



نشریه تولید گیاهان زراعی
جلد نهم، شماره دوم، تابستان ۹۵
۲۱۳-۲۲۴
<http://ejcp.gau.ac.ir>



(گزارش کوتاه)

کاربرد کریجینگ و کوکریجینگ در پیش‌بینی عملکرد گندم آبی با استفاده از تجزیه به عامل‌های اصلی

* سیدعلیرضا سیدجلالی^۱، فریدون سرمدیان^۲، مهدی شرفا^۳ و زهرا محمداسماعیل^۴

^۱ استادیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب، ^۲ استاد دانشگاه تهران، ^۳ دانشیار دانشگاه تهران،

^۴ محقق مؤسسه تحقیقات خاک و آب

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۲۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱/۳۱

چکیده

سابقه و هدف: افزایش تقاضا برای مواد غذایی در سراسر جهان و منابع محدود در دسترس برای تولید، لزوم استفاده از ابزارهای جدید برای برآورد تولید محصول را می‌طلبد. شناخت عواملی که پیش‌بینی عملکرد منطقه‌ای محصول را محدود کرده و روش‌های مدیریت را بهبود بخشد، امری ضروری است. اندازه‌گیری عملکرد محصول گندم در سطح وسیع نیاز به صرف هزینه و وقت زیادی دارد. برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه یکی از راه‌ها، استفاده از روش‌های زمین آماری برای تهیه نقشه عملکرد است. هدف از این تحقیق درون‌یابی عملکرد گندم آبی با دو روش کریجینگ معمولی و کوکریجینگ به منظور انتخاب روش مناسب برای درون‌یابی عملکرد محصول است.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق از آنالیز مؤلفه‌های اصلی برای شناسایی متغیرهایی که با هم همبستگی دارند و از کریجینگ و کوکریجینگ برای تهیه نقشه عملکرد گندم در منطقه گتوند استان خوزستان استفاده گردید. بدین منظور، عملکرد محصول ۴۶ نمونه، برای پیش‌بینی محصول و ۲۱ نمونه برای آزمون پیش‌بینی انتخاب گردید. برای انتخاب متغیر کمکی از آنالیز مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. به طوری که متغیر عملکرد پیش‌بینی به روش ریشه دوم در مؤلفه دوم به عنوان متغیر کمکی در کوکریجینگ انتخاب گردید.

* مسئول مکاتبه: seyedjalali2000@yahoo.com

یافته‌ها: عملکرد پیش‌بینی شده گندم برای داده‌های پیش‌بینی شده به روش کریجینگ از ۳۰۰۲ تا ۴۵۹۳ کیلوگرم در هکتار و به روش کوکریجینگ از ۲۱۱۲ تا ۵۲۱۵ کیلوگرم در هکتار متغیر است. و برای داده‌های اندازه‌گیری شده از ۲۰۰۰ تا ۵۳۰۰ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. بر اساس نتایج ارزیابی روش‌ها برای پیش‌بینی عملکرد محصول مقادیر ریشه دوم میانگین مربع خطا، میانگین قدر مطلق خطا و معیار میانگین انحراف خطا برای روش کوکریجینگ، ۴۹۶، ۴۱۷ و ۹۱- کیلوگرم در هکتار و برای کریجینگ برابر ۸۹۶، ۷۵۴ و ۱۲۴- کیلوگرم در هکتار بود. این نتایج نشان داد کوکریجینگ نسبت به کریجینگ از دقت بالاتری برخوردار است. و همچنین نشان دهنده برآورد دقیق‌تر عملکرد محصول در کوکریجینگ نسبت به کریجینگ می‌باشد.

نتیجه‌گیری: استفاده از متغیرهای کمکی برای پیش‌بینی خصوصیات خاک و عملکرد محصولات مهم می‌باشد. در این تحقیق عملکرد مشاهده شده گندم به‌عنوان متغیر اصلی با عملکرد پیش‌بینی شده به روش ریشه دوم به‌عنوان متغیر کمکی در آنالیز مؤلفه اصلی دوم، دارای همبستگی بالایی بود. برای ارزیابی روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ از روش اعتباریابی متقاطع^۱ و معیارهای ارزیابی RMSE^۲، MAE^۳ و MBE^۴ که معرف میزان خطا و دقت می‌باشند استفاده گردید؛ هر چه میزان این معیارها پایین‌تر باشد خطا کمتر و دقت بیشتر خواهد بود. با توجه به میزان پایین‌تر مقادیر این معیارها در کوکریجینگ نسبت به کریجینگ، نقشه‌های حاصل از کوکریجینگ از دقت بالاتری برخوردار بودند. در این تحقیق نشان داده شد که روش‌های درونیابی با استفاده از متغیرهای کمکی بهتر از روش‌های درونیابی عام مثل کریجینگ معمولی است.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات اراضی، درونیابی، زمین آمار، گندم

-
- 1- Cross Validation
 - 2- Root Mean Square Error
 - 3- Mean Absolute Error
 - 4- Mean Biased Error

مقدمه

افزایش تقاضا برای مواد غذایی در سراسر جهان و منابع محدود در دسترس برای تولید، لزوم استفاده از ابزارهای جدید برای برآورد تولید محصول را می‌طلبد (۱۳). شناخت عواملی که پیش‌بینی عملکرد منطقه‌ای محصول را محدود کرده و روش‌های مدیریت را بهبود بخشد، امری ضروری است (۲). استفاده از مدل‌هایی پیش‌بینی عملکرد محصول می‌تواند عملکرد محصول را با توجه به محدودیت‌های مختلف محیطی از قبیل اقلیم، خاک، زمین‌نما و مدیریت تعیین کند. خصوصیات زمین‌نما، مانند کاربری اراضی، پستی و بلندی‌ها، و مواد مادری، برای کنترل فرآیندهای متفاوت خاک و توزیع مکانی خواص خاک از اهمیت خاصی برخوردار هستند. بنابراین، انتخاب روش درون‌یابی برای زمین‌نماهای مختلف، حتی برای خصوصیات خاک یکسان، متفاوت است (۵).

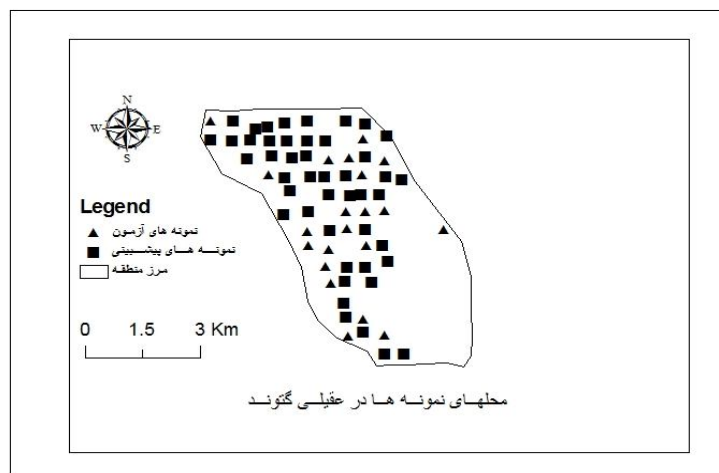
بعضی از روش‌های کریجینگ مثل کوکریجینگ و رگرسیون کریجینگ از متغیرهای کمکی استفاده می‌کنند تا دقت درون‌یابی را افزایش دهند ضمن این‌که موجب کاهش تعداد مشاهدات متغیر اصلی شده و در هزینه نمونه‌برداری صرفه‌جویی خواهد شد.

معروفی و همکاران (۲۰۱۰) در پژوهشی، با استفاده از روش‌های متفاوت زمین‌آماری مانند کریجینگ، حداقل انحاء، فاصله معکوس، همسایگی طبیعی، چندجمله‌ای موضعی و توابع پایه شعاعی، تغییرات مکانی مقادیر هدایت الکتریکی و pH آب‌های خروجی از چشمه‌ها، قنات‌ها در نواحی جنوب غربی و مرکزی دشت همدان-بهار را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که روش‌های چندجمله‌ای موضعی و فاصله معکوس به‌ترتیب بهترین الگو برای تخمین هدایت الکتریکی و pH زه آب‌های منطقه بودند. (۱۱). اشرافی و همکاران (۲۰۰۴) در تحقیقی به‌منظور بررسی ساختار مکانی علف‌های هرز از تکنیک زمین‌آماري استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که توزیع مکانی سبب بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و افزایش درک جمعیت علف‌های هرز خواهد شد (۱). سیاه‌مرگویی و همکاران (۲۰۰۷) طی تحقیقی در مزارع چغندر قند به‌منظور توصیف الگوهای تغییرات مکانی و تراکم علف‌های هرز از روش زمین‌آماري استفاده نمودند و نتیجه گرفتند که هر گونه اطلاعاتی پیرامون توزیع علف‌های هرز در مزارع می‌تواند در بهبود تصمیم‌گیری‌ها مانند، کاربرد علف‌کش، انتخاب نوع علف‌کش یا مقدار کاربرد علف‌کش، مفید واقع می‌شود هم‌چنین داشتن چنین اطلاعاتی می‌تواند در طراحی برنامه‌های کنترل علف هرز مفید باشد (۱۴). مکاریان و همکاران (۲۰۰۷) نقشه پراکنش علف‌های هرز را برای زعفران با استفاده از زمین‌آمار در منطقه بوشرویه، خراسان جنوبی تهیه نمودند

(۱۰). هدف از این مطالعه درون‌یابی عملکرد گندم آبی با دو روش کریجینگ معمولی و کوکریجینگ به منظور انتخاب روش مناسب برای درون‌یابی عملکرد محصول است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در جنوب غرب ایران، دشت عقیلی، گتوند، استان خوزستان به مساحت تقریبی ۳۵۰۰ هکتار بین عرض شمالی ۳۲ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۱۰ دقیقه و طول شرقی ۴۸ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۶ دقیقه قرار دارد. در این منطقه ۱۱۰ نقطه بررسی گردید. داده‌ها، به‌طور تصادفی به دو زیر مجموعه تقسیم شدند. پس حذف داده‌های پرت از ۷۷ نقطه مربوط به گندم آبی، ۶۷ نقطه باقی ماند که ۴۶ نقطه از داده‌ها برای پیش‌بینی عملکرد گندم آبی و ۲۱ نقطه برای آزمون و مقایسه دو روش درون‌یابی در نظر گرفته شد (شکل ۱). خصوصیات اندازه‌گیری شده خاک‌ها شامل pH، کربن آلی، آهک، ظرفیت تبادل کاتیونی، درصد رس، سیلت، ماسه، درصد سدیم قابل تبادل و عملکرد پیش‌بینی شده به روش فرمول ریشه دوم و استوری نیز محاسبه گردید (۱۵)، که خلاصه نتایج آماری آن در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- موقیت نمونه‌ها برای آزمون و پیش‌بینی عملکرد گندم آبی.

Figure 1. Location of samples for test and predicted yield of irrigated wheat.

جدول ۱- آمار توصیفی عملکرد گندم آبی و خصوصیات اراضی.

Table 1. Descriptive statistics of Irrigate wheat yield and land characteristic.

متغیر Variable	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Average	انحراف معیار Standard Deviation	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient variance	چولگی Skewness	کشدگی Kurtosis
تعداد نمونه برای پیشبینی (n=46)							
پ هاش (pH)	6.90	8.10	7.59	0.29	3.81	-0.49	-0.46
لگاریتم هدایت الکتریکی (log EC(ds.m ⁻¹))	0.19	0.95	0.43	0.14	33.04	1.19	2.83
درصد کربن آلی (OC(%))	0.11	1.20	0.72	0.23	32.14	-0.060	0.43
درصد آهک (TNV(%))	37.63	61	49.62	7.02	14.15	-0.024	-1.31
ظرفیت کاتیون‌های تبادل (CEC (cmol.kg ⁻¹))	5.80	19.8	12.98	3.42	26.32	0.31	-0.49
درصد رس (clay (%))	20.38	45.12	32.92	6.69	20.34	-0.01	-0.83
درصد سیلت (Silt (%))	41.38	56.13	47.56	3.55	7.45	0.21	-0.71
درصد شن (Sand (%))	8.10	34.13	19.51	6.78	34.75	0.61	-0.27
درصد سدیم قابل تبادل (ESP)	0.00	14	7.27	2.99	41.11	-0.79	1.44
عملکرد مشاهده شده گندم (Oby (kg.ha ⁻¹))	2000	5300	4139	826	19.96	-0.71	0.01
پتانسیل تولید اراضی ریشه دوم (clppsqm (kg.ha ⁻¹))	2502	6687	5008	1211	24.18	-0.69	-0.84
پتانسیل تولید اراضی استوری (1) (clppstm (kg.ha ⁻¹))	3045	6756	5412	1204	22.25	-0.63	-1.00
لگاریتم ارتفاع (log elevation)	1.74	1.94	1.80	0.03	1.68	2.07	10.30
تعداد نمونه‌های آزمون (n=21)							
عملکرد مشاهده شده گندم (Oby (kg.ha ⁻¹))	2200	5100	3940	819	20.79	-0.76	-0.11

آنالیز داده‌های چند متغیره: تجزیه مؤلفه‌های اصلی یک روش - آماری چند متغیره است که متغیرهایی را که با هم همبستگی دارند به صورت مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد. وقتی که متغیرها با هم همبستگی داشته باشند، تجزیه مؤلفه‌های اصلی برای کاهش داده‌های چند بعدی به تعداد کمتری از ترکیبات خطی متعامد، با خلاصه کردن منابع اصلی تغییرپذیری داده‌ها، مفید خواهد بود (۶). در انجام فرآیندهای تجزیه مؤلفه‌های اصلی، مؤلفه‌هایی که مقدار بردار ویژه آن‌ها بیشتر از یک باشد نگهداری می‌شوند؛ زیرا آن‌ها بیشترین تغییرات کل متغیرها را در خود حفظ می‌کنند (۶). و مؤلفه‌هایی که مقدار بردار ویژه آن‌ها کمتر از یک باشد حذف می‌شوند. بنابر این مؤلفه اصلی اول (PC1) بیشترین مقدار تغییرات را در کل متغیرهای اصلی نشان می‌دهد و به همین ترتیب مؤلفه‌های بعدی بیشترین تغییرات را نشان می‌دهند (۹).

از آنجا که در این تجزیه، ضرایب همبستگی پیرسون مورد استفاده در ماتریس ورودی به غیر نرمال بودن حساس هستند، ابتدا لازم است که توزیع هر متغیر اصلی بررسی شود (۱۷). در این تحقیق نرمال بودن متغیرهای مختلف با آزمون کلمو گرو- اسمیرنو (K-C) مورد آزمون قرار گرفت. نتایج نشان داد که متغیرهای شوری و ارتفاع غیر نرمال هستند بنابراین قبل از انجام آنالیز آماری، این متغیرها با استفاده از لگاریتم طبیعی تبدیل به نرمال شدند.

روش کوکریجینگ: کوکریجینگ یک روش زمین آماری اساسی و مهم است که از یک متغیر اصلی و یک متغیر ثانویه تشکیل شده که این دو متغیر با هم همبستگی داشته و از نظر مکانی به هم وابسته هستند. توابع نیم تغییر نمای متقابل^۱ در کوکریجینگ برای نشان دادن تغییرات مکانی خصیصه‌ها به کار می‌رود (۳). با یک متغیر فرعی نیم تغییر نمای متقابل کلاسیک به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma_{12}(h) = \sum_{i=1}^n \{ [z_1(x_i + h) - z_1(x_i)] [z_2(x_i + h) - z_2(x_i)] \} / 2n \quad \text{رابطه ۱}$$

در اینجا γ_{12} نیم تغییر نمای متقابل است که تابع جدایی فاصله (h) و n تعداد جفت نقاط $z_1(x_i)$ و $z_2(x_i)$ در یک فاصله گام داده شده ($h+dh$) است (۱۹). تخمین کوکریجینگ خصیصه z_1 در موقعیت x_0 توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$z_1(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_{1i} z_1(x_i) + \sum_{j=1}^n \lambda_{2j} z_2(x_j) \quad \text{رابطه ۲}$$

در اینجا λ_{1i} وزنی است که با $z_1(x_i)$ در ارتباط است، λ_{2j} وزن مربوط به $z_2(x_j)$ است و n_1 و n_2 همسایگی z_1 و z_2 می‌باشد که به ترتیب در تخمین مورد استفاده قرار می‌گیرد (۳۷). برای این که بهترین تخمین خطی ناریب (BLUE) برای توزیع مکانی بر آورده شود باید معیارهای زیر در نظر گرفته شود:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{1i} = 1 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_{2j} = 0 \quad \text{رابطه ۴}$$

معیارهای ارزیابی: برای ارزیابی صحت روش‌ها از روش اعتبارسنجی مقاطع استفاده گردید. برای تعیین میزان دقت و خطا معیارهای مختلفی برای مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده وجود دارد که در زیر چند نمونه از کاربردی‌ترین آن‌ها معرفی می‌گردد:

1- Cross covariance

الف- میانگین قدر مطلق خطا که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| z^*(x_i) - z(x_i) \right| \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن:

$Z^*(x_i)$: مقدار برآورد شده متغیر در x_i ؛ $Z(x_i)$: مقدار مشاهده‌ای متغیر در x_i ؛ n : تعداد نقاط یا متغیر مشاهده‌ای. هر چقدر MAE به صفر نزدیکتر باشد نشان دهنده دقت بیشتر روش می‌باشد. مقدار این معیار همواره مثبت است.

ب- معیار میانگین انحراف خطا

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(z^*(x_i) - z(x_i) \right) \quad \text{رابطه ۶}$$

در حقیقت اختلاف بین میانگین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی است و بیانگر انحراف از میانگین می‌باشد. این مقدار MBE می‌تواند مثبت یا منفی باشد که نشان دهنده برآورد بیش (مثبت) و یا کمتر (منفی) از میانگین داده‌ها می‌باشد. این معیار نیز هر چقدر به صفر نزدیکتر باشد نشان دهنده اختلاف کمتر مقادیر برآورد شده نسبت به مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد. در شرایطی برابر صفر باشند، مدل درونیابی متغیر موردنظر را به طور دقیق برآورد می‌کند (۱۹).

ج- ریشه دوم میانگین مربع خطا: این معیار شاخصی برای تعیین دقت اندازه‌گیری مقادیر برآورد شده است. به صورت زیر محاسبه شده و هر چقدر به صفر نزدیکتر باشد بیانگر خطای کمتر روش می‌باشد (۱۶).

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (z^*(x_i) - z(x_i))^2} \quad \text{رابطه ۷}$$

برای انجام محاسبات معیارهای ارزیابی از نرم‌افزار Excell، استفاده گردید. آنالیزهای آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS Ver. 16، Minitab Ver. 15 و برای نقشه‌های درونیابی روش‌های زمین آماری از نرم‌افزار GS⁺⁹ و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) استفاده گردید.

نتایج و بحث

آنالیز مؤلفه‌های اصلی: نتایج آنالیز مؤلفه‌های اصلی نشان داد که مقادیر ویژه سه مؤلفه اصلی ۱، ۲ و ۳ بزرگتر از یک می‌باشد (جدول ۲). درصد تغییرات مربوط به این سه مؤلفه به ترتیب ۰/۳۰، ۰/۲۴ و ۰/۲۱ درصد است که نشان می‌دهد در مجموع این سه مؤلفه بیش از ۷۶ درصد کل تغییرات و اطلاعات را به خود اختصاص داده‌اند. سایر مؤلفه‌ها نقش زیادی در تغییرات داده‌ها را به خود اختصاص ندادند. بارهای (وزن‌های) مثبت نشان می‌دهد که مشارکت متغیر با افزایش بار افزایش می‌یابد و بار منفی کاهش ابعاد بار متغیر را نشان می‌دهد (۸). برای مؤلفه اصلی اول (PC1)، سه متغیر دارای قوی‌ترین بار مثبت شامل ظرفیت کاتیون‌های قابل تبادل، رس و کربن آلی، به ترتیب دارای بار ۰/۴۷، ۰/۳۹ و ۰/۲۶ بودند. برای مؤلفه اصلی دوم (PC2) سه متغیر دارای قوی‌ترین بار مثبت، عملکرد پتانسیل تولید گندم به روش ریشه دوم، عملکرد پتانسیل گندم به روش استوری و عملکرد مشاهده شده، به ترتیب دارای بار ۰/۵۳، ۰/۵۰ و ۰/۵۰ بودند. برای مؤلفه اصلی سوم (PC3)، دو تا از متغیرهای با قوی‌ترین بار منفی، شوری و درصد سدیم قابل تبادل مشاهده شده، به ترتیب دارای بار ۰/۵۰- و ۰/۳۹- بودند. آنالیز همبستگی پیرسون نیز نشان داد که بین عملکرد مشاهده شده و مؤلفه دوم همبستگی بالایی وجود دارد. همبستگی بین عملکرد مشاهده شده و متغیر عملکرد پتانسیل گندم به روش استوری و ریشه دوم، به ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۷۶ ($p < 0.001$) محاسبه شد.

جدول ۲- مقادیر ویژه و نسبت تغییرات مؤلفه‌های اصلی.

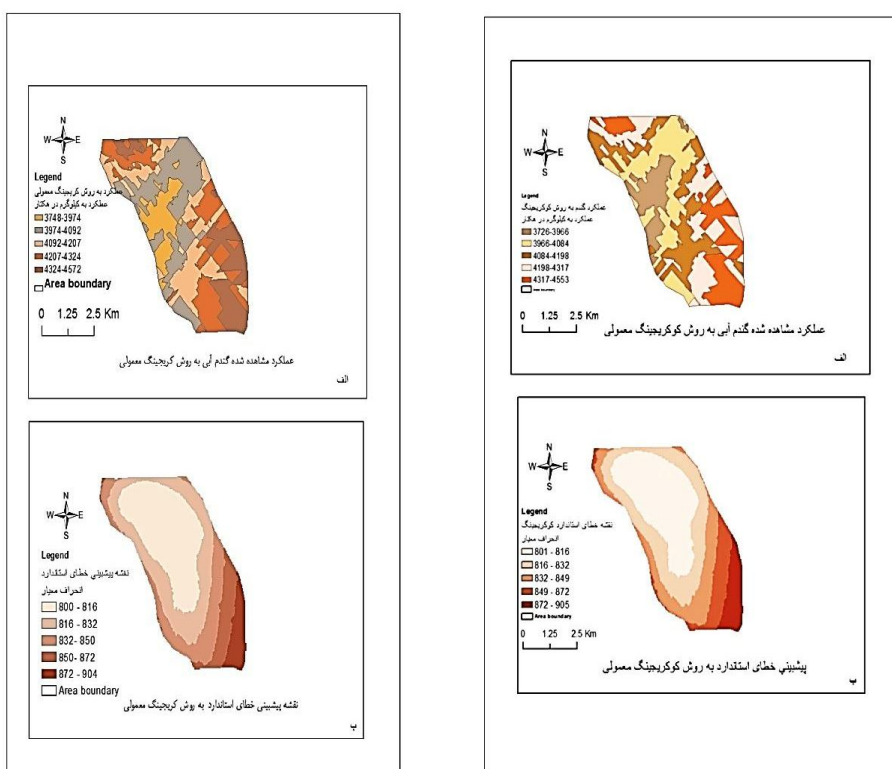
Table 2. Eigenvalues, and the proportion of variation explained by the principal components.

مؤلفه‌ها Components	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
مقادیر ویژه Eigenvalue	3.61	2.93	2.58	0.76	0.63
نسبت Proportion	0.30	0.24	0.22	0.064	0.053
تجمعی Cumulative	0.30	0.55	0.76	0.82	0.87

PC1: مؤلفه اصلی اول، PC2: مؤلفه اصلی دوم و

آنالیز زمین آماری: در این تحقیق انواع مدل به متغیر اصلی عملکرد مشاهده شده گندم آبی برآزش داده شد و از میان آن‌ها مدل کروی مناسب‌ترین مدل بود و در ضمن با توجه به ضریب تشخیص بالای بین عملکرد مشاهده شده گندم آبی و عملکرد پیش‌بینی شده به روش ریشه دوم، متغیر عملکرد پیش‌بینی شده به روش ریشه دوم به‌عنوان متغیر کمکی انتخاب گردید و مدل کروی برآزش داده شده به آن نسبت

به سایر مدل‌ها خطای پایین‌تری داشت در ضمن مدل کروی برازش داده شده به واریوگرام متقابل عملکرد مشاهده شده و متغیر کمکی نیز نسبت به سایر مدل‌ها مناسب‌تر بود. پس از برازش داده‌ها به مدل‌های مختلف، نقشه درونیابی با بهترین مدل و کمترین خطا تهیه شد و مشخص شد که نقشه درونیابی با استفاده از کوکریجینگ دارای کلاس‌های بیشتری نسبت به کریجینگ بود که نشان می‌دهد که کوکریجینگ در مجموع پیش‌بینی دقیق‌تری را نشان می‌دهد شکل (۲) مقادیر عملکرد مشاهده شده به روش کریجینگ و کوکریجینگ را نشان می‌دهد. در ضمن نقشه‌های پیش‌بینی خطای استاندارد به دو روش نشان می‌دهد که هر چه از مرکز نقاط نمونه‌برداری به سمت خارج از منطقه دور شده خطای پیش‌بینی افزایش می‌یابد، که این امری طبیعی است زیرا در جایی که نمونه‌برداری نشده به علت پایین بودن دقت درونیابی خطا افزایش می‌یابد.



شکل ۲- نقشه عملکرد مشاهده شده گندم آبی در منطقه عقیلی گتوند الف- درونیابی به روش کریجینگ و کوکریجینگ، ب- خطای استاندارد به روش کریجینگ و کوکریجینگ.

Figure 2. Map of observed yield of irrigated wheat in Aghili-Gotvand area. A. Interpolation by Kriging and Co-Kriging., B. Standard Error by Kriging and Co-Kriging.

مقایسه نتایج درون‌یابی: در این تحقیق از معیار نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه برای تقسیم‌بندی وابستگی مکانی استفاده گردید. بر اساس کامباردلا و همکاران (۱۹۹۴)، متغیری که نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه آن کمتر از ۲۵ درصد باشد دارای وابستگی مکانی قوی است. وقتی که نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه آن بین ۲۵ درصد و ۷۵ درصد باشد دارای وابستگی مکانی متوسط است. و زمانی که نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه آن بیشتر از ۷۵ درصد باشد دارای وابستگی مکانی ضعیف است (۱۸). نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه به روش کریجینگ برای عملکرد مشاهده شده برابر $0/074$ یا $7/4$ درصد است که نشان می‌دهد وابستگی مکانی قوی برای این متغیر در منطقه وجود دارد. نیم تغییر نمای عملکرد مشاهده شده دارای دامنه تأثیر ۵۰۰ متر می‌باشد که نشان‌دهنده فاصله‌ای است که در آن داده‌ها دارای وابستگی هستند. عملکرد پیش‌بینی شده برای داده‌های آزمون بر اساس کریجینگ و کوکریجینگ تا حدودی با مقدار اندازه‌گیری شده متفاوت بود. به علت اثر هموارسازی^۱، حداکثر مقادیر پیش‌بینی شده به روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ به‌طور معنی‌داری کمتر از مقدار مشاهده شده بود در حالی که حداقل مقادیر پیش‌بینی شده به روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ به‌طور معنی‌داری بیشتر از مقدار مشاهده شده بود. عملکرد پیش‌بینی شده به روش کوکریجینگ نتایج آماری مشابه‌ای با عملکرد مشاهده شده اندازه‌گیری شده داشت که این نشان می‌دهد که کوکریجینگ نسبت به کریجینگ تغییرات مکانی را بهتر توصیف می‌کند. با توجه به نتایج ارزیابی روش‌ها مقادیر MAE و RMSE برای روش کوکریجینگ کمتر از کریجینگ است که این نشان می‌دهد روش کوکریجینگ در برآورد عملکرد از دقت بالاتری برخوردار است. در ضمن نتایج داده‌های پیش‌بینی شده آزمون برای روش کریجینگ به ترتیب برابر ۶۶۲ و ۸۲۳ کیلوگرم در هکتار و برای روش کوکریجینگ برابر ۶۳۶ و ۷۹۳ کیلوگرم در هکتار است که نیز تأیید کننده دقت بالاتر روش کوکریجینگ نسبت به کریجینگ است. از طرفی نقشه کوکریجینگ نسبت به کریجینگ تعداد کلاس‌های بیشتری را نشان داد که دلالت می‌کند که استفاده از متغیر کمکی توانسته، برآورد عملکرد محصول را بهتر از کریجینگ نشان دهد. مطالعات پیشین نیز نشان داده که استفاده از متغیرهای کمکی برای پیش‌بینی خصوصیات خاک مهم می‌باشد (۲). بعضی از روش‌های کریجینگ مثل کوکریجینگ و رگرسیون کریجینگ از متغیرهای کمکی استفاده می‌کنند تا دقت درون‌یابی را افزایش دهند. ضمن این‌که موجب کاهش تعداد مشاهدات متغیر اصلی شده و

صرفه‌جویی در هزینه نمونه‌برداری خواهد شد. به‌طور کلی روش‌های درونیابی با استفاده از متغیرهای کمکی بهتر از روش‌های درونیابی عام مثل کریجینگ معمولی است (۷).

نتیجه‌گیری کلی

عملکرد مشاهده شده گندم به‌عنوان متغیر اصلی با عملکرد پیش‌بینی شده به روش ریشه دوم به‌عنوان متغیر کمکی در آنالیز مؤلفه اصلی دوم، دارای همبستگی بالایی ($r=0/84$) بود. برای ارزیابی روش‌های کریجینگ و کوکریجینگ از روش اعتباریابی متقاطع و معیارهای ارزیابی MAE، RMSE و MBE که معرف میزان خطا و دقت می‌باشند استفاده گردید هر چه میزان این معیارها پایین‌تر باشد خطا کمتر و دقت بیشتر است. با توجه به میزان پایین‌تر مقادیر این معیارها در کوکریجینگ نسبت به کریجینگ، نقشه‌های حاصل از کوکریجینگ از دقت بالاتری برخوردار بودند.

منابع

1. Ashrafi, A.M., Banayan, H., and Rashes, M.H. 2004. Spacila dynamic of weed population in corn field using geostatistics analysis. *Field Crops Res. CESC*. 2: 139-154.
2. Budong, Q., Reinder, De. J., and Samuel, G. 2009. Multivariate analysis of water-related agro-climatic factors limiting spring wheat yields on the Canadian prairies. *Eur. J. Agro.*, 30: 140-150
3. Cahn, M.D., Hummel, J.W., and Brouer, B.H. 1994. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 1240, 58: 1240-1248.
4. Cambardella, C.A., Moorman, T.B., and Novak, J.M. 1994. Field-scale variability of soil properties in center Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 1240, 58: 1501-1511.
5. Hengl, T., Heuvelink, G.B.M., and Rossiter, D.G. 2007. About regression-kriging: From equations to case studies. *Comput. Geo sci.*, 33: 1301-1315.
6. Khattree, R., and Naik, D.N. 2000. *Multivariate Data Reduction and Discrimination with SAS Software*. SAS Institute Inc., Cary, NC.
7. Kravchenko, A.N., and Robertson, G.P. 2007. Can topographical and yield data substantially improve total soil carbon mapping by regression krigging. *Agri. J.*, 99: 12-17.
8. Kumar, J.I.N., George, B., Kumar, R.N., Sajish, P.R., and Viyol, S. 2009. Assessment of spatial and temporal fluctuations in water quality of a tropical permanent estuarine system-Tapi, west coast India. *AEER*, 7: 267-276.

9. Li Y., Shi, Z., Li, F., and Li, H.Y. 2007. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. *Comput Electron Agri.*, 56: 174-186.
10. Makarian, H., Rashed Mohasel, M.H., Banayan, N., and Nassiri, M. 2005. Spacial pattern dynamic of weed population saffron (*Crocus sarivus* L.) field using statistics. *Iran. J. Agric. Res.*, 3: 46-55. (In Persian)
11. Maroofi, S., Toranjian, A., and Abiyaneh, H. 2010. Evaluation of different geostatistical methods for estimation of EC and pH of drain water of drainage network in Bahar plain of Hamadan. *J. Soil. Water conserve.*, 16 (2): 1-13. (In Persian)
12. Mouser, P.J., Rizzo, D.M., Roling, W.F.M., and Van Breukelen, B.M. 2005. A multivariate statistical approach to spatial representation of groundwater contamination using hydrochemistry and microbial community profiles. *Environ. Sci.*, 39: 7551-7559.
13. Padilla, F.L.M., Maas, S.J., Gonz, M.P., Lez-Dugo, F., Mansilla, N., Rajan, Gavil, P., and J., Donguez. 2012. Monitoring regional wheat yield in Southern Spain using the GRAMI model and satellite imagery. *Field Crop Res.*, 130: 145-154.
14. Siamargoie, A., Rashed Mahsel, M.A., Nasiri mahalati, M., Benayan aval, M., and Rahimiyan, H. 2007. Evaluation of special variability and reaction of weeds to a normal tillage in a sugarbeet farm in Mashad. *Sci. Technol. Agric. Nat. Resour.*, 10(3): 361-373.
15. Sys, C., Van Ranst, E., and Debaveye, J. 1991. *Land Evaluation, Part I and II*. GADC, Brussels.
16. Wei, S., Budiman, M., and McBratney, A. 2012. Analysis and prediction of soil properties using local regression-kriging, *Geoderma*, 171-172: 16-23.
17. White, D., Richman, M., and Yarnal, B. 1991. Climate regionalization and rotation of principal components. *Inter. J. Clima.*, 11: 1-25.
18. Wu, J., Norvell, W.A., Hopkins, D.G., Smith, D.B., Ulmer, M.G., and Welch, R.M. 2003. Improved prediction and mapping of soil copper by kriging with auxiliary data for cation-exchange capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67: 919- 927.
19. Yates, S.R., and Warrick, A.W. 1987. Estimating soil water content using cokriging. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51: 23-30.