نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۷ شماره ۳ صفحه‌های ۶۵ تا ۷۸ / سال ۱۳۹۶

تغییرپذیری مکانی عملکرد دانه گندم و ویژگی‌های خاک در کشت‌زارهای دیم منطقه نیمه‌خشک در جنوب استان زنجان

علی‌رضا واعظی[۱]، فاطمه بابائی[۲*]، مهدی طاهری[۳]، محمّد عباسی[۴]

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۵

۱- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲- دانشجوی دکتری علوم خاک، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۳- استادیار مرکز پژوهش‌های کشاورزی زنجان، زنجان

۴- کارشناس مرکز پژوهش‌های کشاورزی زنجان، زنجان

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: fbabaei_a@yahoo.com

چکیده

به‌منظور پهنه‌بندی عملکرد دانه گندم، روش‌های کریجینگ معمولی، کوکریجینگ و رگرسیون-کریجینگ مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور ۲۹۸ کشتزار دیم گندم با فواصل ۰/۵۹ کیلومتر از هم در شهرستان خدابنده واقع در جنوب استان زنجان در سال ۱۳۹۳ انتخاب شد. عملکرد دانه گندم دیم در کشت‌زارها با استفاده از پلات مربعی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. از هر کشتزار دو نمونه خاک سطحی جمع‌آوری شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل شن، سیلت و رس، رطوبت گل اشباع، ماده آلی، واکنش خاک، هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل، ازت کل، فسفر قابل دسترس و پتاسیم قابل دسترس خاک در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. داده های خاک برای ارزیابی مدل‌های زمین آماری و بررسی نقش ویژگی‌های خاک در تعیین عملکرد دانه گندم در کشتزارها به‌کار رفتند. از بین کل داده‌های مورد بررسی، ۲۳۸ داده برای ارائه مدل‌های زمین‌آماری و ۶۰ داده برای ارزیابی مدل‌های مذکور مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که روش کوکریجینگ عملکرد گندم دیم را در نقاط جدید با دقت بیش‌تری (R^2= ۰/۷۴، RMSE=۱۱۸/۹۵) نسبت به دو روش کریجینگ معمولی (R^2= ۰/۷۴، RMSE=۱۲۷/۸۷) و رگرسیون- کریجینگ (R^2= ۰/۲۶، RMSE=۱۹۸/۸۴) برآورد می‌کند. ازت کل خاک به عنوان یک متغیر کمکی در روش کوکریجینگ برای تعیین تغییرات مکانی عملکرد دانه گندم بکار رفت. به‌طور کلی این پژوهش نشان داد با آگاهی از تغییرات مکانی ازت کل خاک می‌توان تغییرات مکانی عملکرد گندم را کمی نمود و آن را به‌صورت نقشه زمین‌آماری برای اهداف مدیریتی به کار گرفت.

واژه‌های کلیدی: تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، رگرسیون-کریجینگ، کریجینگ، کوکریجینگ

Spatial Variability of Wheat Grain Yield and Soil Properties in Semi-Arid Rainfed Croplands in South of Zanjan Province

AR Vaezi[1], F Babaei[2*], M Taheri[3], M Abbasi[4]

Received: 15 June 2016 Accepted: 05 March 2017
1 Assoc. Prof., Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran
2 Ph.D. Student, Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Iran
3 Assis. Prof., Zanjan Agricultural Research Center, Zanjan, Iran
4 Senior Expert of Zanjan Agricultural Research Center, Zanjan, Iran
*Corresponding Author, Email: fbabaei_a@yahoo.com

Abstract

For zoning of wheat grain yield, simple kriging, cokriging and regression- kriging methods were evaluated. For this purpose, in 2014, 298 rainfed wheat fields with distances of 0.59 km from each other were selected at the Khodabandeh county located in the south of Zanjan province. Wheat grain yield of the rainfed lands was measured using the quadrant plots in the field. Soil samples were collected from the surface soil (0-30 cm) of the fields at two replicates. Physical and chemical properties of soil including sand, silt, clay, moisture, organic matter, pH, EC, calcium carbonate equivalent, total nitrogen, available phosphorus and plant-available potassium were measured. Soil data were used to assess the geostatistical models and evaluate the soil characteristics roles on wheat grain yield over the fields. Out of total data, 238 data were used to develop geostatistical models and 60 data were applied to test the models. Results showed that cokriging estimated wheat grain yield in new locations more accurate (R^2= 0.74, RMSE= 118.95) than the simple kriging (R^2= 0.74, RMSE= 127.87) and regression- kriging (R^2= 0.26, RMSE= 198.84). Soil total nitrogen was used as auxiliary variable in cokriging method to determine the spatial variation of wheat grain yield. In addition, according to the results by understanding the spatial variation of the soil total nitrogen spatial grain yield variation can be quantified and used as geostatistical map for management scopes.

Keywords: Cokriging, Kriging, Principal component analysis, Regression-Kriging

مقدمه

تجزیه و تحلیل تغییرپذیری عملکرد محصول، یکی از مهم‌ترین بحث‌ها در زمینه کشاورزی به ویژه از دیدگاه مدیریت ویژه مکانی[1] است. عملکرد محصول دیم نتیجه اثر متقابل بین ویژگی‌های ژنتیکی، ویژگی‌های خاک (وضعیت عناصر غذایی در خاک، رطوبت، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک)، مدیریت زمین و متغیرهای اقلیمی منطقه‌ای است (دیاکونو و همکاران ۲۰۱۲؛ لوبل و همکاران ۲۰۰۹). بنابراین تغییرات مکانی هرکدام از این

1- Site specific management

عوامل می‌تواند بر رشد محصول و عملکرد آن مؤثر باشد.

گندم از جمله محصولات کشاورزی است که در اراضی دیم مورد کشت قرار می‌گیرد. نقش ویژگی‌های خاک در عملکرد گندم در کشتزارهای دیم توسط برخی پژوهشگران در دنیا مورد بررسی قرار گرفته است و نتایجی متفاوت از میزان و چگونگی تأثیر ویژگی‌های خاک بر عملکرد محصول گزارش شده است. به‌عنوان مثال باسو و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه ای در دو سال زراعی با تجزیه واریانس اثر سطوح مختلف ازت بر عملکرد دانه گندم نشان دادند که تغییرات مکانی عملکرد دانه گندم دیم در منطقه با باران کم در منطقه با محصول متوسط به‌طور معنی‌داری تحت تاثیر ازت خاک است. بوئرنان و همکاران (۲۰۰۴) گزارش کردند که رابطه قوی بین عملکرد گندم دیم و ویژگی‌های خاک شامل میزان ماده آلی، آهک، ظرفیت تبادل کاتیونی وجود ندارد. همچنین شعبانی و همکاران (۱۳۹۱) با بررسی ویژگی‌های مختلف خاک از جمله سنگریزه، رس، کربنات کلسیم معادل، ماده آلی، اسیدیته، هدایت الکتریکی، نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر قابل دسترس توسط رگرسیون چندمتغیره، به این نتیجه دست یافتند که تنها درصد آهک بر میزان عملکرد گندم دیم تأثیر گذار بوده است. واعظی (۱۳۸۷) با بررسی رگرسیونی رابطه بین عملکرد و ویژگی‌های خاک در شهرستان هشترود نشان داد که عملکرد گندم دیم تحت تأثیر معنی‌دار درصد رس و نفوذپذیری خاک ($p<۰/۰۱$ و $R^2= ۰/۷۸$) قرار دارد. ایوبی و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از مدل‌سازی تلفیقی به روش تجزیه به مؤلفه اصلی[1]و رگرسیون گام به گام به این نتیجه رسیدند که درصد شن، پتاسیم قابل استفاده، مواد آلی و نیترژون کل بیش‌ترین تأثیر را بر عملکرد دانه گندم داشته و مدل حاصل می‌تواند ۵۶ درصد از تغییرات عملکرد دانه گندم دیم را توجیه نماید.

روش‌های زمین‌آماری طی دو دهه اخیر به‌طور گسترده برای کمی‌سازی متغیرها توسط خاکشناسان استفاده شده است. بهاتی و همکاران (۱۹۹۱) گزارش کردند که روش کریجینگ بلوکی و کوکریجینگ بلوکی با متغیر کمکی ماده آلی خاک در برآورد مکانی عملکرد دانه گندم دیم قدرتمند بودند. میناسنی و مک براتنی (۲۰۰۷) نیز در برآورد مکانی چهار ویژگی خاک شامل درصد رس، واکنش خاک، میزان روی و ازت خاک به این نتیجه دست یافتند که با توجه به ریشه مجموع مربعات انحراف[2] (RMSD) رگرسیون کریجینگ (RMSD=۰/۶۶۹-۰/۷۴۳) روشی بهتر نسبت به روش کریجینگ معمولی (RMSD=۰/۶۸۸-۰/۷۶۱) است. محمدزمانی و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از روش کریجینگ در استان گلستان گزارش کردند که عملکرد گندم دیم دارای پراکنش مکانی است.

در زمینه مدل‌سازی مکانی عملکرد گندم دیم تاکنون مطالعات اندکی، آن هم در مقیاس کوچک صورت گرفته و غالب مطالعات انجام شده در بخشی از روش‌های آماری نظیر رگرسیون خطی ساده، رگسیون چند متغیره، رگرسیون به‌همراه تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و غیره بوده و یا به استفاده از روش کریجینگ بسنده شده است. همچنین، تا کنون مطالعه‌ای که تغییرات مکانی عملکرد گندم دیم را بر اساس چندین ویژگی خاک برآورد کند، موجود نبوده است. در پژوهش حاضر سعی شده است تا حدامکان این نقص از مطالعات گذشته پوشش داده شود. از این رو هدف این مطالعه، بررسی دقیق‌تر تغییرپذیری مکانی عملکرد دانه گندم در کشتزارهای دیم در منطقه نیمه‌خشک همراه با تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خاک با استفاده از روش‌های زمین‌آماری بود. در ادامه دقت روش‌های زمین‌آماری برای بیان تغییرات مکانی عملکرد دانه گندم با استفاه از شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

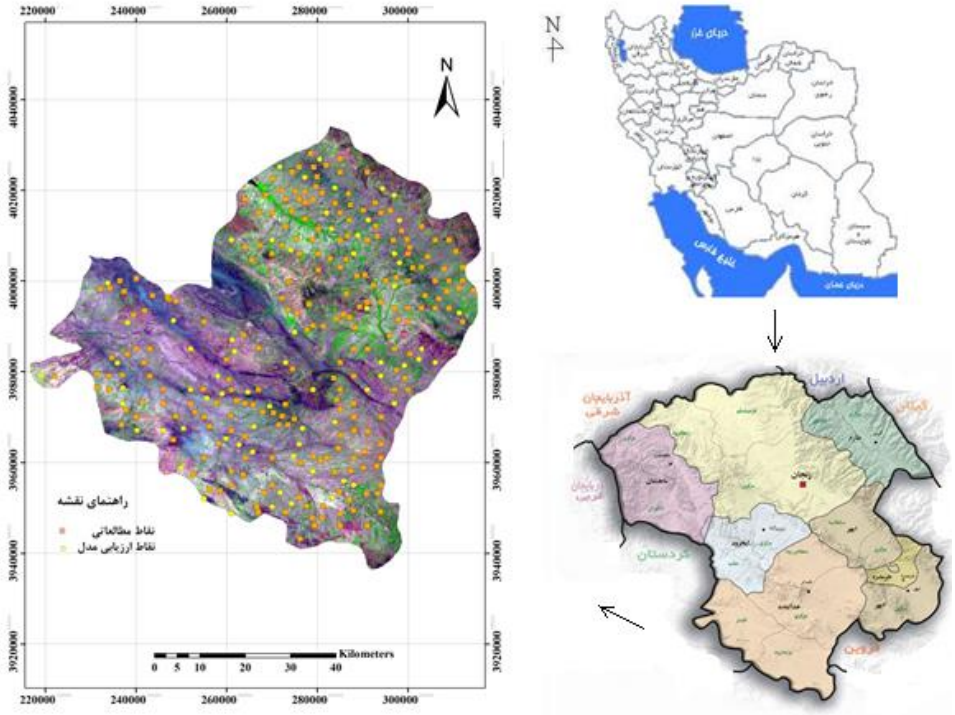
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل کشتزارهای دیم واقع در محدوده شهرستان خدابنده در جنوب استان زنجـان

1-Principal component analysis

2-Root mean square division

می‌باشد. این منطقه با میانگین بارندگی سالانه ۴۱۱ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۰/۳ درجه در متوسط ارتفاع ۲۰۵۰ متر از سطح دریای آزاد قرار دارد (بی‌نام ۱۳۹۰).



شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه‌برداری خاک و گیاه در شهرستان خدابنده در جنوب استان زنجان، شمال غرب ایران.

خاک کشتزارهای دیم عموماً دارای بافت متوسط تا سنگین بوده و از نظر شیمیایی عمدتاً به شدت آهکی (۱۰-۲۵ درصد کربنات کلسیم معادل) هستند (بی‌نام ۲۰۰۶). خاک‌ها مطابق با روش رده‌بندی آمریکایی (بی‌نام، ۲۰۱۴) ، اغلب در تحت رده اورتنتز[1] فلوونتز[2] و زرپتز[3] قرار دارند.

انتخاب کشتزارهای دیم گندم

برای بررسی تغییرات مکانی عملکرد گندم دیم با مراجعه به منطقه در سال ۱۳۹۳، در محدوده منطقه مطالعاتی ۲۹۸ کشتزار دیم گندم از سرتاسر شهرستان خدابنده در مساحتی بالغ بر ۴۸۰۰ کیلومترمربع انتخاب گردید.

مختصات جغرافیایی نقاط انتخابی با استفاده از سامانه موقعیت‌یاب جهانی[4] (GPS) در کشتزار ثبت شد. فاصله نزدیک‌ترین کشت‌زارها ۰/۵۹ کیلومتر و فاصله دورترین آن‌ها ۴/۳۹ کیلومتر بود. شبکه نمونه برداری به‌صورت منظم با ابعاد ۲/۵ کیلومتر در ۲/۵ کیلومتر طراحی شد. موقعیت تمام نقاط نمونه برداری بر روی تصویر رنگ کاذب[5] به‌دست آمده از ماهواره لندست ۸ (تاریخ ۲۸ مه ۲۰۱۴ میلادی) در شکل ۱ نمایش داده شده است.

تعیین عملکرد دانه گندم و ویژگی‌های خاک در کشتزارها

در هر کشتزار، میانگین عملکرد دانه گندم دیم در پلاتی با مساحت واحد سطح (۱ مترمربع) در سه تکرار به‌دست آمد. نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر در دو تکرار تهیه شد. در مجموع ۵۹۶ نمونه خاک برای انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل گردید. در نمونه‌های خاک، درصد شن، سیلت و رس به‌روش هیدرومتر (گی و اور ۲۰۰۲) تعیین گردید. رطوبت خاک اشباع خاک در نمونه گل

1-Orthents
2-Fluvents
3-Xerepts
4-Global Positioning System
5- False Color

اشباع (رودز ۱۹۸۲)، واکنش خاک (pH) به وسیله pH سنج در گل اشباع (مک لین ۱۹۸۲)، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع (هندریکس و همکاران ۲۰۰۲) تعیین شدند. همچنین مقدار ماده آلی (OM) به‌روش سوزاندن تر (نلسون و سامر ۱۹۸۲)، کربنات کلسیم معادل به‌روش تیتراسیون (نلسون ۱۹۸۲)، مقدار ازت کل به‌روش کجلدال (برمنر و مولوانی ۱۹۸۲)، فسفر قابل جذب به‌روش اولسن (اولسن و همکاران ۱۹۵۴) و پتاسیم قابل جذب به‌روش استات آمونیوم (توماس ۱۹۸۲) در نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شدند.

تحلیل‌های آماری

در ابتدای تحلیل، چگونگی توزیع داده‌ها توسط آزمون توزیع نرمال رایان- جوینر[1] مورد بررسی قرار گرفت (نتایج در مقاله آورده نشده است) (رایان و همکاران ۲۰۱۲). در صورت عدم تبعیت داده‌ها بسته به توزیع داده‌ها از روش‌های نرمال‌سازی همچون تبدیل لاگ نرمال و تبدیل جانسون[2] استفاده شد (الیور و وبستر، ۲۰۱۴؛ جانسون، ۱۹۴۹). درصد رس و pH خاک جزء ویژگیهایی از خاک بودند که از توزیع نرمال پیروی نکردند. از تبدیل لگاریتمی برای نرمال‌سازی این داده‌ها استفاده شد. کل داده‌های مورد بررسی، به صورت تصادفی به دو بخش شامل ۲۳۸ داده برای ارائه مدل و ۶۰ داده برای آزمون مدل (شکل ۱) (هر دو بخش در دو تکرار و در مجموع ۵۹۶ داده) تفکیک شد.

تحلیل‌های زمین‌آماری

اولین گام برای ارزیابی داده‌ها و شناخت ساختار مکانی در روش زمین‌آمار استفاده از تغییرنما[3] یا نیم‌تغییرنما[4] برای بررسی متغیر است. تغییرنما دارای اجزایی شامل اثر قطعه‌ای[5]، حد آستانه[6] و دامنه تأثیر[7] است. نیم‌تغییرنما در یک فاصله تفکیک مشخص به‌صورت معادله ۱ برآورد می‌شود:

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

که در آن، $N(h)$ تعداد زوج نمونه‌های به‌کار رفته در محاسبه تغییرنما در فاصله و جهت تفکیک h، $Z(x_i)$ و $Z(x_i+h)$ به‌ترتیب مقادیر متغیر Z در نقاط x_i و X_i+h هستند (وبستر و الیور ۲۰۰۷). درجه وابستگی مکانی یک متغیر ناحیه‌ای را می‌توان از تقسیم مقدار اثر قطعه‌ای (C_0) به واریانس کل (حد آستانه، C) به‌دست آورد، به این نسبت اثر قطعه‌ای نسبی[8] اطلاق می‌شود. اگر نسبت مزبور کم‌تر از ۲۵ درصد باشد، متغیر دارای کلاس وابستگی مکانی قوی و اگر این نسبت بین ۲۵ تا ۷۵ درصد باشد، آن‌گاه متغیر مورد نظر دارای کلاس وابستگی مکانی متوسط است. اگر این نسبت بیش‌تر از ۷۵ درصد باشد، متغیر دارای کلاس وابستگی مکانی ضعیف خواهد بود (کامباردلا و همکاران ۱۹۹۴). در محیط نرم‌افزار GS+ نسخه ۵،۱،۱، تغییرنمای تجربی برای تمام ویژگی‌های خاک و عملکرد دانه گندم با استفاده از داده‌های ۲۳۸ کشتزار دیم گندم، در سطح شهرستان خدابنده، محاسبه و مدل‌های تجربی نمایی، کروی، گوسی و خطی برازش داده شد. مدلی که دارای بیش‌ترین میزان ضریب تبیین[9] (R^2) است به عنوان بهترین مدل برای توجیه الگوی ساختار مکانی تغییرات ویژگی مورد نظر انتخاب شد.

کریجینگ

کریجینگ به عنوان بهترین تخمین‌گر نااریب خطی است که در آن مقادیر متغیر در نقاط فاقد اندازه‌گیری بر اساس میانگین‌گیری متحرک وزنی خطی[1] از مقادیر معلوم آن متغیر در نقاط دیگر برآورد می‌شود (هنگل ۲۰۱۱).

$$Z^*(x_0)=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i.Z(x_i) \quad [2]$$

که در آن، $Z^*(x_0)$ مقدار برآورد شده متغیر Z در نقطه نامعلوم x_0، $Z(x_i)$ مقدار متغیر Z در نقطه معلوم X_i، λ_i مقدار وزن نسبت داده شده به متغیر Z در نقطه معلوم xi و n تعداد کل مشاهدات می‌باشد. با

1- Ryan-Joiner
2-Johnson transformation
3- Varigoram
4- Semivariogram
5- Nugget
6- Sill
7- Range

8- Relative nugget effect
9- Determination coefficient
1 - Linear weighting moving averaging

استفاده از مدل تغییرنمای عملکرد دانه گندم دیم، پهنه-بندی عملکرد گندم دیم با استفاده از داده‌های ۲۳۸ کشتزار دیم گندم، در سطح شهرستان خدابنده، تهیه شد.

کوکریجینگ

همچنین، روش کوکریجینگ برای پیش‌بینی تغییرات مکانی عملکرد دانه گندم استفاده گردید. در این روش از یک متغیر کمکی[1] که بیش‌ترین همبستگی را با میزان متغیر اصلی دارد، استفاده می‌شود. اولین مرحله روش کوکریجینگ، تعیین و مدل نمودن ساختار تغییرات مکانی مورد نظر است. در این حالت علاوه بر تعیین تغییرنماهای متغیرهای اولیه و ثانویه به‌طور جداگانه، تغییرنما دو جانبه[2] که بیان‌گر وابستگی مکانی بین دو متغیر اولیه و کمکی است، نیز باید محاسبه و ترسیم گردد (بروق و مک دانل ۱۹۹۸). بر اساس نتایج همبستگی پیرسون، ویژگی از خاک که بیش‌ترین میزان همبستگی را با عملکرد دانه گندم دیم داشت ،به عنوان متغیر کمکی انتخاب شد. پهنه‌بندی عملکرد دانه به روش کریجینگ و کوکریجنگ با استفاده از نرم‌افزار GS^+ با تعیین تغییرنمای عملکرد دانه و متغیر کمکی و همینطور تغییرنمای دوجانبه عملکرد دانه گندم و متغیر کمکی برای ۲۳۸ نمونه به‌دست آمد.

رگرسیون- کریجینگ

رگرسیون- کریجینگ یک روش هیبریدی و تلفیقی از روش رگرسیون (عموماً رگرسیون ساده) و روش کریجینگ که امکان جداسازی برآورد روند و برآورد مکانی باقیمانده‌ها را میسر می‌سازد (هنگل و همکاران ۲۰۰۷). برای این منظور متغیرهایی که در سطح آماری ۹۵ درصد ($P<0/05$)، دارای همبستگی خطی معنی‌دار با میزان عملکرد دانه گندم بودند، انتخاب شدند. به علت وجود هم خطی بین ویژگی‌های انتخابی خاک ($|r|>0/7$)، روش تجزیه به مولفه‌های اصلی مکانی بکار گرفته شد (سیلئوس و همکاران، ۲۰۰۶). در نهایت، پنج مؤلفه اصلی انتخابی به‌عنوان ورودی‌های رگرسیون خطی چند متغیره عملکرد دانه گندم، انتخاب شدند. طبق روش هنگل و همکاران (۲۰۱۱)، نقشه‌های عملکرد حاصل از رگرسیون- کریجینگ و واریانس خطاها به‌دست آمد. در کل، از نرم‌افزارهای Minitab نسخه ۱۶، SPSS نسخه ۲۲، ILWIS نسخه 3.8.5.0، R نسخه 3.2.3 i386 و ArcMap نسخه 10.3 استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک کشتزارهای دیم

خلاصه آماری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد دانه گندم دیم در جدول ۱ آمده است. به‌طور میانگین بافت خاک منطقه مورد مطالعه لوم رسی شنی، به شدت آهکی (۲۵-۱۰ درصد آهک) (بی‌نام ۲۰۰۶) و غیر شور (در محدوده کم‌تر از ۲ دسی‌زیمنس بر متر) (بوهن و همکاران ۲۰۰۲) هستند. درجه‌بندی تغییرات ویژگی‌های خاک مطابق با روش وایلدینگ (۱۹۸۵) بیانگر این بود که واکنش خاک و رطوبت اشباع دارای تغییرپذیری کم (ضریب تغییرات کم‌تر از ۱۵ درصد)، هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل و فسفر قابل جذب دارای تغییرپذیری زیاد (ضریب تغییرات بیش از ۳۵ درصد) و سایر ویژگی‌های اندازه گیری شده و عملکرد دانه گندم دیم دارای تغییرپذیری متوسط بودند (ضریب تغییرات بین ۱۵-۳۵ درصد).

جدول ۲ ضرایب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های خاک و عملکرد دانه گندم دیم را نشان می‌دهد. عملکرد دانه گندم دیم بالاترین همبستگی معنی‌دار را به‌ترتیب با میزان ازت کل ($P<0/01$، $r=0/34$)، واکنش خاک ($P<0/01$، $r=-0/17$)، ماده آلی ($P<0/01$، $r=0/3$)، شن ($P<0/01$، $r=-0/23$)، سیلت ($P<0/01$، $r=0/24$)، رس ($P<0/01$، $r=0/15$)، کربنات کلسیم معادل ($P<0/01$، $r=-0/14$) و رطوبت اشباع ($P<0/01$، $r=-0/14$) داشت. نیتروژن خاک در گیاه موجب تولید پروتئین شده و جزء اصلی کلروفیل و فرآیند فتوسنتز است. باسو و همکاران (۲۰۱۳) نیز به اهمیت ازت در تغییرات مکانی عملکرد گندم دیم اشاره داشتند. با توجه به همبستگی بالاتر ازت کل با عملکرد دانه گندم، این متغیر خاک به عنوان پارامتر کمکی در روش کوکریجینگ برای پهنه‌بندی عملکرد دانه گندم دیم انتخاب شد.

1- Auxiliary
2- Cross variogram

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی وشیمیایی خاک کشتزارهای دیم گندم مورد بررسی در منطقه مطالعاتی خدابنده (n = ۲۹۸).

متغیر	Sand	Silt	Clay	SP	pH	EC_e	OM	CCE	N	P	K	Yield
	(٪)					($dS\ m^{-1}$)	(٪)			($mg\ kg^{-1}$)		($kg\ ha^{-1}$)
میانگین	۴۸/۸۱	۳۴/۷۶	۱۶/۴۳	۳۶/۶۶	۷/۸۸	۱/۱۰	۰/۶۳	۱۹/۷۸	۰/۰۹	۹/۱۸	۳۲۸/۸۶	۱۰۴۱/۵۰
ضریب تغییرات (٪)	۱۹/۷۴	۱۸/۳۱	۲۹/۷۴	۱۴/۰۴	۱/۲۴	۵۱/۱۶	۳۲/۶۴	۳۷/۲۸	۳۸/۳۶	۴۱/۸۶	۳۳/۶۹	۲۳/۶۳

Sand: شن، Silt: سیلت، Clay: رس، SP: رطوبت اشباع، pH: واکنش، EC_e: هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع، OM: ماده آلی، CCE کربنات کلسیم معادل، N ازت کل، P فسفر قابل جذب، K پتاسیم قابل جذب خاک و yield عملکرد دانه گندم دیم.

عملکرد با میزان pH خاک همبستگی معنی‌دار منفی نشان داد، هر چند که ضریب تغییرات pH کم بود، اما باید در نظر داشت که تغییرات اندک pH می‌تواند تغییرات زیادی را در خاک ایجاد کند به‌عنوان مثال کاهش pH به اندازه یک واحد منجر به افزایش ۱۰۰۰ برابری حلالیت آهن و ۱۰۰ برابری حلالیت روی و منگنز به‌عنوان عناصر غذایی ضروری گیاه می گردد. از این رو تغییر pH به اندازه ۰/۰۰۱ واحد باعث دو برابر شدن حلالیت آهن و تغییر آن به اندازه ۰/۰۱ واحد منجر به دو برابر شدن حلالیت روی و منگنز می‌گردد (مارشنر ۲۰۱۱). در نتیجه با اثر شگرفی که pH بر غلظت و قابلیت دسترسی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه دارد به احتمال زیاد تغییرات آن تغییرات سطح عملکرد را نیز دربرخواهد داشت.

جدول ۲- ضرایب همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد دانه گندم دیم در کشتزارهای دیم گندم شهرستان خدابنده.

	Sand	Silt	Clay	SP	pH	EC	OC	ECC	N	P	K	Yield
Sand	۱											
Silt	-۰/۸۹**	۱										
Clay	-۰/۸**	۰/۴۴**	۱									
SP	۰/۰۴	-۰/۰۴	-۰/۰۲	۱								
pH	۰/۱۲*	-۰/۱۴*	-۰/۰۸	-۰/۰	۱							
EC	-۰/۱۸**	۰/۱۶**	۰/۱۶**	-۰/۰۶	۰/۰۳	۱						
OM	-۰/۵۴**	۰/۵۰**	۰/۴۲**	۰/۰۶	-۰/۱۶**	۰/۰۸	۱					
CCE	۰/۰۳	-۰/۰۳	-۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۱۸**	۰/۰۵	-۰/۰۵	۱				
N	-۰/۵۲**	۰/۵۰**	۰/۳۸**	-۰/۰۱	-۰/۱۵*	۰/۱۰	۰/۹۱**	-۰/۰۴	۱			
P	۰/۰۲	-۰/۰۱	-۰/۰۳	۰/۱۸**	۰/۰۲	۰/۲۸**	۰/۱۸**	۰/۱۰	۰/۱۲*	۱		
K	۰/۰۶	-۰/۰۹	-۰/۰۳	۰/۴۱**	۰/۰۳	-۰/۱۰	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۶**	۱	
Yield	-۰/۲۳**	۰/۲۴**	۰/۱۵**	۰/۱۴**	-۰/۳۳**	-۰/۱۱	۰/۳۰**	-۰/۱۴*	۰/۳۴**	-۰/۱۱	-۰/۰۵	۱

معناداری در سطح احتمال ۵ درصد، معناداری در سطح احتمال ۱ درصد، Sand: شن، Silt: سیلت، Clay: رس، SP: رطوبت اشباع، pH: واکنش، EC : هدایت الکتریکی، OM: ماده آلی، CCE کربنات کلسیم معادل، N ازت کل، P فسفر قابل جذب، K پتاسیم قابل جذب خاک و Yield عملکرد دانه گندم دیم.

جدول ۳ مقادیر پارامترهای نیم تغییرنمای ویژگی‌های خاکی که با عملکرد دانه دارای همبستگی بودند و عملکرد دانه گندم دیم را در کشتزارهای دیم گندم در شهرستان خدابنده را نشان می‌دهد. مقادیر ضریب تبیین بدست آمده (۹۹/۶۳-۰/۰) نشان داد که تغییرات همه ویژگی‌های خاک از مدل نمایی پیروی می‌کردند. بر اساس شاخص اثر قطعه‌ای نسبی یا (C_0/Sill)، سیلت، واکنش و کربنات کلسیم معادل خاک دارای وابستگی مکانی قوی بودند با این وجود دامنه تاثیر این متغیرها بسیار پایین (از ۲/۱۰ تا ۴/۵۰ کیلومتر) بود. شن، رس، رطوبت اشباع، ماده آلی و ازت کل نیز وابستگی مکانی متوسط نشان دادند. ضریب تبیین مدل نمایی تغییرپذیری مکانی عملکرد گندم حدود ۰/۷۳ نشان داد که این مدل قادر است با دقت بیش‌تر

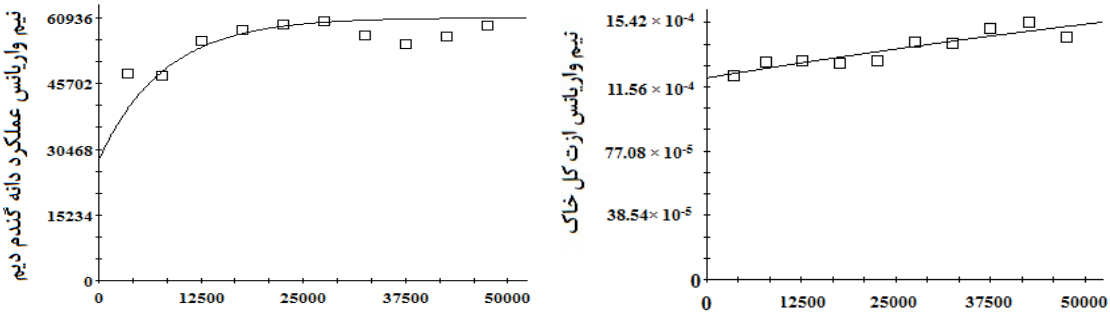
نسبت به سایر مدل‌ها الگوی تغییرات مکانی عملکرد دانه گندم دیم را توجیه نماید. به هرحال وجود شعاع تأثیر کوچک (۲۴/۰۰ کیلومتر) نشان می دهد که مدل ارائه شده تنها می‌تواند در محدوده کم‌تری برای دستیابی به نقشه تغییرات مکانی سودمند واقع گردد. همچنین، اثر قطعه‌ای نسبی برابر ۰/۴۶ نشان که این متغیر دارای وابستگی مکانی متوسطی است که این یافته با توجه به ویژگی‌های مؤثر بر عملکرد دانه گندم دیم به‌نظر صحیح می‌رسد. دامنه تأثیر نیم تغییرنمای ویژگی‌های خاک و عملکرد گندم دیم که برابر ۲۴/۰۰ کیلومتر بود، نشان داد که فواصل نمونه‌برداری برای بررسی ساختار تغییرات مکانی این متغیر کافی بوده است.

جدول ۳-- پارامترهای تغییرنمای ویژگی‌های خاک مورد اندازه‌گیری عملکرد دانه گندم دیم در کشتزارهای دیم گندم در شهرستان خدابنده.

پارامتر	مدل	اثر قطعه‌ای	آستانه	اثر قطعه‌ای نسبی	دامنه تأثیر	R^2
شن	نمایی	۴۱/۰۰	۹۱/۰۰	۰/۴۵	۳/۳۰	۰/۶۳
سیلت	نمایی	۰/۰۰	۴۰/۱۰	۰/۰۰	۴/۵۰	۰/۹۸
رس	نمایی	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۵۲	۴/۵۶	۰/۶۵
رطوبت اشباع	نمایی	۱۷/۷۴	۳۵/۴۹	۰/۵۰	۲۹/۶۰	۰/۹۰
واکنش	نمایی	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۰	۲/۱۰	۰/۹۰
ماده آلی	نمایی	۰/۰۵۹	۰/۱۳	۰/۴۵	۷/۵۰	۰/۸۰
کربنات کلسیم معادل	نمایی	۱۱/۰۰	۵۵/۸۰	۰/۲۰	۲/۱۰	۰/۸۰
ازت کل	نمایی	۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۵۰	۸۰/۰۰	۰/۸۴
عملکرد دانه گندم دیم	نمایی	۲۸۰۰۰	۶۱۰۰۰	۰/۴۶	۲۴/۰۰	۰/۷۳۲

R^2 و **RSS** به‌ترتیب ضریب تبیین و مجموع مربعات باقی‌مانده برای مدل واریوگرام هستند.

شکل ۲الف نیز مدل نمایی برازش یافته بر نیم تغییرنمای عملکرد دانه گندم دیم را نشان می‌دهد که در فواصل کوتاه دارای شیب تند بوده و سپس به صورت غیر خطی و به تدریج از شیب آن کاسته میشود. این نتیجه با مطالعه محمد زمانی و همکاران (۱۳۸۶) مغایرت نشان داد. این محققان بیان کردند که مدل کروی به عنوان مناسب‌ترین مدل تبیین‌کننده تغییرات مکانی عملکرد دانه گندم دیم در سطح مزرعه گندم می‌باشد. این تفاوت بین نتایج، می‌تواند به‌دلیل تفاوت در فواصل نمونه‌برداری و وسعت منطقه باشد چرا که کمینه فواصل نمونه‌برداری در مطالعه حاضر ۵۹۰ متر است که بسیار بیش‌تر از بیشینه ابعاد شبکه‌های طراحی شده جهت نمونه‌برداری (۲۰ متر × ۲۰ متر) در مطالعه ذکر شده است. آن‌ها وابستگی مکانی عملکرد دانه گندم دیم را قوی و اثر قطعه‌ای نسبی و دامنه تأثیر را به‌ترتیب حدود ۱۰/۱ و ۴۶/۸۲ متر گزارش کردند که با مطالعه حاضر مغایرت نشان داد. شکل ۲ ب نیز، نیم تغییرنمای ازت کل خاک را نشان می‌دهد که به‌عنوان متغیر کمکی برای برآورد عملکرد دانه گندم دیم به روش کوکریجینگ انتخاب شد. این متغیر دارای وابستگی مکانی متوسط (اثر قطعه ای نسبی برابر ۰/۵) و دامنه تأثیر ۸۰ کیلومتر است که بسیار بیش‌تر از کمینه فاصله نمونه‌برداری است و بر اساس ضریب تبیین ۰/۸۴ از مدل نمایی پیروی می‌کند.



شکل ۲- نیم تغییرنمای عملکرد دانه گندم دیم (الف) و ازت کل خاک (ب).

جدول ۴ ضرایب ویژگی‌های خاک در نه مؤلفه اصلی و درصد واریانسی که هر مؤلفه اصلی توجیه می‌کند، نشان می‌دهد. مؤلفه اصلی اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم به‌ترتیب حدود ۳۶، ۲۲، ۱۳، ۱۰ و ۶ درصد و در مجموع به‌طور تقریبی حدود ۸۷ درصد از واریانس کل را توجیه میکنند. با در نظر گرفتن سهمی از واریانس که توسط هر مؤلفه توجیه می‌شد و همینطور اهمیت متغیرها پنج مؤلفه اصلی اول انتخاب شدند.

جدول۴- ضرایب ویژگی‌های خاک در مؤلفه‌های اصلی، واریانس و درصد واریانس تجمعی توجیهی توسط مؤلفه‌های اصلی.

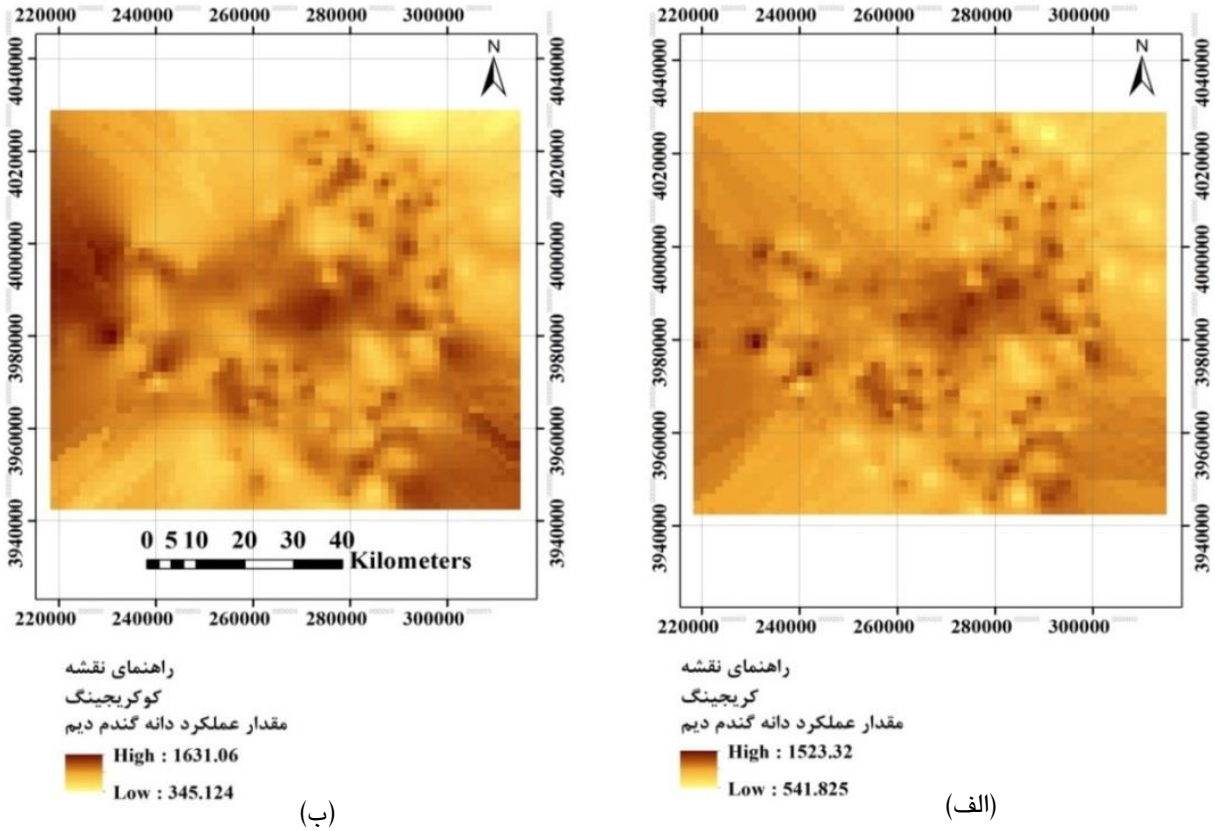
	مؤلفه اصلی							
	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم
شن	۰/۵۸	۰/۰۷	-۰/۰۷	-۰/۰۵	۰/۰۹	-۰/۲۱	-۰/۱۴	۰/۰۲
سیلت	-۰/۴۵	-۰/۰۶	۰/۱۴	-۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۵۱	۰/۰۴	۰/۴۹
رس	-۰/۵۵	-۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۲۸	-۰/۳۶	-۰/۳۵	۰/۰۵	-۰/۴۲
رطوبت گل اشباع	۰/۲۲	-۰/۵۶	۰/۱۹	۰/۳	-۰/۴۹	-۰/۱۳	-۰/۰۲	۰/۵
واکنش خاک	-۰/۰۴	-۰/۱۷	-۰/۴	۰/۷۳	۰/۳۸	۰/۲۲	-۰/۲۹	-۰/۰۴
کربنات کلسیم معادل	-۰/۲۱	-۰/۳۴	-۰/۳۹	-۰/۲۲	۰/۴۱	-۰/۵۶	۰/۳	۰/۲۷
ماده آلی	-۰/۱۴	-۰/۲۵	۰/۴۳	۰/۲۱	۰/۲۹	-۰/۲۲	-۰/۷۴	-۰/۰۶
ازت	۰/۰۸	۰/۱۳	۰/۶۶	۰/۳۸	۰/۴۴	-۰/۱۵	۰/۴۲	۰/۰۴
درصد واریانس	۳۶/۰۲	۲۱/۵۴	۱۳/۱۲	۱۰/۰۸	۶/۵۳	۵/۲۳	۳/۸۰	۳/۱۰

جدول ۵ نتایج رگرسیون خطی چندمتغیره را نشان می‌دهد. مؤلفه اصلی دوم، سوم، چهارم و پنجم دارای ضرایب معنی‌داری در معادله رگرسیونی خطی چند متغیره بودند. معادله رگرسیون خطی چند متغیره حاصل قادر به توجیه ۲۸ درصد از تغییرات عملکرد دانه گندم دیم بود ($p<۰/۰۱$). بر این اساس به‌طور کلی، مؤلفه سوم، دوم، پنجم و چهارم به‌ترتیب قادر به توجیه حدود ۱۶/۱۴، ۱۱/۳۱، ۷/۵۹ و ۷/۰۳ درصد از تغییرات عملکرد دانه گندم دیم بودند. در مؤلفه اصلی سوم که بیش‌ترین ضریب را در رگرسیون خطی چند متغیره به خود اختصاص داده بود، درصد ازت کل خاک، درصد ماده آلی و همینطور درصد کربنات کلسیم معادل بیش‌ترین سهم را داشتند. از شکل ۳ الف، ۳ ب و ۴ الف پیداست، روش کوکریجینگ محدوده بیش‌تری از عملکرد گندم دیم را با بیش‌ترین مقدار ۱۶۳۱/۰۶ تا کم‌ترین آن ۳۴۵/۱۲ کیلوگرم در هکتار، شامل می‌شود. روش رگرسیون- کریجینگ منجر به کم برآورد میزان تغییرات عملکرد دانه گندم دیم در منطقه شده است. طبق شکل ۴ ب مجموع مربعات خطای عملکرد دانه گندم دیم به روش رگرسیون-کریجینگ بین مقادیر ۴۲۴۶/۷ و ۵۳۲۸۳/۸ متغیر است که در حواشی منطقه مطالعاتی این مقادیر به بیشینه خود می‌رسد.

جدول ۵- ضرایب برآورد و خطای استاندارد مؤلفه‌های اصلی در رگرسیون خطی چندمتغیره.

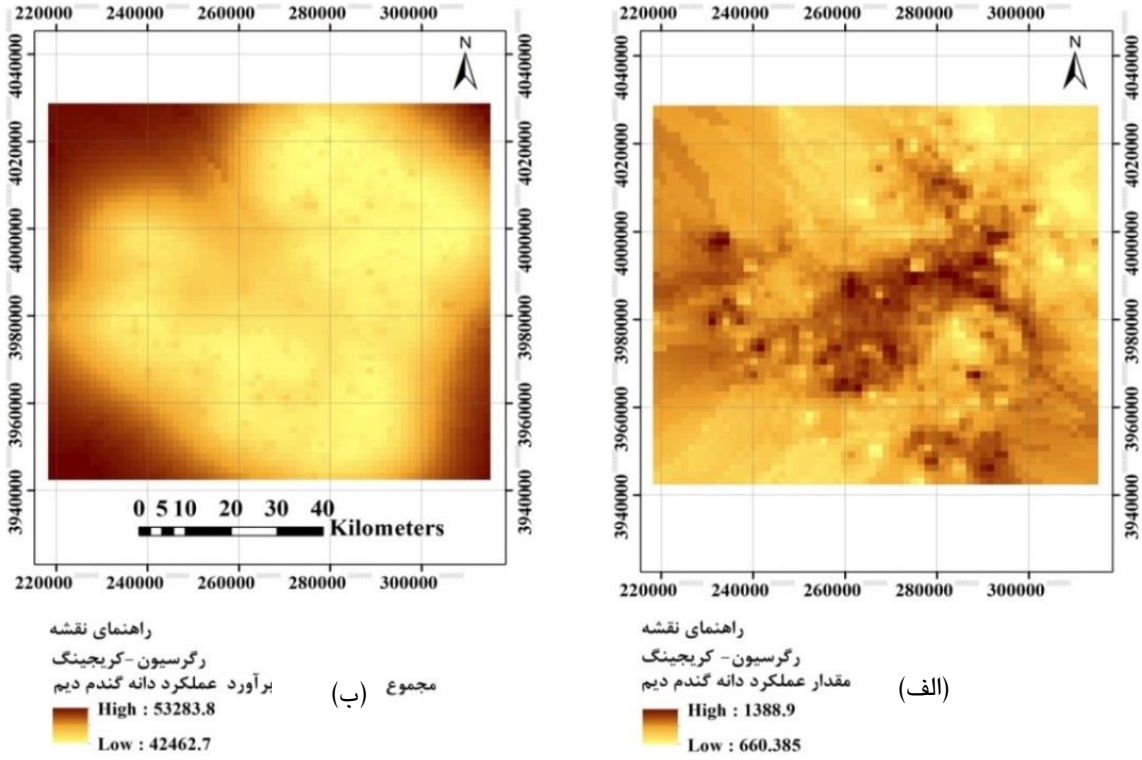
	ضریب	خطای استاندارد	t-value
ثابت	۱۱۰۵/۵۷	۵۱/۸۲	**۳۳/۲۱
مؤلفه اصلی دوم	۰/۸۲	۰/۱۵	**۵/۵۸
مؤلفه اصلی سوم	۱/۱۷	۰/۱۵	**۷/۵۸
مؤلفه اصلی چهارم	-۰/۵۱	۰/۲۱	*-۲/۴۵
مؤلفه اصلی پنجم	۰/۵۵	۰/۲۳	*۲/۳۶

**معنی داری در سطح احتمال ۹۹ درصد، * معنی داری در سطح احتمال ۹۵ درصد، مؤلفه اصلی اول معنی دار نبود و گزارش نشد.

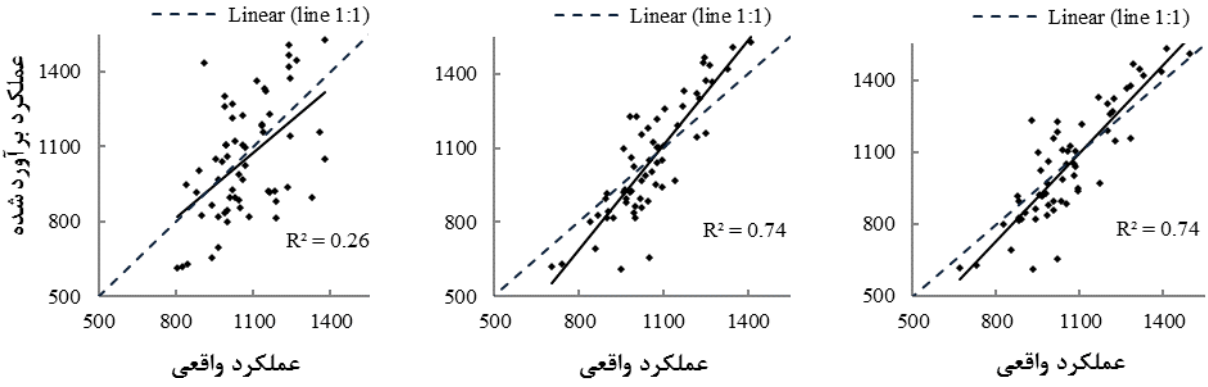


شکل ۳-نقشه پهنه بندی عملکرد دانه گندم بر اساس روش کریجینگ (الف) و کوکریجینگ (ب).

شکل ۵ نتایج آزمون روش کریجینگ و کوکریجینگ و رگرسیون-کریجینگ را نشان می‌دهد. پراکندگی بالای نقاط برآوردی در اطراف خط ۱:۱ نشان دهنده عدم توانایی روش مربوطه در برآورد دقیق عملکرد دانه گندم است. پراکندگی نقاط در شکل ۴ج بیش‌تر از دو روش دیگر است و روش دوم پراکندگی کم‌تری در اطراف خط ۱:۱ از خود نشان می‌دهد که مؤید این است که روش کوکریجینگ نسبت به دو روش دیگر منجر به خطای کم‌تری در برآورد مقادیر عملکرد دانه گندم دیم می‌گردد. طبق نتایج جدول ۶، آزمون هر سه روش با نمونه‌های مجزا (n =۶۹) نشان داد که روش کوکریجینگ با استفاده از متغیر کمکی ازت کل خاک بیش‌ترین R^2 و کم‌ترین مقدار RMSE (۱۱۸/۹۶ کیلوگرم در هکتار) را دارد و کریجینگ معمولی و رگرسیون- کریجینگ به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند. این نتیجه برخلاف یافته‌های متقیان و محمدی (۲۰۱۱) و الدیری و گارسیا (۲۰۱۰) بود که نشان دادند روش رگرسیون-کریجینگ کارآمدتر از روش کوکریجینگ می‌باشد.



شکل ۴-نقشه پهنه بندی عملکرد دانه گندم بر اساس روش رگرسیون کریجینگ (الف) و مجموع مربعات خطای برآورد عملکرد دانه گندم به روش رگرسیون کریجینگ (ب)



شکل ۵- نتایج ازمون کریجینگ (الف)، کوکریجینگ (ب) و رگرسیون-کریجینگ (ج) در برآورد عملکرد دانه گندم دیم.

از نظر لارک و همکاران (۲۰۰۶) واریوگرام رگرسیون از نظر تئوریکی دارای خطا بوده و واریوگرام اغلب در فواصل طولانی‌تر دچار خطا می‌گردد. مطابق با آن، تقی‌زاده مهرجردی و همکاران نیز (۱۳۹۳) کاربرد واریوگرام محلی به‌جای واریوگرام کلی را جهت افزایش دقت رگرسیون-کریجینگ پیشنهاد نمودند و دلیل بهبود کارایی روش رگرسیون- کریجینگ را در برآورد ویژگی مورد نظر، غلبه بر تنوع زیاد ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه دانستند. البته این روش هم فقط برای مطالعاتی که تعداد نمونه‌ها بیش از ۱۰۰۰ عدد است قابل استفاده می‌باشد (هنگل ۲۰۱۱).

جدول ۶- مقادیر پارامترهای دقت سنجی سه روش کریجینگ، کوکریجینگ و رگرسیون-کریجینگ.

روش	R^2	RMSE
کریجینگ معمولی	۰/۷۴	۱۲۷/۸۷
کوکریجینگ	۰/۷۴	۱۱۸/۹۶
رگرسیون-کریجینگ	۰/۲۶	۱۹۸/۸۴

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که میزان عملکرد دانه گندم دیم درکشت‌زارهای دیم منطقه بیش‌تر تحت تأثیر مقادیر ازت، واکنش خاک، ماده آلی، سیلت، شن، رس، رطوبت گل اشباع ($p<۰/۰۱$) و کربنات کلسیم معادل ($p<۰/۰۵$) می‌باشد. ضریب تبیین مدل نمایی و اثر قطعه‌ای نسبی نیم تغییرنمای عملکرد دانه گندم دیم مؤید وابستگی مکانی متوسط آن بود. برقراری رابطه رگرسیون خطی چند متغیره با انجام تجزیه به مؤلفه‌های اصلی نشان داد که چهار مؤلفه اصلی دوم، سوم، چهارم و پنجم به‌طور معنی‌داری قادر به توجیه ۲۸ درصد از تغییرات عملکرد دانه گندم دیم در منطقه بودند ($p<۰/۰۱$). چهار مؤلفه اصلی مذکور ترکیبی از چهار ویژگی رس، ازت و رطوبت گل اشباع بود. مطالعه حاضر برتری روش کوکریجینگ با متغیر کمکی ازت کل خاک را نسبت به روش کریجینگ و رگرسیون-کریجینگ نشان داد. طبق نتایج پژوهش حاضر با پی بردن به اهمیت میزان ازت کل خاک در برآورد عملکرد گندم دیم می‌توان به مدیریت صحیح ازت و مزارع گندم دیم در خصوص نیل به عملکرد دلخواه در مناطق مشابه با شرایط شهرستان خدابنده پرداخت. از طرفی باید این امر را در نظر داشت که روابط حاصل تنها در محدوده مقادیر عملکرد دانه مورد مطالعه و شرایط حاکم بر منطقه دارای اعتبار بوده و نمی‌توان انتظار داشت که با افزودن هر واحد از ازت در سطح مزرعه شاهد افزایش عملکرد باشیم. این امر زمانی اهمیت می‌یابد که کود ازته به‌عنوان نهاده‌ای که بیش از سایر کودها توسط زارعان گندم مورد استفاده قرار می‌گیرد، در مقادیر مازاد منجر به افزایش علف هرز، ورس، تأخیر در رسیدگی محصول و مستعد شدن برای بیماری‌ها می‌شود. از این رو می‌توان بررسی دقیق‌تر روابط مکانی بین ازت کل خاک و میزان عملکرد دانه گندم دیم را در شرایط مختلف منطقه ای برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد نمود.

منابع مورد استفاده

Anonymous, 2011. Office of planning and budget, planning assistance of Zanjan province Governor (5).

Anonymous, 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Ayoubi S, Mohammad-Zamani S and Khormali F, 2010. Wheat yield prediction through soil properties using principle component analysis. Iranian Journal of Soil and Water Research 40(1): 51-57.

Basso B, Cammarano D, Fiorentino C and Ritchie JT, 2013. Wheat yield response to spatially variable nitrogen fertilizer in Mediterranean environment. European journal of Agronomy 51: 65-70.

Bhatti A, Mulla D and Frazier B, 1991. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. Remote Sensing of Environment 37(3): 181-191.

Bohn HL, Myer RA and O'Connor GA. 2002. Soil chemistry. John Wiley & Sons, New Jersey, NJ, USA.

Bourennane H, Nicoullaud B, Couturier A and King D, 2004. Exploring the spatial relationships between some soil properties and wheat yields in two soil types. Precision Agriculture 5(5): 521-536.

Bremner JM and Mulvaney CS, 1982. Total nitrogen. Pp. 595- 624. In: A.L. Page (ed.), Methods of Soil Analysis. ASA and SSSA, Madison, WI.

Burrough PA and McDonnell RA, 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press Inc., New York.

Cambardella CA, Moorman TB, Parkin TB, Karlen DL, Novak JM, Turco RF and Konopka AE, 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal 58: 1501-1511.

Diacono M, Castrignanò A, Troccoli A, De Benedetto D, Basso B and Rubino P, 2012. Spatial and temporal variability of wheat grain yield and quality in a Mediterranean environment: A multivariate

geostatistical approach. Field Crops Research 131: 49-62.
Eldeiry AA and Garcia LA, 2010. Comparison of ordinary kriging, regression kriging, and cokriging techniques to estimate soil salinity using LANDSAT images. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 136(6): 355-364.
Anonymous. 2006. Guidelines for soil descriptions. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
Gee GW and Or D, 2002. Particle Size Analysis. Pp. 255-294. In: J. Dane, G.C. Topp (eds.), Methods of soil analysis. Soil Science Society of America, Madison, WI.
Hendrickx JMH, Das B, Corwin DL, Wraith JM and Kachanoski RG, 2002. Indirect measurement of solute concentration. Pp. 1274-1306. In: Dane JH, Topp GC (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods. Soil Science Society of America Journal. Book Series 5. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
Hengl T, 2011. A practical guide to geostatistical mapping. BPR Publishers.
Hengl T, Heuvelink GBM and Rossiter DG, 2007. About regression-kriging: From equations to case studies. Computers & Geosciences 33(10): 1301-1315.
Johnson, NL, 1949. Systems of Frequency Curves Generated by Methods of Translation. Biometrika Trust 36:1/2.p. 149-176.
Lark RM, Cullis BR and Welham SJ, 2006. On spatial prediction of soil properties in the presence of a spatial trend: the empirical best linear unbiased predictor (E-BLUP) with REML. European Journal of Soil Science. 57(6): 787-799.
Lobell DB, Cassman KG and Field CB, 2009. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. Annual Review of Environment and Resources 34(1): 179-204.
Marschner H, 2011. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic press.
McLean EO, 1982. Soil pH and lime requirement. pp. 199-224. In: A.L. Page (ed.), Methods of soil analysis. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
Minasny B and McBratney AB, 2007. Spatial prediction of soil properties using EBLUP with the Matérn covariance function. Geoderma 140(4): 324-336.
Mohammad-Zamani S, Ayoubi, S and Khormali F, 2007. Spatial variability of wheat yield and soil properties in some agricultural lands of Sorkhankalate, Golestan province. Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources 40: 79-91.
Motaghian H and Mohammadi J, 2011. Spatial estimation of saturated hydraulic conductivity from terrain attributes using regression, kriging, and artificial neural networks. Pedosphere 21(2): 170-177.
Nelson DW and Sommer LE, 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. pp. 539–579. In: A.L. Page (ed.), Methods of Soil Analysis: American Society of Agronomy, Madison.
Nelson RE, 1982. Carbonate and Gypsum. Pp. 181-196. In: A.L. Page (ed.), Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy, Madison.
Oliver MA and Webster R, 2014. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. Catena 113: 56-69.
Olsen SR, Cole CV, Watenabe FS and Dean LA. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Department of Agriculture Circular.
Rhoades JD, 1982. Soluble salts. Pp. 167-179. In: A.L. Page, R.H. Miller, D.R. Keeney (eds.), Methods of soil analysis: Part 2: Chemical and microbiological properties. ASA, Madison, WI.
Ryan B, Joiner B and Cryer J. 2012. MINITAB Handbook: Update for Release. Cengage Learning.
Shabani A, Haghnia GH, Karimi A and Ahmadi MM, 2012. Influence of Topography and soil characteristics on the rainfed wheat yield in Sisab region, Northeastern Iran,Jornal of water and soil. 26(4): 922-932.
Shahandeh H, Wright AL, Hons FM and Lascano RJ, 2005. Spatial and temporal variation of soil nitrogen parameters related to soil texture and corn yield. Agronomy Journal 97(3): 772-782.
Silleos NG, Alexandridis TK, Gitas IZ and Perakis K, 2006. Vegetation indices: advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. Geocarto International 21(4).
Taghizadeh-Mehrjardi R, Sarmadian F, Rousta MJ, Rahimian MH, Omid M and Toomanian N, 2015. Digital mapping of apparent electrical conductivity using regression kriging and local variogram in Ardakan region. Journal of soil management and sustainable production 4(4): 1-29.

Thomas GW, 1982. Exchangeable cations. Pp. 159-165. In: A.L. Page (ed.), Methods of Soil Analysis: Part 2: Chemical and microbiological properties. ASA and SSSA, Madison, WI.

Vaezi AR, 2008, Soil properties effects on wheat grain yield in some rainfed lands of Northwest Iran. 10th Iranian crop science congress. 18 -20 August. Abureyhan Campus of University of Tehran, Tehran, Iran.

Webster R and Oliver MA, 2007. Geostatistics for environmental scientist, 2nd statistics in practice. John Wiley and sons Ltd., west Sussex. 315pp.

Wilding L, 1985. Spatial variability. Its documentation, accommodation, and implication to soil surveys. Pp. 166- 194. In: D. R. Nielson and J. Bouma (Eds). Soil Variability, Pudo, Wagenigen, the Netherlands.