DOI: 10.22059/ijswr.2020.292897.668404 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۵، مرداد ماه ۱۳۹۹ (ص ۱۲۳۷-۱۲۲۷)

Using Soil Properties to Estimate the Irrigated Wheat Yield in Agricultural Lands of Nazarabad Region in Alborz Province

RASOUL MIRKHANI[1*], ALIREZA VAEZI[1], HAMED REZAEI[2]
1. Department of Soil Science Engineering, Faculty of Agriculture, Univrsity of Zanjan, Zanjan, Iran.
2. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
(Received: Dec. 23, 2019- Revised: Feb. 5, 2020- Accepted: Feb. 19, 2020)

ABSTRACT

The yield of Wheat is influenced by various factors including climate, land management practices and soil properties. It is important to investigate the relations between soil physical and chemical properties and the yield of wheat. In this study, the physical and chemical properties of the soil top layer (0-30 cm) and the yield of Wheat were determined in 34 wheat fields of Nazarabad region in Alborz province, during wheat crop year of 2018. Principal Component Analysis (PCA) was used to select the effective parameters on wheat yield and multivariate linear regression was applied to analyze the relationship between wheat yield and soil properties. Finally four regression equations were presented. Principal Component Analysis (PCA), stepwise linear regression, the highest correlation method and all the measured properties were used respectively to prepare four equations to estimate the Wheat yield. The evaluation of each equation was performed by Geometric Mean Error Ratio (GMER), Geometric Standard Deviation of the Error Ratio (GSDER), Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE), and determination coefficient (R^2). The results showed that wheat yield varies from 2750 to 10500 kg/ha in the region and the proposed equation using clay, P_{ava}, Cu, porosity, calcium carbonate equivalent and pH with GMER, GSDER, NRMSE and R^2 values of 0.99, 1.19, 0.17, and 0.64 respectively, is the most appropriate equation for determining of wheat yield. Therefore, in regions with climatic conditions and soil physical and chemical properties similar to the study area, the yield of wheat can be estimated with an acceptable level, based on the proposed equation.

Keywords: Principal component analysis, Multivariate regression, Wheat yield, Nazarabad.

* Corresponding Author's Email: vaezi.alireza@gmail.com

استفاده از ویژگی‌های خاک برای برآورد عملکرد گندم آبی در کشتزارهای نظرآباد استان البرز

رسول میرخانی [۱]، علی‌رضا واعظی*[۱]، حامد رضایی [۲]

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲. موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶- تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۱/۳۰)

چکیده

عملکرد گندم تحت تأثیر عوامل مختلف از جمله اقلیم، شیوه‌های مدیریت زمین و ویژگی‌های خاک است. بررسی روابط بین عملکرد گندم و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مهم است. در این مطالعه، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) و عملکرد محصول گندم در ۳۴ مزرعه‌ی کشت گندم در اراضی زراعی شهرستان نظرآباد استان البرز در سال زراعی ۱۳۹۷ تعیین شد. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) جهت انتخاب داده‌های مؤثر بر عملکرد گندم و رگرسیون چندمتغیره خطی برای تحلیل روابط بین عملکرد گندم و ویژگی‌های خاک مورد استفاده قرار گرفت و چهار معادله رگرسیونی استخراج شد. در معادله اول، از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، در معادله دوم، از روش رگرسیون خطی به صورت گام به گام، در معادله سوم، از روش بالاترین همبستگی و در معادله چهارم، از تمام ویژگی‌های اندازه‌گیری شده استفاده شد. ارزیابی معادله‌ها با استفاده از آماره‌های میانگین هندسی نسبت خطا (GMER)، انحراف استاندارد هندسی نسبت خطا (GSDER)، جذر میانگین مربعات باقیمانده نرمال شده (NRMSE) و ضریب تبیین (R^2) انجام شد. نتایج نشان داد که عملکرد گندم در منطقه از ۲۷۵۰ تا ۱۰۵۰۰ کیلوگرم در هکتار متغیر است و معادله ارائه شده با استفاده از مقادیر رس، فسفر قابل‌استفاده، مس، تخلخل، کربنات کلسیم معادل و واکنش خاک به ترتیب با مقادیر GMER، GSDER، NRMSE و R^2 برابر ۰/۹۹، ۱/۱۹، ۰/۱۷ و ۰/۶۴، مناسب‌ترین معادله برای تعیین عملکرد گندم در منطقه تشخیص داده شد. لذا در مناطقی با شرایط اقلیمی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مشابه منطقه مورد مطالعه می‌توان بر اساس معادله پیشنهادی عملکرد گندم را در حد قابل قبول برآورد کرد.

واژه‌های کلیدی: تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، رگرسیون چندمتغیره، عملکرد گندم، نظرآباد.

مقدمه

استان البرز با میانگین بارندگی سالیانه ۳۹۵ میلی‌متر در منطقه نیمه‌خشک قرار دارد. این استان به‌دلیل داشتن شرایط اقلیمی مناسب، خاک حاصلخیز، کیفیت مطلوب آب‌های سطحی و زیرزمینی، وجود شرایط کشت دوم و سوم در برخی نقاط، یکی از استان‌های مهم کشور در تولید محصولات کشاورزی است و با دارا بودن ۰/۳ درصد از اراضی کشاورزی کشور، حدود ۱/۱ درصد از کل محصولات زراعی کشور را تولید می‌کند. این استان رتبه دوم کشوری از نظر میانگین عملکرد محصول گندم را دارد. حدود ۳۸ درصد از کل اراضی کشاورزی استان (۱۰۰۰۰ هکتار) تحت کشت گندم آبی با میانگین عملکرد ۵۷۰۰ کیلوگرم در هکتار قرار دارد.

برآورد عملکرد محصول پیش از برداشت برای ارزش‌گذاری، بازاریابی، واردات، صادرات و غیره مؤثر است. عملکرد محصولات کشاورزی از جمله گندم به عواملی مانند نوع خاک، شرایط آب و هوایی و شیوه‌های مدیریت کشاورزی وابسته است و کاهش عملکرد محصول به شرایط خاک، اقلیم، مهارت زارع، انتخاب تناوب زراعی مناسب و عملیات کوددهی بستگی دارد (Ghorbani *et al.*, 2009). درک تغییرات ویژگی‌های خاک و اثرات آن بر عملکرد، محصول بخش مهمی از سیستم مدیریت اراضی است (Ayoubi *et al.*, 2010)، لذا در ارزیابی عملکرد محصول، بررسی رابطه بین عملکرد و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مؤثر است.

پژوهش‌های متعددی در مورد برآورد عملکرد محصول انجام گرفته است. برای نمونه Majchrzak *et al.* (2001) در ایالت ایلینویز آمریکا بین عملکرد گندم و شش ویژگی خاک رابطه رگرسیونی چندگانه خطی ارائه دادند. این معادله ۷۸ درصد از تغییرات تولید گندم را توجیه کرد. Tripathi *et al.* (2006) در پژوهشی در هند با استفاده از تخلخل، جرم مخصوص ظاهری، هدایت هیدرولیکی اشباع و سرعت نفوذ عملکرد گندم را برآورد کردند (R^2=۰/۶۲). Wagner *et al.* (2007) برای پیش‌بینی عملکرد گندم در منطقه کالیفرنیا با استفاده از پنج ویژگی تراکم

* نویسنده مسئول: vaezi.alireza@gmail.com

گندم و جو دوسر، مقدار نیتروژن، علف‌کش و بارندگی، یک معادله رگرسیون چندگانه با R^2 برابر ۰/۷۱، یک مدل غیرخطی با R^2 برابر ۰/۵۶ و معادله هذلولی مضاعف با R^2 برابر ۰/۶۳ ارائه دادند. Ayoubi *et al*. (2009) در پژوهشی در یک مزرعه ۵/۶ هکتاری کشت جو در منطقه خشک استان گلستان نشان دادند که معادله رگرسیونی چندمتغیره خطی حاصل از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به ترتیب ۷۳ و ۷۸ درصد تغییرات بیوماس و عملکرد دانه را توجیه می‌کند. Ayoubi *et al*. (2010) در پژوهشی در یک مزرعه ۱/۸ هکتاری در سرخنکلاته استان گلستان نشان دادند، ویژگی‌های درصد شن و رس، فسفر و پتاسیم قابل جذب، ظرفیت تبادل کاتیونی، شوری، واکنش خاک و مواد آلی توانست ۵۷ درصد تغییرپذیری عملکرد را تعیین نماید. Rezaei and Hemati (2012) در پژوهشی در ۱۸ مزرعه گندم منطقه اراک نشان دادند، که همبستگی معنی‌داری بین عملکرد گندم و رس (r=۰/۳۱)، پتاسیم (r=۰/۳۱) ، فسفر قابل‌جذب (r=۰/۴۴)، نیتروژن کل (r=۰/۶۱) و کربن آلی (r=۰/۵۹) وجود دارد. Morovvat *et al*. (2012) در منطقه خوی در شمال غرب ایران، از میانگین عملکرد پنج ساله گندم استفاده و مدل ارائه شده را با مدل پیشنهادی فائو مقایسه کردند و نتایج نشان داد که در مناطقی با شرایط خاک و آب و هوای مشابه، مدل‌های رگرسیون ارائه شده برای پیش‌بینی عملکرد گندم می‌تواند به جای مدل‌های فائو استفاده شود.

Mirkhaniدر پژوهشی گلخانه‌ای نتایج نشان داد، که در هر دو شرایط شور و غیرشور، تراکم خاک تأثیر معنی‌داری ($p<۰/۰۱$) بر کاهش نیتروژن، فسفر قابل‌استفاده خاک و کاهش جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم، عملکرد دانه و وزن هزاردانه گندم داشت. همچنین تراکم، اثرات زیان‌آور شوری بر عملکرد دانه و اجزاء عملکرد گندم را شدیدتر کرد. Li *et al*. (2013) در شالیزارهای شهرستان یجینگ در استان جیانگشی چین با روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) حداقل مجموعه داده‌ها را تعیین و شاخص کیفیت تجمعی (IQI) را محاسبه کردند. نتایج، همبستگی معنی‌داری را بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج نشان داد ($p<۰/۰۱$). Nazmi (2013) در پژوهشی گلخانه‌ای نشان داد، که همبستگی معنی‌داری بین عملکرد گندم و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۸۷ است. Gaj *et al*. (2013) طی پژوهشی در اراضی کشاورزی لهستان با استفاده از ویژگی‌های آهن، فسفر قابل‌استفاده، منیزیم و نیتروژن خاک مقادیر پروتئین (R^2=۰/۴۶) و گلوتن (R^2=۰/۴۸) دانه گندم را برآورد کردند ($p<۰/۰۰۰$). Vaezi and Bahrami (2014) در پژوهشی نشان دادند که بین عملکرد دانه گندم و ضریب فرسایش پذیری خاک همبستگی منفی وجود دارد (R^2 =۰/۷۷). عملکرد گندم و فرسایش‌پذیری خاک هر دو با پایداری خاکدانه و نفوذپذیری خاک به ترتیب با ضریب تبیین برابر ۰/۷۴ و ۰/۹۰ ارتباط دارند. Torabian and Maghsoudi (2014) طی پژوهشی در ۱۵ رقم گندم نشان دادند که همبستگی بین وزن هزار دانه و تعداد دانه در سنبله در شرایط تنش خشکی، معنی‌دار و در شرایط بدون تنش، غیر معنی‌دار بود. در هر دو شرایط تنش خشکی و بدون تنش، همبستگی بین وزن هزار دانه و عملکرد دانه مثبت و معنی‌دار بود. Juhos *et al*. (2015) با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، رابطه بین ویژگی‌های خاک با داده‌های ۱۰ ساله عملکرد دانه گندم در شرق مجارستان نشان دادند که استفاده از مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه بیشتر از یک می‌تواند ۸۵ درصد از تغییرات ویژگی‌های خاک را بیان کند و رگرسیون خطی چندگانه با استفاده از مؤلفه اصلی همبستگی معنی‌داری ($p<۰/۰۱$) با میانگین عملکرد نسبی گندم دارد. Singh *et al*. (2017) با بررسی تغییرات کیفیت خاک‌های آبرفتی پس از ۴۰ سال استفاده از کود شیمیایی و کشت مداوم محصولات کنف، برنج و گندم نشان دادند که کاربرد کود نیتروژن، فسفر و پتاسیم طی ۲۰ سال موجب تبدیل خاک کلاس III به کلاس II و طی ۴۰ سال موجب تبدیل کلاس II به کلاس I شده است. همبستگی معنی‌داری بین کیفیت خاک و عملکرد محصول کنف (r=۰/۸۹) و عملکرد گندم (r=۰/۹۰) مشاهده شد. Tkaczyk *et al*. (2018) در پژوهشی در ۴۵ مزرعه کشاورزی واقع در جنوب شرقی لهستان طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ نشان دادند که بافت خاک (به ویژه ، مقدار سیلت و رس) و pH تأثیر مثبتی (نه همیشه معنی‌دار) بر عملکرد گندم زمستانه داشت و فسفر و پتاسیم قابل استفاده نیز تأثیر مثبتی بر عملکرد گندم زمستانه داشتند ولی این تأثیر معنی‌دار نبود.

پژوهش‌های انجام گرفته در مورد ارزیابی عملکرد محصول به‌خصوص در ایران نشان می‌دهد، که اغلب پژوهش‌ها در سطوح کوچک و مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب انجام شده است. لذا، بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر عملکرد گندم آبی در منطقه نیمه‌خشک استان البرز ضروری است. بنابراین این پژوهش به‌منظور برآورد عملکرد گندم آبی با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک انجام گرفت و تأثیر ویژگی‌های مؤثر بر عملکرد گندم آبی در منطقه نظرآباد بررسی شد.

مواد و روش‌ها

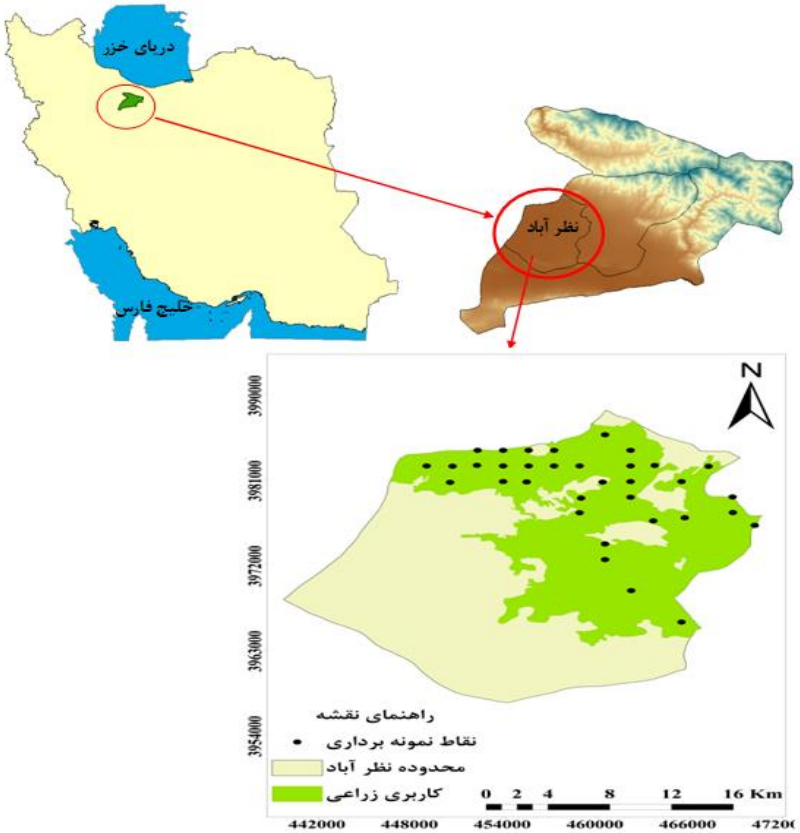
خصوصیات منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل محدوده‌ای از کشتزارهای آبی استان البرز و تحت کشت گندم و ذرت است، که در ناحیه غرب استان در شهرستان نظرآباد با وسعتی حدود ۲۶۰۰۰ هکتار در موقعیت

جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این منطقه حدود ۳۰ درصد از اراضی کشاورزی استان را شامل می‌شود. منطقه نظرآباد با میانگین بارندگی سالیانه ۲۳۸ میلیمتر و میانگین دمای سالیانه ۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد در اقلیم خشک (قسمت جنوبی منطقه) و نیمه‌خشک (قسمت شمالی منطقه) قرار دارد. منطقه نظرآباد در فصل‌های بهار، تابستان، زمستان و پاییز ۱۳۹۷، به ترتیب ۱۱۸، ۳، ۱۰۹ و ۱۳۰ میلیمتر و در مجموع ۳۶۰ میلیمتر بارندگی داشته است. حدود ۶۰ درصد منطقه دارای خاک اینسپتی‌سول (قسمت شمال منطقه) و ۴۰ درصد دارای خاک اریدی‌سول (قسمت مرکز و جنوب منطقه) هستند

نمونه برداری خاک و تجزیه آن‌ها

در این مطالعه از ۳۴ مزرعه تحت کشت گندم شهرستان نظرآباد نمونه خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری در سال زراعی ۱۳۹۷ نمونه‌برداری شد (شکل ۱) و عملکرد دانه گندم بهاره با استفاده از روش کیل‌گیری در شبکه یک متر مربعی اندازه‌گیری شد. پس از نمونه‌برداری، نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل شد و ویژگی‌های فیزیکی شامل شن، سیلت، رس به روش هیدرومتری، پایداری ساختمان خاک به روش الک تر، چگالی ظاهری به روش سیلندر، چگالی حقیقی به روش پیکنومتر، تخلخل خاک از طریق چگالی ظاهری و حقیقی، رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و رطوبت نقطه پژمردگی دائم به ترتیب به وسیله صفحات فشاری و غشای فشاری، آب قابل‌استفاده از طریق اختلاف رطوبت ظرفیت مزرعه-ای و رطوبت نقطه پژمردگی دائم، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (برای نمونه‌های با بافت متوسط) و بار افتان (برای نمونه‌های با بافت سنگین) (Aria and Mirkhani, 2005) اندازه-گیری شدند. ویژگی‌های شیمیایی شامل شوری عصاره اشباع به وسیله هدایت‌سنج، واکنش گل اشباع به وسیله پ. اچ متر، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک (Walkley and Black, 1934)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک (Page *et al*., 1982)، فسفر قابل‌استفاده به روش اولسن (Olsen *et al*., 1954) و پتاسیم قابل‌استفاده به روش استخراج با استات آمونیوم یک نرمال، سدیم محلول خاک به وسیله دستگاه فلیم فتومتر و مقدار کلسیم و منیزیم محلول با استفاده از عصاره اشباع خاک به روش کمپلکسومتری و از طریق تیتراسیون با EDTA در حضور معرف‌های اریوکروم بلاک‌تی و موروکساید (Page *et al*., 1982)، اندازه‌گیری شدند و نسبت سدیم قابل جذب (SAR) در نمونه‌های خاک محاسبه شد (Page *et al*., 1982).



شکل ۱- نقشه منطقه موردمطالعه و موقعیت نقاط نمونه‌برداری خاک در استان البرز

ارائه معادله‌های برآورد عملکرد گندم

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر عملکرد گندم، از چهار روش انتخاب داده برای ارائه معادله‌های رگرسیون خطی برآورد عملکرد گندم به شرح زیر استفاده شد:

روش ۱: به منظور کاهش حجم داده‌ها، از میان کل ویژگی-های اندازه‌گیری شده (جدول ۳)، حداقل ویژگی‌های مؤثر بر عملکرد محصول[۱] (MDS) که بیشترین تأثیر را بر عملکرد گندم منطقه دارند، با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی[۲](PCA) انتخاب شدند. در این روش، هدف کاهش تعداد متغیرها به یک مجموعه کوچک‌تر است، به‌نحوی‌که این مجموعه کوچک بیشتر تغییرات موجود در داده‌ها را توجیه کند و اطلاعات موجود در متغیرها نیز حفظ شود (Mohaghegh and Naderi, 2016). قبل از استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، جهت تعیین مناسب بودن داده‌ها برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی از ضریب KMO [۳] استفاده شد. مقدار این ضریب همواره بین صفر و یک متغیر است. در صورتیکه مقدار آن کمتر از ۰/۵ باشد، داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب نیستند و اگر بین ۰/۵ تا ۰/۶۹ باشد، با احتیاط بیشتر می‌توان از داده‌ها استفاده کرد. اگر بزرگتر از ۰/۷ باشد، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در کاهش داده‌ها مؤثر است. یکی از فرض‌های اساسی در تحلیل عاملی این است، که بین متغیرها باید همبستگی وجود داشته باشد. اگر متغیرها مستقل از یکدیگر باشند، به کارگیری مدل تحلیل عاملی مناسب نیست. آزمون کرویت بارتلت به ارزیابی همبستگی بین ویژگی‌ها می‌پردازد. اگر سطح معنی‌داری کمتر از ۵ درصد باشد، یعنی با سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام تحلیل عاملی مورد تایید است. لذا برای اطمینان از وجود همبستگی بین متغیرها از آزمون بارتلت استفاده شد (Jolliffe, 1986).

برای انتخاب حداقل ویژگی‌های مؤثر بر عملکرد محصول، ابتدا در نسخه ۲۴ نرم‌افزار SPSS، مؤلفه‌های اصلی (PC) و ارزش ویژه (EV) تعیین و همبستگی بین عملکرد و مؤلفه‌های اصلی تعیین شد و مؤلفه‌ی اصلی که با عملکرد همبستگی معنی‌داری دارد، انتخاب شدد و معیار انتخاب[۴] (SC) از رابطه ۱ به دست آمد. سپس با توجه به قدر مطلق مقدار SC، پارامترهای مناسب در مؤلفه اصلی انتخاب شدند (جدول ۳).

$$SC = \frac{0.5}{\sqrt{EV}} \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن، EV، ارزش ویژه[۵] است. **ارزش ویژه** میزان واریانس تبیین شده به وسیله هر عامل را بیان می‌کند و یکی از ضوابط پرکاربرد در تعیین تعداد عامل‌ها است. در تحلیل عاملی ارزش ویژه برابر ۱ است، یعنی در تحلیل عاملی مؤلفه‌های اصلی که ارزش ویژه آنان کمتر از ۱ است، به عنوان عامل‌هایی هستند که از نظر آماری معنی‌دار نیست و باید از تحلیل کنار گذاشته شود.

پس از انتخاب ویژگی‌های مؤثر بر عملکرد گندم شامل رس، پایداری ساختمان، چگالی ظاهری، تخلخل، واکنش، کربن آلی، کربنات کلسیم معادل، فسفر قابل استفاده، آهن و مس خاک، با استفاده از رگرسیون خطی در محیط SPSS ۲۴ معادله اول با تمام ویژگی‌های انتخابی حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ایجاد شد (جدول ۴).

روش ۲: پس از انتخاب ویژگی‌های انتخابی حاصل از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، با استفاده از رگرسیون خطی گام به گام، ویژگی‌هایی شامل رس، تخلخل ، واکنش، کربنات کلسیم معادل، فسفر قابل استفاده و مس انتخاب و معادله دوم ارائه شد.

روش ۳: همبستگی بین عملکرد گندم و ویژگی‌های اندازه-گیری شده خاک بررسی شد و ویژگی‌هایی شامل شوری، کربنات کلسیم معادل، فسفر قابل استفاده، آهن و روی که همبستگی معنی‌داری با عملکرد گندم داشتند، انتخاب و با استفاده از رگرسیون خطی، معادله سوم ارائه شد.

روش ۴: از تمام ویژگی‌های اندازه‌گیری شده استفاده شد و با روش رگرسیون خطی معادله چهارم ایجاد شد.

ارزیابی معادله‌های برآورد عملکرد گندم

روابط چهارگانه بین عملکرد گندم و ویژگی‌های مختلف خاک در ۳۴ داده عملکرد گندم و ۶۸۰ داده ویژگی‌های خاک استخراج شد. برای ارزیابی معادله‌های برآورد عملکرد گندم از آماره‌های میانگین هندسی نسبت خطا[۶] (GMER)، انحراف معیار هندسی نسبت خطا[۷] (GSDER)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده[۸] (NRMSE) و ضریب تبیین (R^2) از معادله‌های زیر استفاده شد.

$$\varepsilon = \frac{\varphi_p}{\varphi_m} \qquad \text{(رابطه ۲)}$$

$$GMER = \exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Ln\ (\varepsilon i)\right) \qquad \text{(رابطه ۳)}$$

1. Minimum Data Set
2. Principal Component Analysis
۳. Kaiser-Meyer-Olkin
۴ Selection Criterion
۵ Eigen Value
6 Geometric MeanE Ratio
7 Geometric Standard Deviation of the Error Ratio
۸ Normalized Root Mean Squared Eerror

(رابطه ۴)

$$GSDER = \exp\left(\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left[Ln\ (\varepsilon i) - Ln\,(GMER)\right]^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

(رابطه ۵)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(\varphi m - \varphi p)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\varphi m - \bar{\varphi} m)^2}$$

(رابطه ۶)

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\varphi m - \varphi p)^2}{2}}}{\bar{\varphi} m}$$

که در آنها، ε، نسبت خطا، φ_p مقادیر برآورد شده، φ_m، مقادیر اندازه‌گیری شده، $\bar{\varphi}_m$، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، n، تعداد نمونه‌ها است.

اگر مقدار GMER مساوی یک باشد، نشان‌دهنده تطبیق کامل بین مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری شده است. مقدار کوچکتر از یک، نشان‌دهنده برآوردهای کمتر[1] است و مقدار بزرگتر از یک، نشان‌دهنده برآوردهای بیشتر[2] است. بنابراین بهترین معادله، معادله‌ای است که دارای GMER نزدیک به یک و GSDER کوچک است (میرخانی و سعادت، ۱۳۸۴). مقدار آماره NRMSE کمتر از ۰/۱ ، ۰/۱ – ۰/۲، ۰/۲ – ۰/۳ و بزرگتر از ۰/۳ به ترتیب نشان دهنده برآورد دقیق، مناسب، متوسط و ضعیف است.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک کشتزارها

جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد گندم را در نمونه‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. نتایج نشان داد، که منطقه مورد مطالعه دارای محدوده وسیعی از خاک‌های شنی تا رسی است. با توجه به میانگین رس، سیلت و شن، بیشتر نمونه-ها دارای بافت لوم و لوم رسی هستند. pH خاک‌های منطقه دارای محدوده ۸/۴۷- ۷/۵۶ و میانگین حدود ۸ است. نظر به این‌که pH مطلوب برای رشد گندم ۷ است، لذا pH منطقه بالاتر از حد مطلوب برای رشد گندم است. منطقه مورد مطالعه از نظر مقدار آهن، روی، منگنز، بر، مس، پتاسیم قابل استفاده، شوری و سدیمی بودن محدودیتی برای رشد گندم ندارد. فسفر خاک‌های منطقه در محدوده ۲۷/۶- ۴/۲ و میانگین ۱۲/۵۴ است که نشان می‌دهد فسفر خاک‌های منطقه کمتر از حد بحرانی فسفر برای رشد گندم (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد و اجزای عملکرد دانه گندم در نمونه‌های اندازه‌گیری شده در کشتزارهای گندم (n=۳۴)

ویژگی‌های خاک	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	کشیدگی	چولگی
شن (٪)	۱۷/۵۰	۸۶/۰۰	۳۷/۰۰	۱۵/۹۹	۲/۲۵	۱/۳۸
سیلت (٪)	۴/۰۰	۴۸/۵۰	۳۴/۵۱	۹/۵۴	۳/۳۹	-۱/۵۶
رس (٪)	۱۰/۰۰	۴۵/۰۰	۲۸/۴۹	۸/۹۸	-۰/۶۴	۰/۰۱
چگالی ظاهری ($gr.cm^{-3}$)	۱/۳۱	۱/۷۲	۱/۴۹	۰/۱۰	-۰/۴۴	۰/۲۹
تخلخل (٪)	۳۵/۹۹	۵۲/۱۷	۴۴/۷۷	۳/۷۵	-۰/۱۸	-۰/۲۸
پایداری ساختمان خاک (cm)	۰/۰۰	۱/۶۰	۰/۷۰	۰/۳۹	۰/۱۸	۰/۴۴
آب قابل استفاده (٪)	۳/۳۰	۱۸/۱۸	۱۳/۰۲	۳/۹۰	۰/۵۷	-۰/۸۹
واکنش خاک	۷/۵۶	۸/۴۷	۸/۰۰	۰/۱۷	۱/۷۸	۰/۰۶
هدایت الکتریکی (dS/m)	۰/۷۸	۴/۳۳	۲/۰۱	۱/۰۰	۰/۱۲	۰/۹۵
کربن آلی (٪)	۰/۵۷	۱/۲۱	۰/۸۸	۰/۱۷	-۰/۶۱	۰/۰۷
کربنات کلسیم معادل (٪)	۸/۳۰	۲۹/۸۰	۱۶/۳۲	۴/۲۳	۲/۲۳	۰/۳۳
نسبت سدیم قابل تبادل	۰/۴۸	۱۱/۰۸	۲/۹۴	۲/۰۷	۶/۷۷	۲/۲۶
فسفر قابل استفاده ($mg.kg^{-1}$)	۴/۲۰	۲۷/۶	۱۲/۵۴	۶/۳	-۰/۰۷	۰/۶۸
پتاسیم قابل استفاده ($mg.kg^{-1}$)	۱۴۳	۸۱۰	۳۸۱/۳۵	۱۷۷/۶۵	-۰/۲۳	۰/۸۰
آهن ($mg.kg^{-1}$)	۱/۷۰	۹/۲۲	۵/۲۹	۲/۰۶	-۰/۹۸	۰/۱۷
مس ($mg.kg^{-1}$)	۰/۶۶	۳/۳۸	۱/۸۴	۰/۵۷	۰/۸۹	۰/۶۱
منگنز ($mg.kg^{-1}$)	۲/۵۶	۱۹/۸۸	۹/۵۸	۳/۵۸	۱/۰۷	۰/۸۱
بر ($mg.kg^{-1}$)	۰/۰۰	۷/۴۶	۲/۲۳	۱/۳۴	۶/۱۱	۱/۴۵
روی ($mg.kg^{-1}$)	۰/۳۰	۲/۶۶	۱/۰۲	۰/۶۲	۱/۰۷	۱/۳۲
عملکرد دانه گندم ($kg.ha^{-1}$)	۲۷۵۰	۱۰۵۰۰	۶۰۱۶/۲	۱۷۵۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۴۰
وزن هزار دانه (g)	۲۲/۴۵	۵۳/۰۵	۴۰/۳۳	۷/۵۰	-۰/۰۷	-۰/۶۱
وزن دانه در خوشه (g)	۱/۱۰	۲/۳۱	۱/۶۰	۰/۳۲	-۰/۰۷	۰/۴۹

تغییرات عملکرد گندم

با توجه به این‌که منطقه مورد مطالعه از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارای تغییرات مکانی زیادی است، محدوده عملکرد گندم در منطقه بین ۲۷۵۰ تا ۱۰۵۰۰ کیلوگرم در هکتار با میانگین عملکرد ۶۶۰۰ کیلوگرم در هکتار است.

1-Underestimate

2-Overestimate

تأثیر ویژگی‌های خاک بر عملکرد گندم

همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد و اجزای عملکرد گندم آبی (جدول ۲) نشان می‌دهد، که از بین ویژگی‌های خاک، فسفر قابل استفاده (r=۰/۳۵)، آهن (r=۰/۳۱)، روی (r=۰/۳۲)، شوری (r=۰/۳۷) و کربنات کلسیم معادل (r=۰/۳۰) همبستگی معنی‌داری در سطح یک درصد با عملکرد دانه گندم دارند. کمترین همبستگی عملکرد گندم با ذرات سیلت (r=۰/۰۲) و شن (r=۰/۰۵) و بیشترین همبستگی را با شوری (r=۰/۳۷) و فسفر قابل استفاده (r=۰/۳۵) دارد. وزن هزار دانه همبستگی معنی‌داری با فسفر قابل استفاده (r=۰/۴۰)، پایداری ساختمان خاکدانه (r=۰/۳۸)، بر (r=۰/۳۷)، شن (r=۰/۳۸)، رس (r=۰/۳۸) و کربنات کلسیم معادل (r=۰/۴۱) دارد. همچنین وزن دانه در خوشه همبستگی معنی‌داری با شن (r=۰/۳۶)، روی (r=۰/۴۵) و مس (r=۰/۴۳) دارند. همبستگی بین عملکرد و اجزای عملکرد نیز نشان می‌دهد، که بین عملکرد و وزن هزاردانه (r=۰/۵۷) و وزن دانه در خوشه (r=۰/۷۰) همبستگی معنی‌داری (p<۰/۰۱) وجود دارد که با نتایج Torabian and Maghsoudi (2014) مبنی بر همبستگی معنی‌دار بین وزن هزار دانه و عملکرد دانه گندم مطابقت دارد. بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده، بیشترین همبستگی بین آب قابل دسترس با ذرات شن (r=۰/۸۹)، سیلت (r=۰/۸۴)، رس (r=۰/۷۰) و کربن آلی (r=۰/۷۱) است.

جدول۲- همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد گندم در نمونه‌های اندازه‌گیری شده در کشتزارهای گندم

	Sand	Silt	Clay	Bd	F	MW	AW	pH	EC	OC	TNV	P_{ava}	K_{ava}	Fe	Zn	Cu	Mn	B	SAR	Yiel	WT	WG
Sand	۱																					
Silt	-۰/۸۷**	۱																				
Clay	-۰/۸۶**	۴۹**	۱																			
Bd	۳۵*	-۰/۳۰*	-۰/۳۰*	۱																		
F	۳۵*	-۰/۲۴	۳۶*	۹۸**	۱																	
MW	-۰/۵۴**	۴۱**	۵۳**	-۰/۰۳	-۰/۰۲	۱																
AW	-۰/۸۹**	۸۴**	۷۰**	۴۷**	۴۷**	۴۴**	۱															
pH	۳۸*	۴۷**	-۰/۱۸	۳۶*	۳۰*	۳۰*	۳۶*	۱														
EC	-۰/۲۴	۲۳	۱۹	۲۱	-۰/۱۹	۱۸	۲۴	۵۵**	۱													
OC	-۰/۵۵**	۳۴*	۶۲**	۰/۰۲	-۰/۰۴	۴۶**	۷۱**	۰/۰۰	۰/۰۵	۱												
TN	-۰/۱۹	۰/۰۲	۳۷*	۰/۰۸	-۰/۱۴	۱۲	۳۵*	۲۳	-۰/۰۴	۶۴**	۱											
P_{ava}	۳۵	۴۰*	۲۱	-۰/۱۰	۰/۰۴	۲۹*	۳۸*	-۰/۱۵	-۰/۱۳	۱۷	۱											
K_{ava}	-۰/۱۲	۰/۰۳	۲۴	۰/۱۰	-۰/۱۶	۰/۰۰	-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۰۲	-۰/۰۹	۲۷	۱										
Fe	-۰/۴۱**	۱۸	۵۴**	۱۴	-۰/۱۹	۱۳	۳۱*	۱۶	۳۷*	۳۴*	۲۶	-۰/۰۷	-۰/۰۷	۱								
Zn	۰/۰۳	-۰/۰۱	-۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۰	-۰/۰۵	۱۰	۳۳*	۱۴	۲۰	۱۰	۲۳	۳۹*	۱۵	۱							
Cu	-۰/۶۴**	۴۳**	۶۸**	۲۱	-۰/۲۱	۴۳**	۴۵**	-۰/۱۸	-۰/۰۴	۲۶	-۰/۱۱	-۰/۲۳	۱۹	۶۸**	-۰/۰۱	۱						
Mn	-۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۰	۱۳	-۰/۱۱	-۰/۰۲	-۰/۰۱	۳۲*	۲۰	-۰/۱۳	-۰/۱۳	-۰/۱۵	۰،۰	۲۳	۱۰	۲۷	۱					
B	-۰/۱۹	-۰/۰۵	۳۹*	-۰/۰۹	۰/۰۳	۱۱	۱۶	۳۱*	-۰/۲۰	۴۴**	۵۲**	-۰/۰۳	۱۷	۴۶**	-۰/۲۴	۱۹	-۰/۱۰	۱				
SAR	-۰/۰۹	۲۴	۱۰	-۰/۰۷	۰/۰۵	۱۲	-۰/۱۷	-۰/۰۶	۵۲**	-۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۱۷	-۰/۰۵	-۰/۲۳	-۰/۰۶	-۰/۱۳	۰/۰۳	-۰/۰۶	۱			
Yiel	۰/۰۵	۰/۰۲	-۰/۱۱	-۰/۱۵	-۰/۱۳	۱۶	-۰/۱۱	-۰/۲۸	۳۷*	-۰/۱۷	۳۰*	۳۵*	-۰/۱۰	۳۱*	۳۲*	-۰/۲۲	-۰/۰۵	-۰/۲۱	۲۶	۱		
WT	۳۸*	-۰/۳۰	۳۸*	-۰/۱۹	۲۳	۳۸*	-۰/۳۳	۰/۰۷	-۰/۰۴	-۰/۲۲	۴۱*	۴۰*	۰/۰۲	-۰/۲۸	۲۶	-۰/۲۵	-۰/۲۷	۳۷*	۰/۰۰	۵۷**	۱	
WG	۳۶*	-۰/۳۱	-۰/۳۳	۳۶	-۰/۱۹	-۰/۲۷	-۰/۲۲	-۰/۲۶	-۰/۰۴	۰/۲	۲۴	-۰/۳۳	-۰/۳۱	۴۳**	۴۵**	-۰/۳۱	۰/۰۰	-۰/۱۲	۱۶	۷۰**	۴۳**	۱

علائم استفاده شده در جدول (۲) عبارتند از: P_{ava}: فسفر قابل استفاده، K_{ava}: پتاسیم قابل استفاده، pH: واکنش، TNV: کربنات کلسیم معادل، Fe: آهن، Zn: روی، Cu: مس، Mn: منگنز، B: بور، EC: شوری، SAR: نسبت سدیم تبادلی، OC: کربن آلی، Silt: سیلت، Clay: رس، BD: چگالی ظاهری، F: تخلخل، AW: آب قابل دسترس، MWD: پایدار ساختمان خاک‌دانه، WTG: وزن هزار دانه، WGS: وزن دانه در خوشه و * و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح یک درصد و ۵ درصد است.

انتخاب مؤلفه‌های اصلی عملکرد گندم

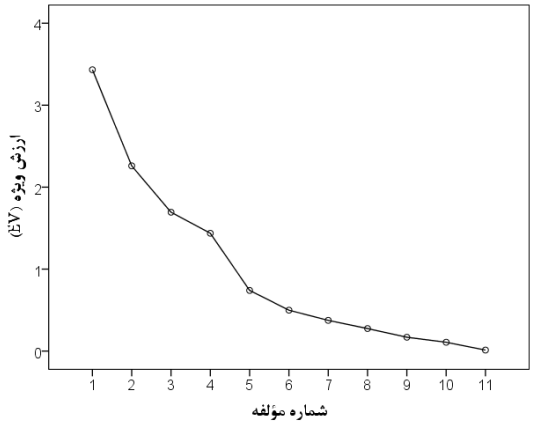
با توجه به نتایج جدول (۳)، مقادیر KMO بالاتر از ۰/۵ است و

آزمون بارتلت در سطح ۰/۱ درصد معنی‌دار است و نشان می‌دهد که داده‌ها برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی مناسب هستند.

جدول ۳- تست بارتلت و KMO

(KMO) Kaiser-Meyer-Olkin		۰/۵۸
آزمون کرویت بارتلت	آماره کای اسکوار[1]	۲۴۷/۷۵
	درجه آزادی	۵۵
	معنی‌داری	۰/۰۰۰۱

شکل (۲)، نمودار سنگریزه‌ای اجزای مؤلفه‌های اصلی و جدول (۴)، ماتریس مؤلفه‌ها، مقادیر معیار انتخاب مؤلفه‌ها (SC) و ضریب همبستگی عملکرد با مؤلفه‌ها را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج نمودار سنگریزه‌ای و جدول (۴)، چهار مؤلفه دارای مقدار ارزش ویژه (EV) بزرگ‌تر از یک هستند.



شکل ۲- نمودار سنگریزه‌ای اجزای مؤلفه‌های اصلی

جدول ۴- نتایج تجزیه به مؤلفه‌ها، مقادیر معیار انتخاب مؤلفه‌ها و ضریب همبستگی عملکرد با مؤلفه‌ها

	مؤلفه‌ها			
	۱	۲	۳	۴
ضریب همبستگی پیرسون بین عملکرد دانه گندم و ویژگی‌های خاک	-۰/۳۶*	۰/۱۴	-۰/۰۴	-۰/۱۵
ارزش ویژه (EV)	۳/۴۴	۲/۲۵	۱/۷۰	۱/۴۴
درصد تجمعی واریانس	۳۱/۲۵	۵۱/۷۲	۶۷/۱۸	۸۰/۲۵
معیار انتخاب (SC)	۰/۲۷	۰/۳۳	۰/۳۸	۰/۴۲
فسفر قابل استفاده	-۰/۳۷	-	۰/۵۱	-
مس	۰/۷۱	-	-	-۰/۵۶
واکنش	-۰/۳۸	۰/۷۲	-	-
کربنات کلسیم معادل	۰/۳۴	۰/۴۹	-	۰/۶۸
آهن	۰/۵۸	۰/۵۳	-	-۰/۴۴
درصد کربن آلی	۰/۶۲	۰/۴۵	-	۰/۴۸
پایداری ساختمان خاکدانه‌ها	۰/۶۱	-	-۰/۵۶	-
چگالی ظاهری	۰/۵۴	-۰/۵۳	۰/۶۲	-
تخلخل	-۰/۵۶	۰/۴۶	-۰/۶۷	-
رس	۰/۸۹	-	-	-
شوری	۰/۲۲	-۰/۶۳	-	۰/۴۴

با توجه به نتایج بدست آمده (جدول ۴) و بررسی ضریب همبستگی پیرسون بین عملکرد گندم و مؤلفه‌های اصلی، مؤلفه اول با ضریب همبستگی پیرسون ۰/۳۶ با معنی‌داری در سطح پنج درصد انتخاب و معیار انتخاب (SC) محاسبه شد. سپس با توجه به مقدار عددی معیار انتخاب (۰/۲۷)، ویژگی‌های مناسب شامل فسفر قابل جذب، درصد رس، شوری، کربنات کلسیم معادل، پایداری ساختمان خاکدانه‌ها، اسیدیته، کربن آلی، چگالی ظاهری، مس، آهن و تخلخل انتخاب شدند. جدول (۵)، معادله‌های رگرسیونی خطی ایجاد شده با استفاده از چهار سری ویژگی انتخاب شده را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج جدول (۵)، سه معادله اول در سطح یک درصد و معادله چهارم در سطح پنج درصد نشانگر رابطه‌ی معنی‌دار بین عملکرد گندم و ویژگی‌های خاک است. ضریب رگرسیون معادله‌های بدست‌آمده به‌ترتیب ۰/۶۳، ۰/۶۴، ۰/۴۸ و ۰/۷۸ است. با توجه به مقادیر ضریب تبیین (جدول ۵)، نتایج برآورد در معادله چهارم بهتر از دیگر معادله‌ها است، ولی به‌دلیل تعداد متغیرهای ورودی بیشتر و هزینه‌بر بودن اندازه‌گیری آن‌ها، پیشنهاد نمی‌شود. ضریب تبیین معادله سوم نیز پایین است. بین دو معادله اول، با توجه به مقادیر آماره‌های ارزیابی مشابه و نزدیک این معادله‌ها، معادله دوم، به‌دلیل تعداد پارامترهای ورودی کمتر پیشنهاد می‌شود ولی از معادله اول هم در صورت وجود اطلاعات لازم می‌توان استفاده کرد.

1. Approx. Chi-Square

جدول ۵- معادله‌های رگرسیونی ایجادشده برای برآورد عملکرد گندم آبی (کیلوگرم در هکتار)

مدل	معادله رگرسیونی *	ضریب رگرسیون (R^2)	df	ارزش P	روش
۱	۱۶۷۷۰/۹۵ + ۱۷۷/۴۲ P_{ava} – ۲۴۴۰/۰۳ Cu – ۵۲۶۰/۶۳ pH – ۲۷۷/۶۸ TNV + ۱۵۶/۴۹ Fe – ۶۹۸/۹۲ OC – ۳۸۴/۸۷ MWD + ۹۴۹۶/۶۴ Bd + ۴۱۳/۵۲ F + ۱۵۰/۸۳ Clay	۰/۶۶	۱۰	۰/۰۰۱	Enter
۲	۴۰۶۰۲/۸۷ + ۱۶۹/۰۷ P_{ava} – ۱۹۰۳/۳۰ Cu – ۴۹۴۱/۶۹ pH – ۲۳۷/۳۹ TNV + ۱۴۳/۸۲ F + ۱۳۲/۱۱ Clay	۰/۶۴	۶	۰/۰۰۰۱	Stepwise
۳	۵۵۰۱/۱۲ + ۱۱۴/۳۱ P_{ava} – ۱۴۷/۸۱ TNV – ۷۴/۷۴ Fe + ۶۲۴/۸۹ Zn + ۶۲۵/۲۹ EC	۰/۴۸	۵	۰/۰۰۲	Enter
۴	۱۹۰۸۶/۴۷ + ۲۴۳/۰۱ P_{ava} – ۱۱۴/۴۶ Mn – ۱۶۸۳/۳۶ Cu – ۵۸۶۸/۴۹ pH – ۲۷۶/۷۴ TNV + ۲۵۴/۸۷ SAR + ۲۸۱/۴۵ Fe – ۱۷۵/۱۹ Zn + ۳۲۴/۱۷ EC + ۷۵۹۷/۶۳ OC + ۲۳۵/۴۸ B – ۱/۳۷ K_{ava}– ۵۱۰/۶۶ MWD + ۱۱۷۰۲/۵۸ BD + ۲۸۱/۴۶ F + ۱۸۰/۸۵ Silt+ ۶۷/۱۳ Clay – ۵۹۱/۶۳ AW	۰/۷۸	۱۸	۰/۰۲۲	Enter

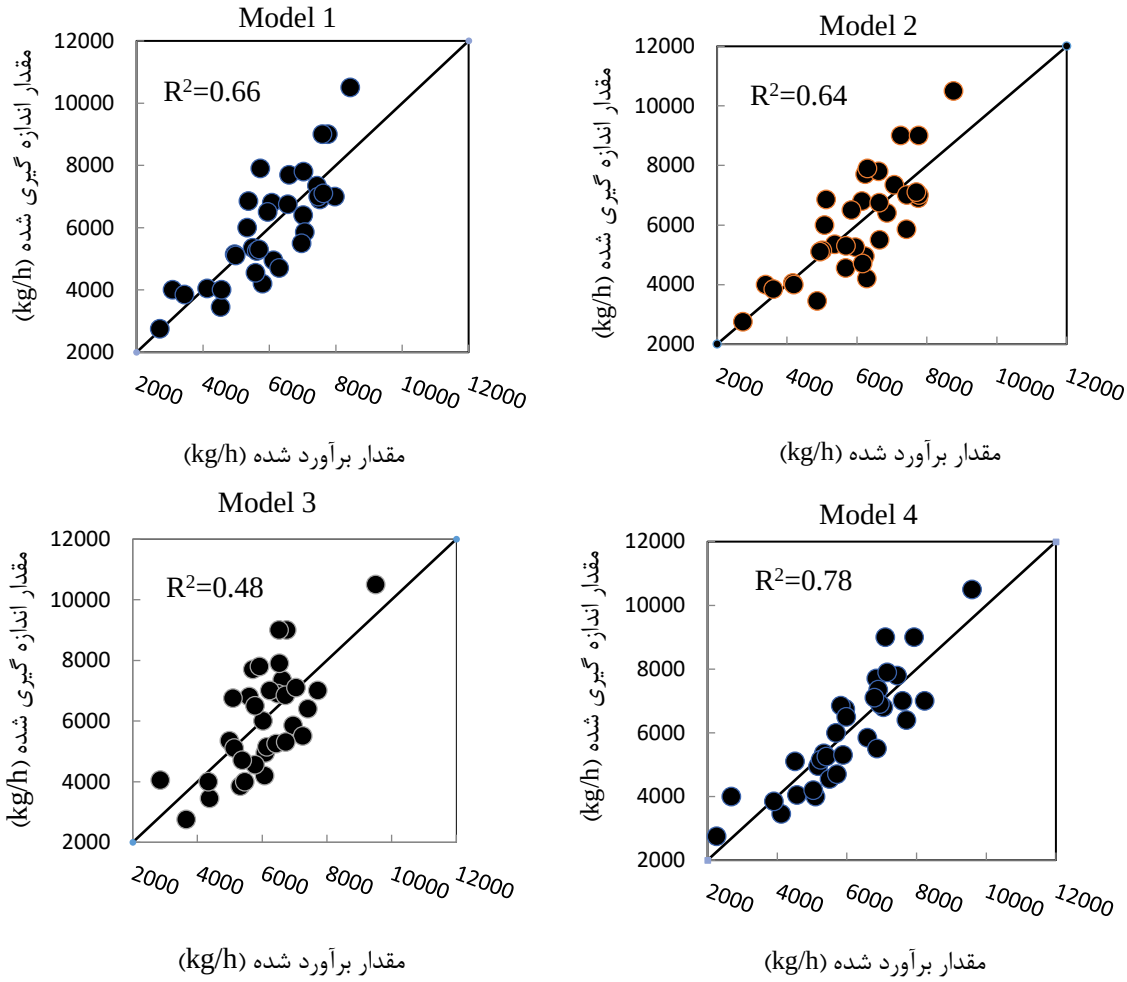
*: P_{ava}: فسفر قابل استفاده، K_{ava}: پتاسیم قابل استفاده، **pH**: واکنش، **TNV**: کربنات کلسیم معادل، **Fe**: آهن، **Zn**: روی، **Cu**: مس، **Mn**: منگنز، **B**: بور، **EC**: شوری، **SAR**: نسبت سدیم تبادلی، **OC**: کربن آلی، **Silt**: سیلت، **Clay**: رس، **BD**: چگالی ظاهری، **F**: تخلخل، **AW**: آب قابل دسترس، **MWD**: پایدار ساختمان خاک‌دانه.

در معادله پیشنهادی (معادله دوم)، رس، مس، فسفر قابل استفاده، کربنات کلسیم معادل، واکنش و تخلخل به ترتیب با ضرایب استاندارد شده‌ی ۰/۶۷۸، ۰/۶۲۴-، ۰/۶۰۹، ۰/۵۷۴-، ۰/۴۶۶- و ۰/۳۰۹ در برآورد عملکرد گندم مؤثر هستند، که درصد رس بیشترین و تخلخل کمترین ضریب را دارند. با توجه به مقادیر میانگین فسفر خاک (۱۲/۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) که کمتر از حد بحرانی فسفر برای رشد گندم (۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است، لذا فسفر بدلیل تأثیر بر رشد و پنجه‌زنی و افزایش عملکرد به عنوان ویژگی مؤثر در برآورد عملکرد گندم وارد مدل شده است. Tkaczyk *et al*. (2018) در پژوهشی در جنوب شرقی لهستان نشان دادند، که افزایش فسفر و پتاسیم موجب افزایش عملکرد دانه گندم می‌شود. Rezaei and Hemati (2012) در تحقیقی در شهرستان اراک نشان دادند که بین عملکرد گندم و مقدار فسفر قابل جذب همبستگی معنی‌داری (r=۰/۴۴) در سطح یک درصد وجود دارد. Gaj *et al*. (2013) طی پژوهشی در اراضی کشاورزی لهستان نشان دادند که در اراضی کشاورزی با فسفر و پتاسیم کافی نیز افزایش فسفر و پتاسیم موجب افزایش عملکرد گندم زمستانه شده است.

مقدار مس در خاک‌های منطقه به‌طور میانگین ۱/۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. با توجه به مقادیر میانگین مس خاک که بیشتر از حد بحرانی مس برای رشد گندم (۰/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است، لذا مس موجب تأثیر منفی در افزایش عملکرد گندم شده است. مقدار pH خاک‌های منطقه دارای محدوده ۸/۴۷- ۷/۵۶ و میانگین حدود ۸ است و pH مطلوب برای رشد گندم ۷ است. لذا pH بالای خاک‌های منطقه موجب تأثیر منفی در عملکرد گندم شده است. همچنین pH بالای خاک به‌دلیل تأثیر بر کاهش جذب فسفر خاک، بر عملکرد گندم تأثیر منفی گذاشته است، که با نتایج Tkaczyk *et al*. (2018) مبنی بر تأثیر pH خاک از اسیدی به قلیایی بر افزایش عملکرد مطابقت دارد.

تخلخل خاک با تأثیر بر تهویه خاک بر عملکرد گندم مؤثر است، لذا این ویژگی‌ها به عنوان یکی از ویژگی‌های مهم در برآورد عملکرد گندم به مدل وارد شده است. Mirkhani (2013) در پژوهشی نشان داد، که تراکم خاک تأثیر معنی‌داری ($p<۰/۰۱$) بر افزایش چگالی ظاهری، هدایت هیدرولیکی و تخلخل و کاهش عملکرد دانه گندم دارد، بطوری که کمترین مقدار چگالی ظاهری، تخلخل، هدایت هیدرولیکی در تیمار بدون تراکم و بیشترین مقدار آن در تیمار ۲۰ درصد تراکم مشاهده شد. شکل (۳)، همبستگی بین عملکرد گندم اندازه‌گیری شده و برآورد شده را در مزارع مورد مطالعه نشان می‌دهد.

نمودار همبستگی بین مقادیر عملکرد گندم اندازه‌گیری-شده و برآوردشده با استفاده از معادله‌های مختلف نشان می‌دهد، که مدل ۱ (R^2 =۰/۶۶) و مدل ۲ (R^2 =۰/۶۴) همبستگی مشابهی دارند و بیشترین همبستگی در مدل ۴ (R^2 =۰/۷۸) و کمترین همبستگی در مدل ۳ (R^2 =۰/۴۸) مشاهده شد. جدول (۶)، مقادیر میانگین هندسی نسبت خطا (GMER)، میانگین هندسی انحراف معیار نسبت خطا (GSDER)، مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و ضریب تبیین (R^2) را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مقدار عملکرد گندم اندازه‌گیری شده در برابر عملکرد برآوردشده با استفاده از معادله‌های مختلف

جدول ۶- آماره‌های ارزیابی معادله‌های ایجادشده

معادله	NRMSE	GSDER	GMER
۱	۰/۱۷	۱/۱۸	۰/۹۹
۲	۰/۱۷	۱/۱۹	۰/۹۹
۳	۰/۲۱	۱/۲۴	۰/۹۸
۴	۰/۱۴	۱/۱۶	۰/۹۹

با توجه به نتایج آماره‌های ارزیابی معادله‌های ارائه شده (جدول ۶) تمامی معادله‌ها دارای میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) نزدیک به یک و میانگین هندسی انحراف معیار نسبت خطا (GSDER) کوچک و نزدیک به یک هستند، که نشان دهنده اعتبار خوب معادله‌های ارائه شده است. همچنین مقادیر GMER کمتر از یک است، که نشان دهنده برآوردهای کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده است. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) در معادله‌های ارائه‌شده به ترتیب برابر ۰/۱۷، ۰/۱۷، ۰/۱۹ و ۰/۱۴ هستند که نشان دهنده برآورد خوب معادله‌های ایجادشده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه خاک منطقه مورد مطالعه از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی دارای تغییرات مکانی زیادی است، لذا محدوده عملکرد گندم در منطقه بین ۲۷۵۰ تا ۱۰۵۰۰ کیلوگرم در هکتار است. بین عملکرد گندم با فسفر قابل استفاده، کربنات کلسیم معادل، شوری، آهن و روی خاک همبستگی معنی‌داری وجود دارد. نتایج ارزیابی معادله‌ها با استفاده از آماره‌های میانگین هندسی نسبت خطا (GMER)، انحراف استاندارد هندسی نسبت خطا (GSDER)، جذر میانگین مربعات باقیمانده نرمال شده (NRMSE) و ضریب تبیین (R^2) نشان داد، که معادله ارائه شده با استفاده از مقادیر رس، فسفر قابل استفاده، مس، تخلخل، کربنات کلسیم معادل و واکنش، مناسب‌ترین معادله برای تعیین عملکرد گندم آبی است و با استفاده از حداقل ویژگی‌ها می‌توان برآورد قابل قبولی داشت و استفاده از ویژگی‌های بیشتر هزینه‌بر است. لذا در مناطقی با شرایط اقلیمی و ویژگی‌های فیزیکی و

شیمیایی خاک مشابه منطقه مورد مطالعه می‌توان بر اساس معادله پیشنهادی عملکرد گندم را در حد قابل قبول برآورد کرد.

REFERENCES

Aria, P., and Mirkhani, R. (2005). Methods of Soil Physical Analysis, *Technical Bulletin*, Soil and Water Research Institute, Iran, 479. (In Farsi)

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. (In Farsi)

Ayoubi, Sh., Khormali, F. and Sahrawat, K. L. (2009). Relationships of barley biomass and grain yields to soil properties within a field in the arid region: Use of factor analysis. Acta *agriculturae scandinavica section B - soil and plant science*, 59(2), 107-117

Gaj, R., Górski, D., & Przybyl, J. (2013). Effect of differentiated phosphorus and potassium fertilization on winter wheat yield and quality. *Journal of Elementology*, 18(1).

Ghorbani, M., Koocheki, A. R. and Hossein Mahmoudi, H. (2009). Estimation of virtual yield organic wheat: Case study of khorasan province. *Environmental Sciences*, 6(3), 23-30. (In Farsi)

Jolliffe, I. T. (1986). Principal components in regression analysis. In *Principal component analysis* (pp. 129-155). Springer, New York, NY.

Juhos, K., Szabó, S. and Ladányi, M. (2015). Influence of soil properties on crop yield: a multivariate statistical approach, *International Agrophysics*, 29, 433-440.

Li, P., Zhang, T., Wang, X. and Yu, D. (2013). Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 126, 112-118.

Majchrzak, R. N., Olson, K. R., Bollero, G. and Nafziger, E. D. (2001). Using soil properties to predict wheat yield on Illinois soils. *Soil Science*, 166(4), 267-280

Mirkhani, R. (2013). The Effect of soil compaction on soil physical and chemical properties and wheat yield in Irrigation water salinity levels. Final report of research. Soil and Water Research Institute, 42767, 49pp. (In Farsi)

Mohaghegh, P. and Naderi, M. (2016). Determination of Effective Indicators for Soil Quality Assessment in Different Land Use Types of Chughakhor Basin. *Journal of Soil and Water Resources Conservation*, 5(3), 55-71.

Morovvat, A., Emadi, M., Shojae, M., Pakpour, A., Gholami, L., Haji Aghasi, J. and Kamali, E. (2012). Wheat yield prediction modeling by soil properties: a case study in North-west of Iran. *International Journal of Agricultural Science, Research and Technology in Extension and Education Systems*, *2*(1), 23-26.

Nazmi, L. (2013). Modeling for relationships between soil properties and yield components of wheat using multiple linear regression and structural equation modeling. *Advances in Environmental Biology*, 7(2), 235-242.

Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S., & Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ. 939. US Gov. Print. Office, Washington, DC. *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ. 939. US Gov. Print. Office, Washington, DC.*

Page A. L., Miller, R. H. and Keeney D. R. (1982). Methods of Soil Analysis, part 2, chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Inc. *Soil Science Society of America*. Madison, WI.

Rezaei, M. and Hemati, Z. (2012). Reaction of wheat yield to soil physical and chemical Characteristics in Arak Fields. *World Applied Sciences Journal*, 20(8), 1183-1187.

Singh, A. K., Mazumdar, S. P., Saha, A. R. and Kundu, D. K. (2017). Soil quality changes resulting from long-term fertilizer application under intensive cropping system in alluvial soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(13), 1503-1510.

Tkaczyk, P., Bednarek, W., Dresler, S. and Krzyszczak, J. (2018). The effect of some soil Physicocheical properties and nitrogen fertilization on winter wheat yield. *Acta Agroph*, 25(1): 107-116.

Torabian, A., and Maghsoudi, K. (2014). Study on relationship between yield and yield components of wheat under normal irrigation and drought stress conditions by path analysis method. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)*, 104, 47-53.

Tripathi, R. P., Sharma, P., & Singh, S. (2006). Soil physical response to multi-year rice wheat production in India. *IntJournal of Soil Science*, 12, 91-107.

Vaezi, A. R. and Bahrami, H. A. (2014). Relationship between soil productivity and erodibility in rainfed wheat lands in northwestern Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 16, 1455-1466.

Wagner, N. C., Maxwell, B. D., Taper, M. L. and Rew, L. J. (2007). Developing an empirical yield-prediction model based on wheat and wild oat (*Avena fatua*) density, nitrogen and herbicide rate, and Growing-Season Precipitation. *Weed Science Society of America*, 55, 652–664

Walkley, A. and Black, I. A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-37.