی و خطی استفاده کردند. در مطالعه ایوبی و همکاران (1386) روش کریجینگ-رگرسیون برای پهنه‌بندی نیتروژن کل به دلیل دارا بودن حداقل مقدار خطا انتخاب شد. به نظر

است (حدود 80011 هکتار مقدار نیتروژنی زیر 0/09 درصد دارند) بطوری که از قسمت جنوبی استان به سمت شمال، مطابق با کاهش نزولات جوی، منابع خاکی نیز از نظر کیفی افت می کند (بی نام 1388).

روش کریجینگ، از این نقشه می توان در مدیریت زراعی تولید محصولات کشاورزی استان گلستان استفاده کرد. نتایج پهنه بندی این عنصر نشان می دهد که مقدار آن در بخش های شمالی و استان کمتر از مناطق جنوبی



شکل 3- نقشه پهنه بندی نیتروژن کل با روش کریجینگ

(حسینی پاک 1386). از عوامل مؤثر بر تغییر پذیری دامنه تأثیر می توان به عملیات زراعی از جمله کودهی و آبیاری مزرعه نام برد (کاهن و همکاران 1994) که بر تحرک یون ها مؤثر بوده و باعث توزیع متفاوت عناصر غذایی می گردند. جدول 2 نشان می دهد که این مدل با نسبت اثر قطعه ای به سقف 0/62، از ساختار مکانی متوسطی برخوردار است. جاکسون و کالدول (1993) از مدل کروی برای بررسی تغییرات مکانی فسفر در رویشگاه چندین گیاه چندساله استفاده کردند.

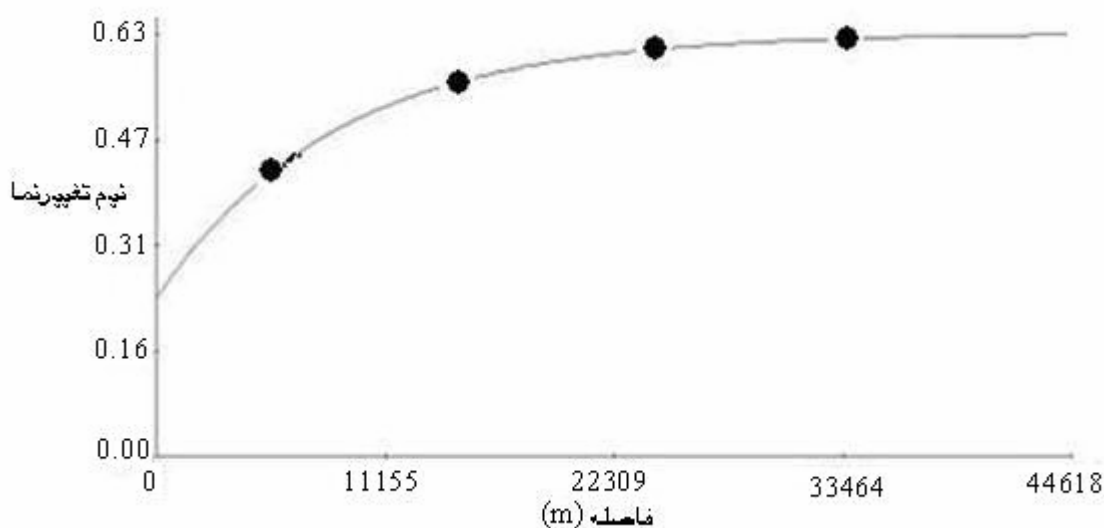
نتایج نشان داد که در بین روش های مختلف زمین آماری، روش کریجینگ بهترین الگو را برای تخمین فسفر قابل استفاده در محدوده اراضی کشاورزی

برآورد فسفر قابل استفاده

در این پژوهش برای برآزش نیم تغییرنمای فسفر قابل استفاده از مدل کروی استفاده شد (شکل 4). دلیل این انتخاب داشتن مجموع مربعات باقی مانده (RSS) کمتر نسبت به سایر مدل ها بود (جدول 2). در این برآزش دامنه تأثیر 26130 متر بدست آمد. معمولاً عناصری مانند فسفر که در خاک تحرک کمتری دارند دامنه تأثیر بزرگتری دارند. دامنه تأثیر بیانگر حداکثر فاصله ای است که پس از آن ساختار مکانی دیگر وجود نداشته و نیم تغییرنما به یک مقدار ثابت می رسد. پس از عبور از دامنه تأثیر هیچ گونه ارتباط مکانی بین نمونه ها وجود نداشته و نمونه ها مستقل از یکدیگر هستند

ریمان (2011) نیز از روش کریجینگ برای ارزیابی تغییرات مکانی فسفر یک منطقه باتلاقی استفاده کردند. سکوتی اسکویی و مهدیان (2011) نیز برای برآورد مقدار عنصر فسفر در دشت ارومیه، روش کریجینگ را مناسب‌ترین روش اعلام کردند. این روش دارای کمترین مقدار MAE و MBE بود.

استان گلستان ارائه می‌دهد. از مدل‌های مختلف کریجینگ مدل نمایی مناسب‌ترین مدل بود که کمترین خطا و انحراف و بالاترین صحت را داشت (جدول 4). همچنین روش چندجمله‌ای موضعی با استفاده از رابطه درجه 3 با داشتن بیشترین خطا، به عنوان نامناسب‌ترین الگو شناخته شد ($MBA=16/919$). کارزماریک و



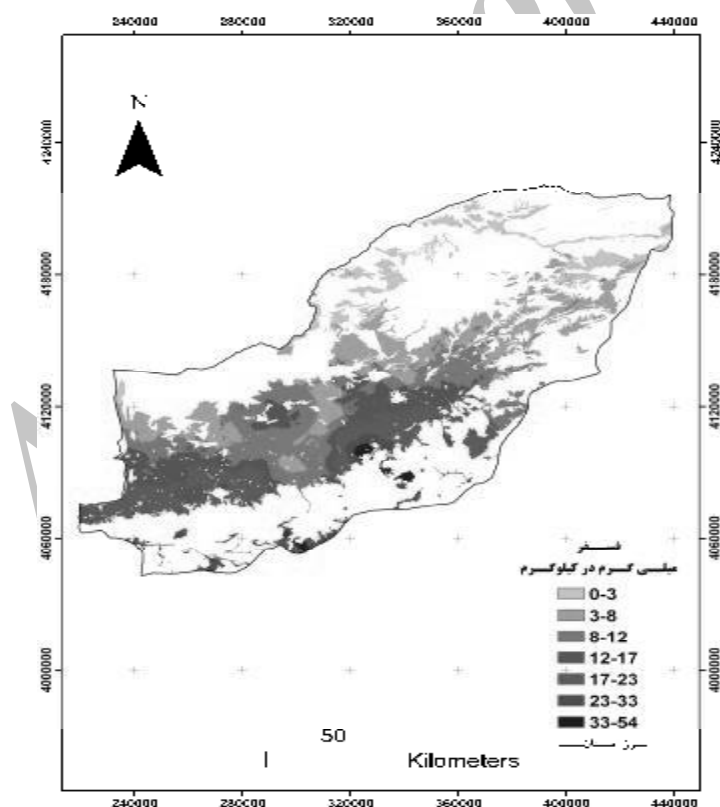
شکل 4- نیم‌تغییر نمایی تجربی و مدل برازش داده شده به آن برای فسفر قابل استفاده

جدول 4- نتایج ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در تخمین فسفر قابل استفاده در اراضی کشاورزی گلستان

روش	مدل	MAE	MBE	RMSE
کریجینگ	کروی	7/923	0/005	11/006
	نمایی	7/870	-0/004	11/005
	گوسی	7/951	0/003	11/132
توابع پایه شعاعی	چند ربعی	8/471	-0/153	12/071
	چند ربعی معکوس	7/970	0/232	11/207
	نواری کم ضخامت	9/990	-0/368	13/890
چندجمله‌ای موضعی	درجه 1	7/933	-0/054	11/119
	درجه 2	9/137	-0/076	13/006
	درجه 3	16/919	-1/092	46/295
وزندهی فاصله معکوس	توان 1	7/937	0/239	11/136
	توان 2	8/087	0/023	11/407
	توان 3	8/504	-0/100	12/062

معین، بسیار دشوار می‌باشد. مقدار کود فسفر برای هر محصول به نوع خاک، مقدار فسفر قابل استفاده خاک، سابقه مصرف کودهای فسفوری، شرایط اقلیمی منطقه، عملکرد مورد انتظار و مقادیر سایر عناصر غذایی موجود در خاک بستگی دارد (ملکوتی 1378). بنابراین تغییرات مکانی فسفر قابل استفاده در اراضی استان را می‌توان به شرایط خشک و نیمه خشک و وجود ترکیبات آهکی و کربنات کلسیمی در شمال و شرق استان، بارندگی بیشتر، pH پایین‌تر و وجود یون‌های آهن، آلومینوم در مناطق غربی و مرکزی استان از جمله شهرستان‌های بندرگز، کردکوی و گرگان ربط داد (داده‌ها نشان داده نشده است). البته مصرف کودهای حاوی فسفر در تولید محصولات کشاورزی و نوع مواد مادری نیز می‌تواند تأثیرگذار باشد.

حد بحرانی فسفر قابل استفاده برای اغلب محصولات زراعی رایج در استان گلستان بین 10-13 میلی‌گرم در کیلوگرم در نظر گرفته شد (ملکوتی و غیبی 1376). بر اساس نقشه پهنه‌بندی این عنصر، در مناطق شمال و شرقی استان مقدار کمتر از حد بحرانی (180023/69 هکتار) و در قسمت‌های جنوبی و غربی استان مقدار بیشتری از حد بحرانی این عنصر (117657/19 هکتار) مشاهده شد (شکل 5). فسفر حساسیت زیادی نسبت به pH دارد. در pH کمتر از 5/5 یون‌های آهن و آلومینیوم با فسفات ترکیب شده و به صورت رسوبات نامحلول در می‌آیند. در pH بالاتر از هفت، ترکیبات نامحلول فسفات‌های کلسیم و منیزیم به وجود می‌آید. به علت عدم پویایی فسفر در خاک، پیش‌بینی نیاز گیاهان به کود فسفاتی، جهت عملکردی



شکل 5- نقشه پهنه‌بندی فسفر قابل استفاده با روش کریجینگ

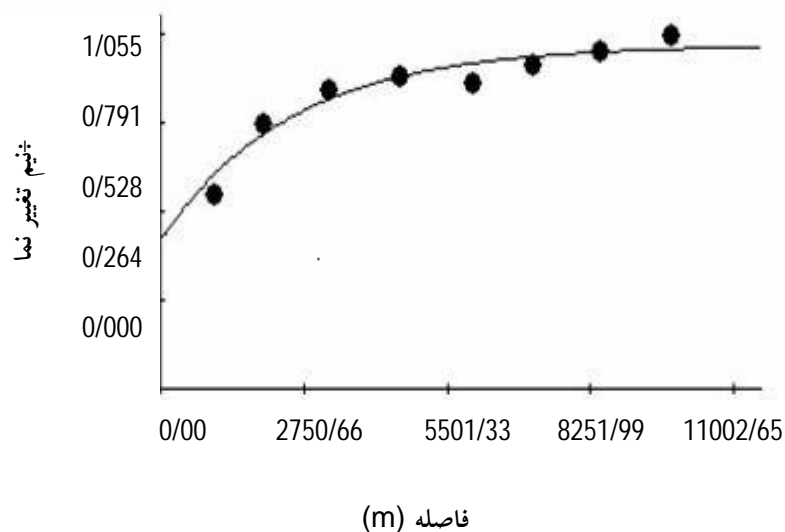
برآورد پتاسیم قابل استفاده

برای بررسی وجود یا عدم وجود وابستگی مکانی عنصر پتاسیم قابل استفاده در محدوده زمین‌های کشاورزی استان گلستان، پس از برآزش چندین مدل نیم تغییرنما، مدل نمایی به عنوان مناسب‌ترین مدل برگزیده شد (شکل 6). پارامترهای مدل نیم‌تغییرنما در جدول 2 آمده است. نسبت اثر قطعه‌ای به سقف (0/56) نشان‌دهنده وجود ساختار مکانی متوسط و قابل قبول برای پتاسیم قابل استفاده در منطقه مورد مطالعه است. اگر نیم تغییرنما دارای مقدار ثابت (سقف معین) و در نتیجه دامنه تأثیر مشخصی باشد ساختار مکانی می‌تواند وجود داشته باشد. در این مطالعه پتاسیم قابل استفاده در دامنه 7530 متر به مقدار ثابت سقف، 1/02 رسید. نیم تغییر نماهایی که تمایلی به نزدیک شدن به مقدار ثابتی نداشته باشند و با افزایش فاصله در محدوده نمونه‌برداری همواره افزایش یابند، برای تخمین مناسب نمی‌باشند (حسنی پاک 1386). در برآزش مدل نیم تغییر نما، اثر قطعه‌ای برای پتاسیم قابل استفاده 0/431 بدست آمد که این مقدار معمولاً ناشی از خطای نمونه‌برداری، اندازه‌گیری و تجزیه نمونه هاست.

نتایج نشان داد که روش کریجینگ با سه مدل مختلف، برآورد بهتری از مقدار پتاسیم قابل استفاده در مناطق بدون نمونه‌برداری ارائه می‌دهد. نامناسبترین برآوردها با روش چندجمله‌ای موضعی بدست آمد بطوری‌که روش چندجمله موضعی درجه 3 بیشترین خطا را داشت و بعد از آن روش نواری کم ضخامت دارای کمترین صحت بود (جدول 5). در مطالعه سکوتی اسکویی و مهدیان (2011) و فاتحی و همکاران (1388) نیز روش کریجینگ برای برآورد تغییرات مکانی پتاسیم قابل استفاده به ترتیب در دشت ارومیه و اراضی

ایستگاه تحقیقات کشاورزی اسلام آباد غرب پیشنهاد شد.

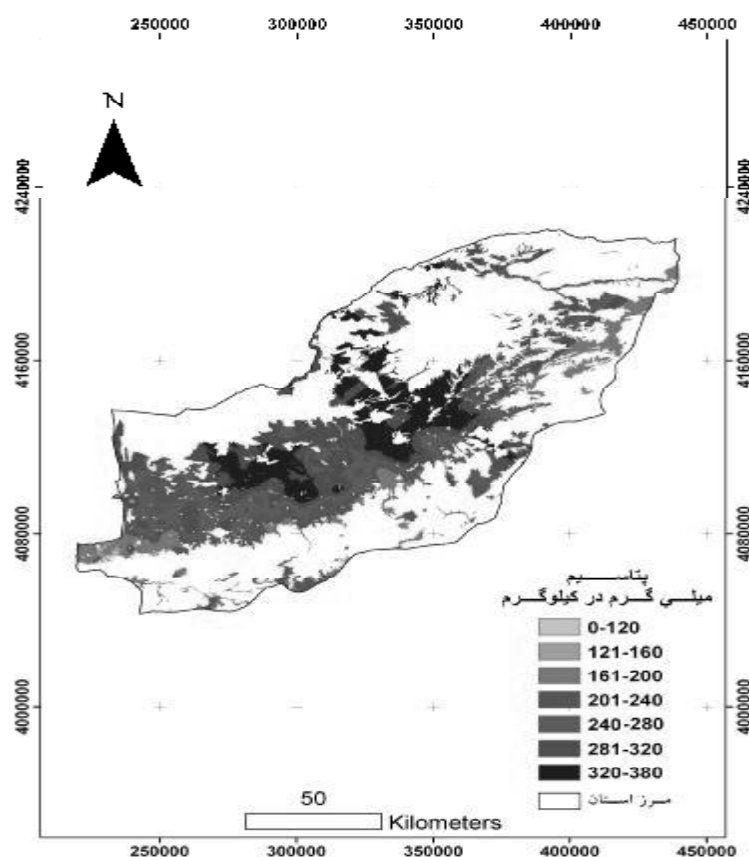
حد بحرانی پتاسیم قابل استفاده برای اغلب محصولات زراعی رایج در استان گلستان بین 270-230 میلی‌گرم در کیلوگرم در نظر گرفته شد (ملکوتی و غیبی 1376). نتایج حاصل از میان‌یابی پتاسیم قابل استفاده با روش کریجینگ در شکل 7 نشان داده شده است. در این نقشه پهنه قابل توجه‌ای از اراضی کشاورزی استان در محدوده پایین‌تر از حد بحرانی قرار دارد (99237/06 هکتار). بیشترین پتاسیم قابل استفاده در بخشی از اراضی شمالی استان و کمبود آن بیشتر در مناطق جنوب و غرب استان مشاهده شد (شکل 7). اصولاً کمبود پتاسیم در نواحی پر باران (خاک‌های اسیدی) خاک‌های آلی و شنی دیده می‌شود. بارندگی مداوم منجر به شسته شدن تدریجی K^+ گشته و کمبود آن را در خاک باعث می‌شود. در نتیجه شسته شدن پتاسیم و همچنین کلسیم و منیزیم از خاک‌های پر باران است که pH خاک این نواحی اسیدی شده و کمبود عناصر فوق در آنها دیده می‌شود (خواجه‌پور 1379). در این مناطق غربی استان میزان بارندگی (به طور متوسط بالاتر از 700 میلی‌متر) و مواد آلی خاک (2/2-3/5 درصد) بالاتر از مناطق شمالی و شرقی استان است (نقشه‌ها نشان داده نشده است). این امر می‌تواند منجر به جذب کمتر و شستشوی بیشتر پتاسیم شود. همچنین می‌توان علت کاهش پتاسیم در مناطق جنوبی و غربی استان را، تخلیه آن در اثر کشت‌های متراکم و فشرده در این مناطق، عدم مصرف کافی کودهای پتاسیمی و سبک بودن بافت خاک در برخی مناطق ربط داد.



شکل 6- نیم تغییر نمای تجربی و مدل برازش داده شده به آن برای پتاسیم قابل استفاده

جدول 5- نتایج ارزیابی روش‌های زمین آماری در تخمین عنصر پتاسیم در اراضی کشاورزی استان گلستان

روش	مدل	MAE	MBE	RMSE
کریجینگ	کروی	6/570	0/474	8/078
	نمایی	6/538	0/670	8/015
توابع پایه شعاعی	گوسی	6/512	0/471	8/009
	چند ربعی	6/987	1/563	8/750
	چند ربعی معکوس	6/697	0/535	7/976
چند جمله‌ای موضعی	نواری کم ضخامت	8/051	3/533	10/621
	درجه 1	6/778	1/711	8/366
	درجه 2	7/874	0/957	12/236
وزن‌دهی فاصله معکوس	درجه 3	8/478	1/535	15/343
	توان 1	6/523	0/672	8/057
	توان 2	6/616	0/876	8/214
	توان 3	6/861	1/001	8/592



شکل 7- نقشه پهنه‌بندی پتاسیم قابل استفاده با روش کریجینگ

استان کمتر از مناطق غربی است اما کمبود پتاسیم قابل استفاده بیشتر در مناطق جنوب و غرب استان مشاهد شد. با استفاده از نقشه‌های تهیه شده در این پژوهش، می‌توان توصیه کودی بر مبنای مناطق همگون جدا شده بر روی نقشه انجام داد و از این نتایج با توجه به تغییرات عناصر خاک، در کوتاه مدت برای تهیه نقشه‌های حاصلخیزی خاک، مطالعات ارزیابی اراضی و برای مدیریت زراعی کارآمدتر در استان گلستان استفاده کرد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از کارکنان و اعضای هیئت علمی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان که نهایت همکاری را در این پژوهش داشتند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

نتیجه گیری

در این بررسی روش کریجینگ بهترین تخمین‌گر برای عناصر پرمصرف اولیه در اراضی کشاورزی استان گلستان شناخته شد. در بین 12 روش-مدل میان‌یابی، روش چند جمله‌ای موضعی درجه 3 نامناسب‌ترین تخمین را جهت میان‌یابی این عناصر نشان داد. این روش دارای بیشترین میزان خطا و انحراف و کمترین صحت برای تخمین این عناصر پرمصرف بود. برای پهنه‌بندی نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل استفاده، مدل‌های مختلف کریجینگ به علت داشتن دقت بالا و کمترین خطا پیشنهاد می‌شوند. بطور کلی روش مناسب زمین آماری در برآورد یک متغیر، به نوع متغیر و عوامل منطقه‌ای تأثیرگذار بر آن بستگی دارد و نمی‌توان روش منتخب در یک منطقه را به سایر مناطق تعمیم داد. نتایج پهنه‌بندی نشان داد که مقدار نیتروژن کل و فسفر در بخش‌های شمالی و شرقی

منابع مورد استفاده

ایوبی ش ا، محمد زمانی س و خرمالی ف، 1386. برآورد مقدار ازت کل خاک به کمک مقدار ماده آلی و با استفاده از روش‌های کریجینگ، کوکریجینگ و کریجینگ-رگرسیون در بخشی از اراضی سرخنکلاته استان گلستان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. جلد چهاردهم، شماره 4. صفحه‌های 23-33.

بی‌نام. 1388. برنامه آمایش استان گلستان. معاونت برنامه‌ریزی استانداری گلستان. جلد اول. 243 صفحه.

تقی‌زاده مهرجردی راه، زارعیان جهرمی م، محمودی ش، حیدری ا و سرمدیان ف، 1387. بررسی روش‌های درونیابی مکانی جهت تعیین تغییرات مکانی ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. سال دوم، شماره 5. صفحه‌های 63-70.

حسنی پاک‌ع، 1386. زمین آمار (ژئواستاتستیک). انتشارات دانشگاه تهران. چاپ دوم. 314 صفحه.

خواجه‌پور م ا، 1379. اصول و مبانی زراعت. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان. چاپ دوم. 386 صفحه.

دلبری م، خیاط خلقی م و مهدیان مح، 1383. ارزیابی روش‌های زمین آمار در برآورد هدایت هیدرولیکی خاک در مناطق شیب آب و پشت آب پایین دشت سیستان. مجله علوم کشاورزی ایران. جلد سی و پنجم، شماره 1 صفحه‌های 13-1.

فاتحی ش، نعمتی ع و قادری ج، 1388. تهیه نقشه حاصلخیزی خاک ایستگاه تحقیقات کشاورزی اسلام آباد غرب با استفاده از تکنیک زمین آمار. صفحه 277. خلاصه مقالات یازدهمین کنگره علوم خاک ایران. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. گرگان.

قهرودی تالی م، 1381. ارزیابی درونیابی به روش کریجینگ. پژوهش‌های جغرافیایی، شماره 43. صفحه‌های 95-108.

محمدی ج، 1385. پدومتری، آمار مکانی. جلد دوم. نشر پلک. 453 صفحه.

ملکوتی مح، 1378. کشاورزی پایدار و افزایش عملکرد با بهینه‌سازی مصرف کود در ایران. نشر آموزش کشاورزی. چاپ دوم. 460 صفحه.

ملکوتی م ج و غیبی م ن، 1376. تعیین حد بحرانی عناصر غذایی محصولات استراتژیک و توصیه صحیح کودی در کشور. نشر آموزش کشاورزی. 56 صفحه.

مهدیان مح، 1385. کاربرد زمین آمار در علوم خاک. خلاصه مقالات اولین کنفرانس خاک، توسعه پایدار و محیط زیست. دانشگاه تهران. تهران.

Aishah AW, Zauyah S, Anuar AR and Fauziah CI, 2010. Spatial variability of selected chemical characteristics of paddy soils in Sawash Sempadon, Selangor, Malaysia. Malaysian Journal of Soil Science 14: 27-39.

Carlson RE, and Foley TA, 1991. The parameter R^2 in multiquadric interpolation. Computers and Mathematic Apply 21:29-42.

- Carter MR, 1993. Soil Sampling and Methods of Analysis. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publisher.
- Cahn M D, Hummel JW, and Brouer BH. 1994. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. Soil Science Society of America Journal 58:1240-1248.
- Isimail MH and Junusi R, 2009. Determining and mapping soil nutrient content using geostatistical technique in a Durian orchard in Malaysia. Journal of Agricultural Science 1(1): 86-91.
- Istok ID and Cooper RM, 1998. Geostatistics applied to groundwater pollution: global estimates. Journal of Environmental Engineering 114(4): 915-928.
- Jackson RB and Caldwell MM. 1993. Geostatistical patterns of soil heterogeneity around individual perennial plants. Journal of Ecology 8: 683-692.
- Karczmarczyk G and Renman A, 2011. Phosphorus accumulation pattern in a subsurface constructed wetland treating residential wastewater. Water 3: 146-156.
- Knotters M , Brus DJ and Oude Voshaar JH, 1995. A comparison of kriging, co-kriging combined with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations. Geoderma 67: 227-246.
- Lloyd PM and Atkinson CD, 2004. Increased accuracy of geostatistical prediction of nitrogen dioxide in the United Kingdom with secondary data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 5: 293-305.
- Olsen SR, Cole CV, Watanabe FS and Dean LA, 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. US Department of Agriculture. Washington DC, Circular.
- Pang S, Li TX, Wang YD, Yu HY and Li X, 2009. Spatial interpolation and sample size optimization for soil copper (Cu) investigation in cropland soil at county scale using cokriging. Agricultural Sciences in China 8(11): 1369-1377.
- Ruppert D, 1996. Local polynomial regression and its applications in environmental statistics. School of Operations Research and Industrial Engineering, Cornell University, New York.
- Shi J, Wang H, Xu J, Wu J, Liu X, Zhu H, and Yu Ch. 2007. Spatial distribution of heavy metals in soils: a case study of Changxing, China. Environment Geology 52:1-10.
- Sokouti Oskooei R and Mahdian MH, 2011. Spatial variability of macronutrient for soil fertilization management: A case study on Urmia plain. International Journal of Soil Science 6: 49-59.
- Triantafyllis J, Odeh IOA and Bratney Mc, 2001. Five geostatistical methods to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. Soil Science Society of America Journal 65: 869-878.
- Uyan M and Cay T, 2010. Geostatistical method for mapping groundwater nitrate concentrations. Pp 1-7. Proceedings of the 3th International Conference on Cartography and GIS. Nessebar, Bulgaria.

- Webster R and Oliver MA, 2000. Geostatistics for Environmental Scientists. Wiley Press. 271p.
- Wilding LP, 1985. Spatial variability: Its documentation, accommodation, and implication to soil survey. Pp. 166-194. In: Nielsen DR, and Bouma J (eds.). Soil Spatial Variability, Wageningen, the Netherlands.

Archive of SID