



Estimating the Yield Gap of Irrigated Wheat (*Triticum aestivum* L.) in Lorestan Province, Iran, the Modeling Approach

Kourosh Heidari¹, Mashallah Daneshvar^{1,2*}, Sajjad Rahimi-Moghaddam² and Aliheidar Nasrollahi³

1 and 2- Ph.D. Student and Assistant Professor, Department of Production Engineering and Plant Genetic, Faculty of Agriculture, Khorramabad, Iran, respectively.

3- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Khorramabad, Iran.

(*- Corresponding author's Email: daneshvar.m@lu.ac.ir)

Received: 23-02-2023

Revised: 29-05-2023

Accepted: 06-06-2023

Available Online: 06-06-2023

How to cite this article:

Heidari, K., Daneshvar, M., Rahimi-Moghaddam, S., & Nasrollahi A. (2024). Estimating the yield gap of irrigated wheat in Lorestan province, Iran, using the modeling approach. *Journal of Agroecology*, 16(2), 403-420. (In Persian with English abstract).

<https://doi.org/10.22067/agry.2023.81319.1148>

Introduction

Removing the gap between the yield that is currently obtained by farmers and the yield that can be obtained by using the best water, soil, and crop management practices (yield gap) is the key solution to overcoming the nutritional challenge of the growing world population. Wheat has played an important role in the economy and food security of the world over the history. Considering the importance of the wheat crop in food security and human feeding, as well as the importance of Lorestan province in producing wheat crop in Iran, the current research was carried out using the modeling method in order to estimate the yield gap of irrigated wheat agroecosystems of Lorestan province.

Materials and Methods

The current research was conducted in 6 locations in Lorestan province, Iran (Aleshtar, Aligudarz, Borujerd, Khorramabad, Kuhdasht, and Pol-e Dokhtar). To evaluate the APSIM-wheat model for the Chamran cultivar, some independent field experiments were used under different treatments, including planting date, irrigation, and nitrogen regimes. nRMSE, d-index, and MBE indices were used to evaluate the crop model. Then, the management, soil, and climate data of the studied locations were collected. To find the most optimal sowing date, an initial simulation experiment set was performed. After obtaining the optimal sowing date for different locations, the attainable yield (85% of the potential yield) was simulated. Finally, from the difference between attainable yield and actual yield, the total yield gap for the locations was obtained. Also, the contribution of different management practices, including nitrogen, irrigation, and other reducing and limiting factors, was calculated from the total yield gap. In the current research, OriginPro software was used for all statistical analysis and drawing of figures.

Results and Discussion

The results of the model calibration showed that the APSIM-wheat model was able to simulate the days to flowering, biomass, and grain yield accurately. The normalized root mean square error for days to flowering, biomass, and grain yield was 5.13, 5.29, and 7.87%, respectively. The model validation results of the model also showed that the model simulates the grain yield well (10.3%). In the initial simulation, the best production potential (8433 kg ha⁻¹) was related to the October 15 sowing date. Attainable, water-limited, and nitrogen-limited yields were equal to 7179.2, 6302.7, and 4212.5 kg ha⁻¹ in Lorestan province. Across different locations, the water-limited yield ranged from 1.4722 to 2.7448 kg ha⁻¹ followed by attainable yield (from 6537.5 to 7982.7 kg ha⁻¹) and nitrogen-limited (from 2.2 3850 to 4414.5 kg ha⁻¹). The total yield gap of irrigated wheat in Lorestan province was equal to 4177.5 kg ha⁻¹. The results also showed that, in general, throughout the studied locations and years, the contribution of nitrogen, water, and other reducing and limiting factors in Lorestan

province was equal to 69, 22, and 10% of the total yield gap. There were many changes among different locations in terms of the total yield gap in Lorestan province so it varied from 2661.8 kg ha⁻¹ (Pol-e Dokhtar) to 5608.4 kg ha⁻¹ (Aligudarz). In terms of yield gap due to water limitation, the highest amount was related to Pol-e Dokhtar (31%), and the lowest value was related to Khorramabad city (14%). For the yield gap caused by nitrogen limitation, Aligudarz had the largest share (77%), while the lowest share of this limitation was obtained for Khorramabad (59%). The maximum share of the yield gap caused by other limiting and reducing factors was also recorded in Khorramabad (27%), while its lowest value was calculated in Aligudarz and Aleshtar (without restrictions).

Conclusion

In general, the total yield gap of irrigated wheat in agro-ecosystems of Lorestan province is equal to 59%. Also, the results revealed that the largest share of the total yield gap is related to the lack of optimal application of nitrogen management (time of nitrogen application), and if the optimal management of nitrogen fertilizer is applied, the total yield gap will be significantly reduced at all studied locations in Lorestan province.

Keywords: APSIM-wheat model, Calibration and validation, Water and nitrogen management, Yield reducing and limiting factors

مقاله پژوهشی

جلد ۱۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۳، ص ۴۲۰-۴۰۳

برآورد خلأ عملکرد گندم آبی (*Triticum aestivum* L.) استان لرستان با استفاده از روش

مدلسازی

کوروش حیدری^۱، ماشاله دانشور^{۲*}، سجاد رحیمی مقدم^۲ و علی حیدر نصرالهی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶

چکیده

این مطالعه در شش منطقه الشتر، الیگودرز، بروجرد، خرم‌آباد، کوهدشت و پلدختر جهت برآورد خلأ عملکرد گندم آبی (*Triticum aestivum* L.) در بوم‌نظام‌های زراعی استان لرستان به انجام رسید. به منظور شبیه‌سازی عملکرد پتانسیل، آب محدود و نیتروژن محدود گندم آبی از مدل APSIM-wheat استفاده شد. بدین منظور داده‌های مربوط به مدیریت، خاک، آب و هوا و گیاه از منابع مختلف مطالعه جمع‌آوری شد. مدل گیاهی قبل از استفاده، تحت شرایط محدودیت آب و نیتروژن مورد ارزیابی قرار گرفت. اطلاعات مربوط به عملکرد واقعی نیز از ادارات جهاد کشاورزی هر شهرستان و استان به دست آمد. نتایج نشان داد که خلأ عملکرد کل در گندم آبی استان لرستان برابر با ۴۱۷۷/۵ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. همچنین، در سراسر مناطق و سال‌های مورد بررسی سهم خلأ عملکرد مربوط مدیریت نیتروژن، آب و سایر عوامل کاهنده و محدود کننده عملکرد در سطح استان لرستان برابر با ۶۸، ۲۲ و ۱۰ درصد خلأ عملکرد کل بود. تغییرات زیادی در بین مناطق مختلف از لحاظ خلأ کل در سطح استان لرستان وجود داشت به طوری که از ۲۶۶۱/۸ کیلوگرم در هکتار در پلدختر تا ۵۶۰۸/۴ کیلوگرم در هکتار در الیگودرز متغیر بود. در حال حاضر خلأ عملکرد کل گندم آبی در بوم‌نظام‌های زراعی استان لرستان برابر با ۵۹ درصد می‌باشد. بیشترین سهم خلأ عملکرد کل مربوط به عدم مدیریت بهینه (زمان مصرف) کود نیتروژن می‌باشد که در صورت به کارگیری مدیریت بهینه کود نیتروژن خلأ عملکرد کل در سطح همه مناطق مورد بررسی در استان لرستان به طور قابل توجهی کاهش خواهد پیدا کرد.

کلمات کلیدی: عوامل کاهنده عملکرد، عوامل محدود کننده عملکرد، مدل APSIM-wheat، مدیریت آب، مدیریت نیتروژن، اعتبار سنجی

مقدمه

مواد غذایی به ویژه بعد از سال ۲۰۰۶ منجر به تشدید ناامنی غذایی در جهان گردید. در سال ۲۰۰۷، نزدیک به ۷۵ میلیون نفر بر تعداد گرسنگان جهان افزوده شد و تعدادشان به ۹۲۳ میلیون نفر رسید (Sarlijo-Lahteenkorva & Lahelma, 2008). بعد از انقلاب سبز و تحولات صورت گرفته در علم کشاورزی که منجر به افزایش عملکرد گندم در واحد سطح در مزارع کشاورزان گردید، عوامل متعددی سیر صعودی عملکرد را به حالت سکون تبدیل کرد و یا با کاهش آن، محدودیت‌هایی را به وجود آورد (Lobell et al., 2009).

براساس گزارش سازمان ملل متحد پیش‌بینی شده است که در سال ۲۰۲۵ جمعیت هفت میلیارد نفری حاضر از مرز هشت میلیارد نفر خواهد گذشت، بدون اینکه تولید مواد غذایی در کشورهایی که با رشد جمعیت مواجه‌اند افزایش یابد. از سوی دیگر، افزایش قیمت‌های

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

۳- استادیار گروه علوم آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

*- نویسنده مسئول: (Email: daneshvar.m@lu.ac.ir)

(2018, 2019).

گندم در طول تاریخ و تمدن بشر نقش مهمی در اقتصاد و امنیت غذایی جهان داشته است. این گیاه یکی از سه غله مهم گندم، ذرت و برنج می‌باشد که بیشترین تولید دانه را دارد (FAO, 2023). گندم نان گیاهی است که در محیط‌های مختلف در سراسر جهان کشت می‌شود و تقریباً ۲۰ درصد انرژی و ۲۵ درصد نیازهای پروتئینی جمعیت جهان را تأمین می‌کند (Reddy & Hodges, 2000). بالغ بر ۶/۲ میلیون هکتار از اراضی زراعی کشور ایران زیر کشت گندم است. از این مقدار حدود ۲/۱ میلیون هکتار به کشت گندم آبی و ۴/۱ میلیون هکتار آن به کشت گندم دیم اختصاص دارد (Iranian Ministry of Agriculture, 2021). استان لرستان یکی از مناطقی از کشور می‌باشد که از نظر تولید گندم دارای جایگاه ویژه‌ای می‌باشد به طوری که سطح زیرکشت گندم آبی در استان برابر با ۵۲۵۶۴ هکتار با متوسط عملکرد ۳/۳ تن در هکتار می‌باشد (Iranian Ministry of Agriculture, 2021). با توجه به مطالب مطرح شده و همچنین بر اساس اهمیت گیاه گندم در امنیت غذایی و تغذیه انسان و همچنین اهمیت استان لرستان در تولید گیاه گندم در سطح کشور این مطالعه با تکیه بر روش مدل‌سازی در راستای برآورد خلأ عملکرد گندم آبی استان لرستان به انجام رسید.

مواد و روش‌ها

مناطق مورد مطالعه

این تحقیق در سطح بوم‌نظام‌های گندم آبی استان لرستان صورت گرفت. این استان از نظر جغرافیای در طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۱ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی و با وسعتی معادل ۲۸۰۶۴ در جنوب غرب ایران واقع شده است. مساحت کل اراضی استان لرستان ۴۹۸۸۸۳ هکتار و از این مقدار ۵۲۵۶۴ هکتار اراضی گندم آبی می‌باشد (Iranian Ministry of Agriculture, 2021). برای تحقیق حاضر شش شهرستان شامل خرم‌آباد، بروجرد، کوهدشت، پلدختر، الشتر و الیگودرز مورد بررسی قرار گرفتند که معیار انتخاب آن‌ها بر اساس میزان سطح زیر کشت گندم آبی، تنوع اقلیمی و توزیع و پوشش مناسب در سطح استان بود (جدول ۱).

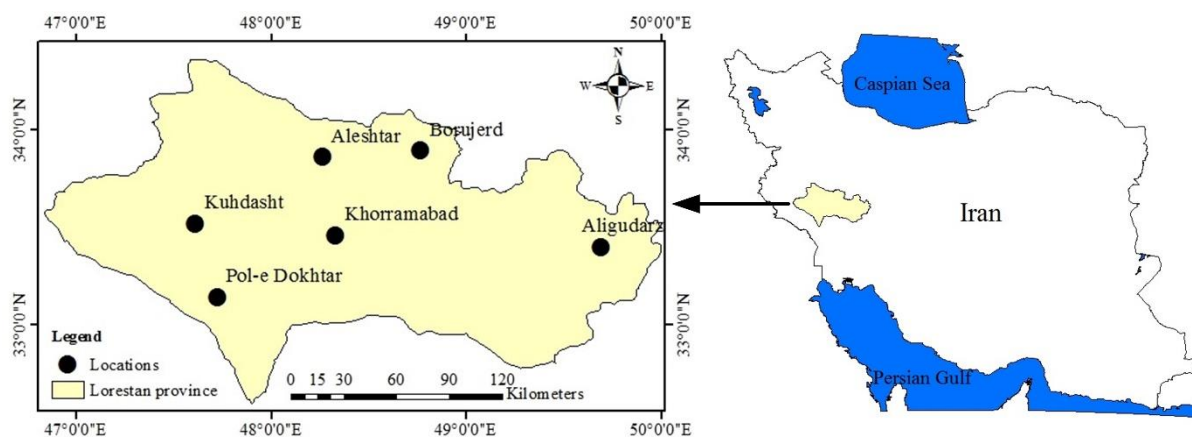
داده‌های مورد نیاز

داده‌های بلندمدت آب و هوایی شامل تشعشع خورشیدی (مگاژول در متر مربع)، دماهای کمینه (درجه سانتی‌گراد) و بیشینه (درجه

ظرفیت نهایی تولید غذا در جهان بر اثر محدودیت مساحت زمین‌های مناسب و منابع آب در دسترس جهت تولید محصولات زراعی و همچنین محدودیت‌های بیوفیزیکی مربوط به رشد گیاهان زراعی، محدود می‌شود. کمی‌سازی ظرفیت تولید در واحد سطح مزارع فعلی جهت تحقیقات توسعه و سرمایه‌گذاری و همچنین جهت کمک به کشاورزان منطقه در اتخاذ تصمیم‌های مناسب زراعی ضروری است (van Ittersum et al., 2013). از بین بردن فاصله بین عملکردی که در حال حاضر در مزارع بدست می‌آید و عملکردی که می‌تواند به وسیله‌ی استفاده از بهترین ارقام سازگار با محیط و بهترین روش‌های مدیریت آب، خاک و گیاه بدست آید (خلأ عملکرد) راهکار کلیدی جهت غلبه بر چالش تغذیه‌ای جمعیت در حال رشد جهان است (Hochman et al., 2013). آنالیز خلأ عملکرد گیاهان زراعی یک تخمین کمی از امکان افزایش در ظرفیت تولید غذا برای یک ناحیه را فراهم می‌آورد، که یک جزء مهم در طراحی راهبردی تأمین غذا در مقیاس منطقه‌ای، ملی و جهانی است (van Wart et al., 2013). با توجه به افزایش نگرانی‌ها در خصوص امنیت غذایی در سال‌های اخیر، انجام مطالعات در زمینه خلأ عملکرد امری ضروری است. به منظور افزایش تولید و کارایی مصرف انرژی به‌ویژه در کشورهای که هنوز در زمینه تولید گیاهان زراعی خلأ عملکردی زیادی دارند، نیاز است که آنالیز خلأ عملکرد انجام و دلایل محدودکننده آن شناسایی شوند. روش‌های متفاوتی از جمله استفاده از روش‌های آماری، استفاده از سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل‌سازی بررسی آنالیز خلأ عملکرد گیاهان زراعی وجود دارد. با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان به راحتی اثرات مدیریت کشاورزی را بر روی بهره‌وری محصولات زراعی در یک محیط محاسبه نمود (Brisson et al., 2003; Deihimfard et al., 2015). این ابرازها همچنین جهت انتخاب گیاه و رقم مناسب برای یک منطقه، تعیین خصوصیات مطلوب گیاهی، مدیریت زراعی، پیش‌بینی اثر تنوع و تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد محصول و تخمین عملکرد بالقوه مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های گیاهی می‌توانند رشد، نمو و عملکرد محصولات زراعی را به صورت بلند مدت شبیه‌سازی کنند و همچنین برای بررسی پاسخ محصولات به تغییرات محیطی، ژنتیکی و روش‌های مدیریتی بسیار مناسب هستند (Rahimi-Moghaddam et al., 2015).

داشتن تعداد ساعت آفتابی، تابش روزانه با استفاده از رابطه آنگستروم (Prescott, 1940) به صورت زیر تخمین زده شد:

ساتی گراد) و بارش (میلی متر) مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی استان لرستان از سازمان هواشناسی استان تهیه شد. در ایستگاه‌های هواشناسی کشور، مقدار تابش روزانه ثبت نمی شود، با در اختیار



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه در استان لرستان.

Fig. 2. Geographical position of the study areas in Lorestan province.

جدول ۱- ویژگی‌های اقلیمی و مدیریتی مناطق مورد مطالعه.

Table 1- Climatic and management properties of the study areas.

مناطق Locations	سطح زیر کشت (هکتار) Cultivated area (ha)	اقلیم Climate	ارتفاع Elevation (m)	میانگین دمای سالانه Annual mean temperature (°C)	بارندگی تجمعی سالانه Annual cumulative rainfall (mm)	کود نیتروژن Nitrogen fertilizer (kg ha ⁻¹)	تعداد آبیاری Irrigation number	سال‌های بررسی شده Study years
الشتر Aleshtar	3600	سرد Cold	1638	13.5	450	126.1	7	2001-2019
الیگودرز Aligudarz	6500	سرد Cold	1995	12.6	402.1	126.6	8	1993-2019
بروجرد Borujerd	4500	سرد Cold	1574	14.9	486.3	123.6	4	1993-2019
خرم‌آباد Khorramabad	5000	معتدل Temperate	1147	16.5	486.2	121.7	7	1992-2019
کوه‌دشت Kuhdasht	5600	معتدل Temperate	1195	16	369.8	124.4	8	2001-2019
پلدختر Pol-e Dokhtar	2500	خیلی گرم Very warm	658	23	378.4	251.7	7	2001-2019

جمله اطلاعات مربوط به مدیریت آبیاری و کوددهی گیاه گندم (تعداد آبیاری و مقدار کود نیتروژن) در قالب پرسشنامه از کشاورزان استان و همچنین اطلاعات مربوط به میزان عملکرد واقعی اطلاعات وزارت جهاد کشاورزی تهیه شد (جدول ۱). برای اینکار تعداد کشاورزان گندم کار از سازمان جهاد کشاورزی گرفته شد و بر اساس فرمول کوکران^۲ تعداد پرسشنامه یا در واقع حجم نمونه آماری لازم برای این تحقیق

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad (1)$$

در این معادله، R_s تابش روزانه (مگاژول در مترمربع)، n تعداد ساعات آفتابی، N طول روز و R_a تابش فرازمینی^۱ و پارامترهای a و b ضرایب آنگستروم کالیبر شده محلی هستند. مقدار پارامترهای a و b برای مناطق مختلف به ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۰/۵ در نظر گرفته شد (Allen et al., 1988). افزون بر این داده‌ها، اطلاعات تکمیلی از

بدست آمد:

معادله (۲)

$$n = \frac{\frac{Z^2 pq}{d^2}}{1 + \frac{1}{N} \left(\frac{Z^2 pq}{d^2} - 1 \right)}$$

در این معادله n حجم نمونه آماری، N حجم جامعه آماری، d اشتباه مجاز برابر با ۰/۰۵، Z مقدار متغیر نرمال با سطح اطمینان ۱-α

است. در آزمون دودامنه مقدار Z برای سطح اطمینان ۹۵ درصد برابر ۱/۹۶ و برای سطح اطمینان ۹۹ درصد برابر ۲/۵۸ است که در این مطالعه برابر با ۱/۹۶ بود. همچنین p نسبت برخورداری از صفت مورد نظر و q (1-p) نسبت عدم برخورداری از صفت مورد نظر است که در این مطالعه مقدار p و q برابر با ۰/۰۵ بود. در نهایت به طور میانگین در هر شهرستان ۵۰ پرسشنامه تکمیل شد.

جدول ۲- ویژگی‌های خاک مناطق مورد مطالعه.

Table 2- Soil properties of study areas.

مناطق Locations	وزن مخصوص ظاهری خاک Bulk density (g cm ⁻³)	ظرفیت آب خاک در نقطه پژمردگی Soil Water content at wilting point (cm ³ cm ⁻³)	ظرفیت خاک در نقطه Soil water content at field capacity (cm ³ cm ⁻³)	ظرفیت آب خاک در نقطه اشباع Saturation water content (cm ³ cm ⁻³)	ماده آلی خاک Soil organic matter (%)	بافت خاک Soil texture	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر) EC (dS m ⁻¹)
الشتر Aleshtar	1.28	0.242	0.395	0.515	1.28	سیلتی رسی Silty clay	7.1	1.1
الیگودرز Aligudarz	1.31	0.237	0.388	0.507	1.16	سیلتی رسی لوم Silty clay loam	7.4	1.4
بروجرد Borujerd	1.30	0.258	0.402	0.515	0.88	سیلتی لوم Silty loam	6.9	1.3
خرم‌آباد Khorramabad	1.28	0.231	0.392	0.518	1.23	سیلتی رسی لوم Silty clay loam	7.3	1.2
کوهدهشت Kuhdasht	1.34	0.259	0.396	0.500	0.98	رسی Clay	7.2	1.8
پلدختر Pol-e Dokhtar	1.38	0.062	0.286	0.475	1.01	سیلتی لوم Silty loam	7.0	2.1

هدایت الکتریکی بودند. از این داده‌ها برای تخمین ظرفیت نگهداری آب خاک در نقطه پژمردگی دائم، مزرعه و اشباع با استفاده از مدل SPAW^۱ (Saxton & Willey, 2006) استفاده گردید (جدول ۲).

داده‌های خاک از منابع مختلف شامل مقالات، مطالعات تفضیلی نیمه تفضیلی خاکشناسی ایران، آزمایشگاه‌های خاکشناسی در سطح شهرستان، گزارشات سازمان خوار و بار جهانی و سایت جهانی اطلس خلاً عملکرد (<https://www.yieldgap.org/Iran>) به دست آمد. داده‌های خاک این گزارشات شامل برخی از صفات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی شامل بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن)، وزن مخصوص ظاهری، اسیدیته خاک، میزان کربن آلی و

شبیه‌سازی عملکرد

به منظور تعیین خلأهای اقلیمی در منطقه مورد آزمایش و شبیه‌سازی رشد و نمو گندم به همراه تولید کمی آن متأثر از تیمارهای آبیاری و نیتروژن از شبیه‌ساز نظام‌های تولید محصولات زراعی (APSIM) تحت مدیریت‌های مختلف زراعی استفاده شد (Holzworth et al., 2014). این شبیه‌ساز پارامترهای اقلیمی و گیاهی را بطور روزانه بررسی می‌کند. مدل APSIM توسط موسسه APSRU^۲ در استرالیا طراحی شده و از قدرت بالایی برای شبیه‌سازی رشد و نمو گیاه گندم برخوردار است و اثرات عوامل مدیریتی مختلف از جمله کود نیتروژن و آب را در سطوح مزرعه با دقت بالا شبیه‌سازی می‌کند. این مدل، سرعت رشد روزانه گیاه را با تبدیل تابش خورشیدی دریافت شده به ماده خشک گیاهی با استفاده از پارامتر کارایی مصرف نور^۳ شبیه‌سازی می‌کند. میزان نور دریافت شده توسط کانوپی (تاج پوشش) گیاه بر اساس شاخص سطح برگ محاسبه می‌شود که این شاخص تحت تأثیر دمای روزانه و تنش‌های آب و نیتروژن قرار دارد. کارایی مصرف نور نیز در مدل تحت تأثیر مرحله نمو، دما و تنش‌های آب و نیتروژن قرار دارد. مدل APSIM-wheat نمو فنولوژیکی گیاه را با توجه به دمای تجمعی و طول روز شبیه‌سازی می‌کند. ماده خشک تولیدی روزانه با ضرایبی به اندام‌های مختلف تخصیص داده می‌شود. در این مدل همچنین معادلات مربوط به تبخیر خاک، تعرق گیاه، زهکشی و رواناب برای شبیه‌سازی بیلان آب به صورت روزانه در مراحل مختلف گیاه در نظر گرفته شده است (Holzworth et al., 2014).

برای شبیه‌سازی مطلوب در شرایط تنش رطوبتی و و نیتروژن، شرایط مختلف رطوبتی خاک باید به درستی شبیه‌سازی گردد. بنابراین مدل در شرایط بهینه و محدودیت رطوبتی و مقادیر نیتروژن نیاز به ارزیابی دارد، که خود شامل واسنجی و اعتبارسنجی می‌باشد. برای واسنجی مدل APSIM-wheat برای رقم چمران (به عنوان رقم غالب در بوم‌نظام‌های گندم آبی استان لرستان) توسط دیهیم‌فرد (Deihimfard, 2011) استفاده شد که انجام شده است (جدول ۳). همچنین با توجه به اینکه مدل برای بررسی خلأ عملکرد نیتروژن و آب محدود مورد استفاده قرار گرفت از آزمایشاتی که تحت این شرایط و برهمکنش بین آن‌ها انجام شدند (Baygi Madani et al., 2012; Enayatgholizadeh et al., 2017; et al., 2017) (جدول ۴) نیز برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد تا مشخص شود مدل قابلیت شبیه

سازی این اثرات و برهمکنش بین آن‌ها را دارد. برای ارزیابی مدل و مقایسه مقدارهای شبیه‌سازی و اندازه‌گیری از شاخص‌های آماری nRMSE: مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده (Wallach & Willmott, 1982)؛ d-index: شاخص توافق ویلموت (Willmott & Matsuura, 2005) و MBE: میانگین انحراف خطا (Willmott & Matsuura, 2005) با توجه به رابطه‌های زیر استفاده شد:

معادله ۳

$$nRMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{n}} \times \frac{100}{\bar{O}}$$

$$d\text{-index} = 1.0 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (|Si - \bar{O}| + |Oi - \bar{O}|)^2} \right]$$

معادله ۴

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Si - Oi)}{n}$$

معادله ۵

که در این روابط n : تعداد مشاهدات؛ O_i : داده مشاهده شده؛ S_i : داده شبیه‌سازی شده و \bar{O} : میانگین داده مشاهده شده می‌باشند. مقادیر شاخص مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده در بازه‌های ۱۰-۰، ۲۰-۱۰ و ۳۰-۲۰ درصد به ترتیب نشان‌دهنده‌ی وضعیت عالی، خوب و متوسط مدل در پیش‌بینی و بیشتر از ۳۰ درصد بیانگر عدم کارا بودن مدل می‌باشد. مقدار شاخص توافق ویلموت بین صفر تا یک متغیر است که میزان انطباق میان داده‌های مشاهده شده و مقادیر شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد و نزدیک بودن مقدار این شاخص به یک بیانگر نزدیکی مقادیر شبیه‌سازی شده به مقادیر واقعی و در حقیقت کارکرد بهتر مدل است. میانگین انحراف خطا برآورد کم و بیش از حد مدل را نشان می‌دهد که از منفی بی نهایت تا مثبت بی نهایت متغیر است و دقت مدل با نزدیک شدن مقدار میانگین انحراف خطا به صفر افزایش می‌یابد.

علاوه بر شاخص‌های ذکر شده، از ضریب تبیین برای اندازه‌گیری دقت مدل نیز در مطالعه حاضر بهره‌گیری شد. ضریب تبیین نسبت پراکندگی بین داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهده شده را نشان می‌دهد (Mendenhall et al., 1996). در صورت وجود تطابق کامل رگرسیونی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، مقدار ضریب تبیین برابر با یک بوده و با کاهش مقدار این شاخص، درصد کمتری از تغییرات داده‌ها توسط خط رگرسیونی توجیه می‌شود در صورت عدم وجود هیچگونه رابطه‌ای رگرسیونی مقدار ضریب تبیین صفر خواهد بود. بنابراین این ضریب بین صفر و یک متغیر می‌باشد که نزدیک بودن به یک نشان‌دهنده دقت بالای مدل در پیش‌بینی صفت مورد نظر می‌باشد. همچنین در این تحقیق از خط یک به یک نیز بهره گرفته شد که نزدیک بودن خط یک به یک به خط رگرسیون نشان-

1- The Agricultural Production Systems sIMulator
2- The Agricultural Production Systems Research Unit
3- Radiation Use Efficiency (RUE)

دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی می‌باشد.

جدول ۳- ضرایب ژنتیکی رقم چمران در مدل APSIM-wheat (Deihimfard, 2011).

Table 3- Genetic coefficients of the Chamran cultivar in APSIM-wheat model (Deihimfard, 2011).

ضریب Coefficient	مقدار Value	واحد Unit
نیاز حرارتی تا پایان مرحله جوانه‌زنی Thermal time at the end of juvenile stage	380	°Cd
نیاز حرارتی تا مرحله گل‌انگیزی Thermal time at floral initiation stage	500	°Cd
نیاز حرارتی از شروع پر شدن دانه تا رسیدگی Thermal time from start grain filling to maturity	545	°Cd
حساسیت به طول روز Vernalization sensitivity	3.5	-
حساسیت به بهاره‌سازی Photoperiod sensitivity	2.5	-
تعداد دانه به ازای هر گرم ساقه Number of grains per gram of stem	22.5	Kernel/g stem
بیشینه وزن دانه Maximum grain size	0.044	g

جدول ۴- آزمایشات مورد استفاده برای اعتبارسنجی مدل APSIM-wheat برای رقم چمران.

Table 4- Field experiments used APSIM-wheat validation for the Chamran cultivar.

آزمایش Experiment	منطقه و سال آزمایش Location and year of experiment	طرح آزمایشی/ تیمارها Experiment design/treatments	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	ارتفاع Elevation (m)	میانگین دمای سالانه Annual mean temperature (°C)	بارندگی تجمعی سالانه Annual cumulative rainfall (mm)
مندی و همکاران/ Madani et al., 2012	اهواز/ Ahvaz/2007 and 2008	اسپلیت پلات بر اساس طرح بلوک های کامل با سه تکرار / سطوح نیتروژن و آبیاری Split split-plot arrangement based on randomized complete block design with three replications / Nitrogen × irrigation	49.60	31.26	151	26.2	235.7
بیگی و همکاران Baygi et al., 2017	نیشابور/ Neysabur/2014	اسپلیت پلات بر اساس طرح بلوک های کامل با سه تکرار / سطوح تاریخ کاشت و ارقام Factorial experiment based on randomized complete block design with three replications / Sowing date × cultivar فاکتوریل بر اساس طرح بلوک های کامل با چهار تکرار / سطوح ارقام و نیتروژن Factorial experiment based on randomized complete block design with four replications / Cultivar × nitrogen	58.76	36.23	1250	14.4	236.7

تعیین و تحلیل خلأ عملکرد

برای تعیین عملکرد واقعی، از اطلاعات واقعی عملکرد گیاه گندم

در سطح استان لرستان استفاده شد. به این منظور، اطلاعات مربوط

به عملکرد واقعی کشاورزان استان لرستان به تفکیک شهرستان، از

$$YG_N = Y_A - Y_N \quad \text{معادله (۸)}$$

در معادلات بالا (۱) Y_{GT} خلأ عملکرد کل، Y_A عملکرد قابل دستیابی (عملکرد شبیه‌سازی شده در شرایط عدم محدودیت‌ها)، Y_a عملکرد واقعی کشاورزان (به دست آمده از آمار سازمان جهاد کشاورزی و پرسشنامه) هستند. Y_{GW} میزان خلأ عملکرد آب محدود و Y_W میزان عملکرد آب محدود (عملکرد شبیه‌سازی شده در شرایط محدودیت رطوبتی یعنی تحت مدیریت آبیاری کشاورزان) است. Y_{GN} خلأ عملکرد ناشی از نیتروژن و Y_N میزان عملکرد نیتروژن محدود (عملکرد شبیه‌سازی شده در شرایط محدودیت کوددهی یعنی مدیریت کشاورزان) است. با داشتن خلأهای عملکرد ناشی از آب محدود، نیتروژن و کل می‌توان خلأ عملکرد ناشی از سایر عوامل محدود کننده (سایر عناصر غذایی، شوری و غیره) و کاهنده (علف هرز، حشرات آفت و بیماری‌ها) را طبق رابطه زیر به دست آورد:

$$Y_{G_0} = Y_{GT} - (Y_{GW} + Y_{GN}) \quad \text{معادله (۹)}$$

Y_{G_0} خلأ عملکرد ناشی از سایر عوامل محدود کننده و کاهنده می‌باشد. در مطالعه حاضر، برای تمامی تجزیه‌های آماری و رسم شکل‌ها از نرم افزار OriginPro (Seifert, 2014) استفاده گردید.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل APSIM -wheat

نتایج اعتبارسنجی مدل بیانگر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه تحت مدیریت، تیمارها (آب و نیتروژن) و مناطق مختلف بود (شکل ۲). مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده برای صفت عملکرد دانه برابر با $10/3$ درصد و شاخص توافق ویلموت برابر با $0/97$ بود. همچنین میانگین انحراف خطا برای صفت مذکور برابر با $0/187$ - تن در هکتار بود که نشان‌دهنده یک مقدار کم برآورد مدل برای این صفت بود (شکل ۲). واسنجی دقیق مراحل فنولوژیک، بیان نیتروژن و آب در نهایت موجبات پیش‌بینی دقیق اثرات مختلف آب و نیتروژن را بر روی عملکرد دانه فراهم می‌آورد. مطالعات مختلف نیز نشان می‌دهند که مدل APSIM می‌تواند عملکرد دانه محصولات مختلف زراعی را بخوبی شبیه‌سازی کند. به عنوان مثال، متوسط ضریب تبیین، مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده و شاخص توافق ویلموت برای عملکرد دانه ذرت در آزمایش رحیمی مقدم و همکاران (Rahimi-Moghaddam et al., 2018) به ترتیب برابر با

ادارات جهاد کشاورزی هر شهرستان و استان دریافت شد. جهت تعیین عملکرد پتانسیل نیز همانطور که قبلاً بیان شد از مدل APSIM-wheat استفاده گردید. در این سطح با توجه به میزان تشعشع، درجه حرارت، غلظت CO_2 و ویژگی‌های گیاه زراعی تعیین می‌شود. بنابراین میزان تولید در دوره آماری بلندمدت با توجه به اطلاعات هواشناسی موجود و با در نظر گرفتن عدم وجود تنش‌های زنده و غیرزنده شبیه‌سازی شد. با توجه به محدودیت در تجهیزات و همچنین تولید مقرون به صرفه در سیستم‌های کشت فشرده، عملکرد کشاورزان در بهترین حالت تنها ۷۵ تا ۸۵ درصد عملکرد پتانسیل است (Espe et al., 2016; van Ittersum et al., 2013; Hochman et al., 2013). بر این اساس، تنها ۸۵ درصد از مقادیر عملکرد پتانسیل شبیه‌سازی شده در این تحقیق در محاسبات خلأ عملکرد در نظر گرفته شد که به آن عملکرد قابل دستیابی گفته می‌شود.

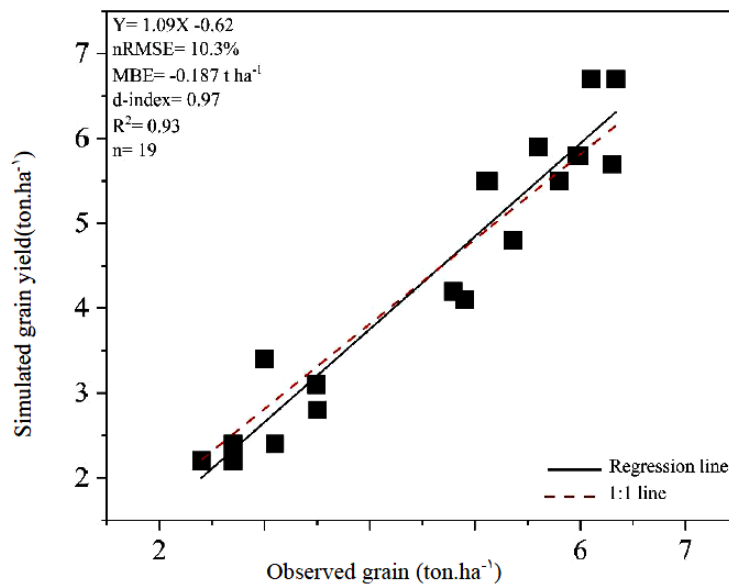
عملکرد آب محدود، با توجه به میزان آب در دسترس برای گیاه تعیین شد. به این منظور اطلاعات مربوط به میزان آبیاری طی فصل رشد گیاه گندم با کمک پرسشنامه از کشاورزان تهیه شد و میزان عملکرد با توجه به آب دریافتی توسط گیاه (بارش‌های صورت گرفته طی فصل رشد و آبیاری انجام شده توسط کشاورز) و با کمک مدل تعیین شد. بدین منظور آبیاری‌های در طول فصل رشد در مراحل مختلف گندم پخش گردید و آبیاری زمانی صورت گرفت که محتوای رطوبت خاک کمتر از ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه بود. عملکرد نیتروژن محدود، نیز با توجه به میزان نیتروژن در دسترس برای گیاه تعیین شد. به این منظور اطلاعات مربوط به میزان و زمان کاربرد کود نیتروژن طی فصل رشد گیاه گندم با کمک پرسشنامه از کشاورزان تهیه شد و میزان عملکرد با توجه به نیتروژن دریافتی توسط گیاه (تجزیه ماده آلی خاک و کود نیتروژن بکار برده شده توسط کشاورز) و با کمک مدل تعیین گردید. برای تعیین بهترین تاریخ کاشت یک آزمایش شبیه‌سازی اولیه در چهار تاریخ کاشت (۱۵ مهر، ۱ آبان، ۱۵ آبان و ۳۰ آبان) در بازه کشت گندم در مناطق مورد مطالعه در شرایط پتانسیل انجام شد. پس از استخراج مقادیر عملکرد گیاه گندم در سطوح یاد شده، میزان خلأ عملکرد در سطح قابل دستیابی، آب محدود و نیتروژن محدود محاسبه به صورت زیر محاسبه شد:

$$Y_{GT} = Y_A - Y_a \quad \text{معادله (۶)}$$

$$Y_{GW} = Y_A - Y_W \quad \text{معادله (۷)}$$

عملکرد دانه محصولات مختلف از جمله گندم، ذرت (*Zea mays*)، سویا (*Glycine max*) و کلزا (*Brassica napus*) را به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۷۹، ۰/۸۵، ۰/۵۳ و ۰/۷۱ شبیه‌سازی کند (Gaydon et al., 2017). همانطور که در جدول ۴ مشخص می‌باشد ارزیابی مدل تحت شرایط مناطق مختلف و تیمارهای مختلف مدیریتی از جمله آب، نیتروژن و تاریخ کاشت بوده است. بنابراین با توجه به کارکرد مناسب مدل می‌توان از این مدل ارزیابی شده برای تعیین خلأ عملکرد در مناطق مختلف بهره گرفت.

۰/۷۷، ۹/۸ درصد و ۰/۸۴ بود و نشان داده شد که مدل APSIM در پیش‌بینی رشد و عملکرد دانه ذرت تحت تیمارهای مختلف نیتروژن، رقم و آبیاری از اعتبار کافی برخوردار است. کپونگور (Kpongkor, 2007) قدرت مدل APSIM در پیش‌بینی عملکرد دانه سورگوم نسبت به کود نیتروژن و فسفر تحت دو سیستم متفاوت مدیریتی در غنا را خوب ارزیابی کردند (ضریب تبیین برابر با ۰/۸۱ بود). در تحقیقی گزارش شد که مدل APSIM برای یک مجموعه داده از ۱۲ کشور، مجموعه‌ای از خاک‌ها، روش‌های مدیریتی و محصولات مختلف در آسیا مورد بررسی قرار گرفت که مدل توانست به خوبی



شکل ۲- نتایج اعتبارسنجی مدل APSIM-wheat برای رقم چمران با استفاده از مطالعات مندنی و همکاران (Madani et al., 2012)، بیگی و همکاران (Baygi et al., 2017) و عنایت‌قلی‌زاده و همکاران (Enayatgholizadeh et al., 2011).

Fig. 2. APSIM-wheat model validation for the Chamran cultivar using Madani et al. (2012), Baygi et al. (2017), and Enayatgholizadeh et al. (2011) studies.

کیلوگرم هکتار به دست آمد. در سراسر مناطق مختلف، عملکرد دانه گندم آبی در تاریخ کاشت‌های ۱، ۱۵ و ۳۰ آبان به ترتیب برابر با ۸۰۷۷/۷، ۸۰۴۰/۴ و ۷۹۶۸/۲ کیلوگرم در هکتار بود. در بین برهمکنش‌های مختلف بالاترین عملکرد (۹۸۱۷/۳ کیلوگرم در هکتار) در برهمکنش منطقه الیگودرز و تاریخ کاشت ۱۵ مهر بود. همچنین کمترین میزان عملکرد (۶۰۱۴/۴ کیلوگرم در هکتار) در برهمکنش منطقه پلدختر و تاریخ کاشت ۱ آبان شبیه‌سازی شد (شکل ۳). در زمینه برتری عملکرد پتانسیل در منطقه الیگودرز و تاریخ کاشت ۱۵ مهر این موضوع را می‌توان به طول دوره رشد بیشتر در منطقه

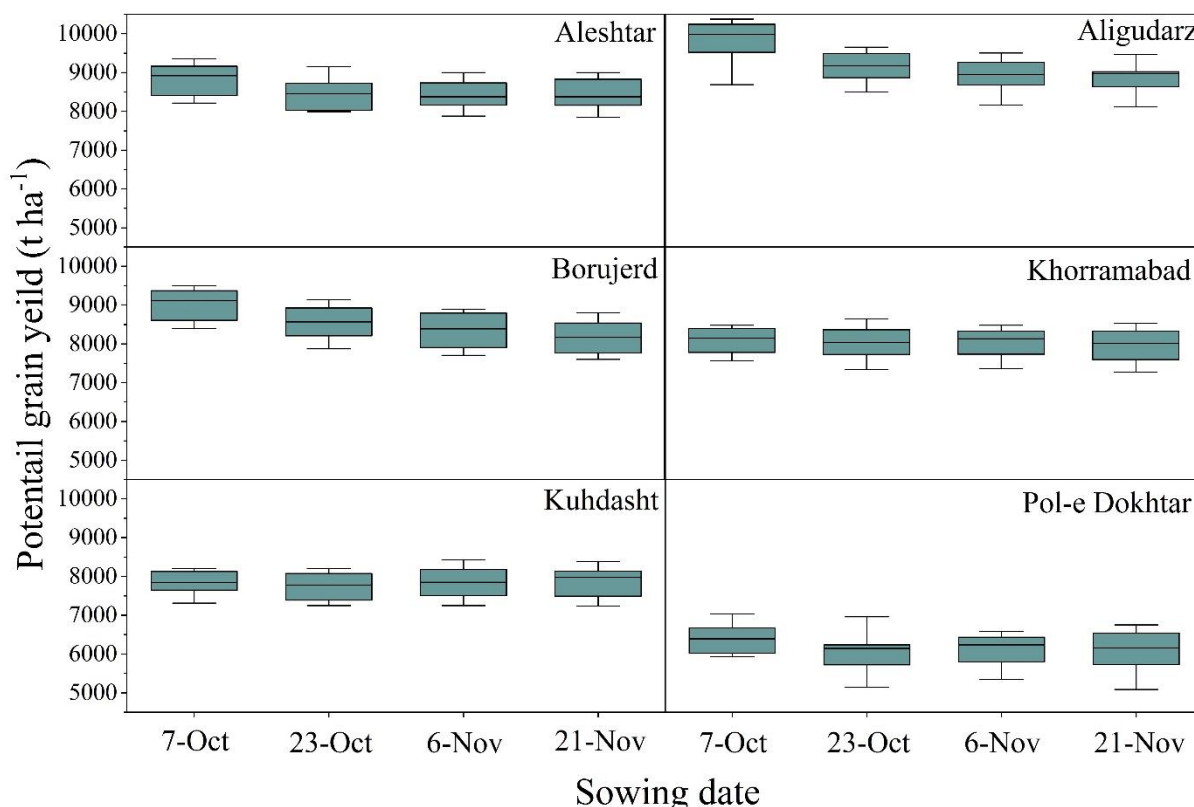
عملکرد پتانسیل مناطق مختلف تحت تاریخ‌های کاشت مختلف

به طور کلی عملکرد پتانسیل گندم آبی در استان لرستان تحت تاریخ کاشت‌های مختلف برابر با ۸۱۲۴/۳ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۳). همچنین عملکرد پتانسیل گندم آبی در مناطق مختلف متفاوت بود به طوری که در سراسر تاریخ کاشت‌ها عملکرد از ۶۱۵۱/۹ کیلوگرم در هکتار در منطقه پلدختر تا ۹۱۵۸/۴ کیلوگرم در منطقه الیگودرز متغیر بود. در بین تاریخ کاشت‌های مختلف بیشترین عملکرد در سراسر مناطق مختلف در تاریخ کاشت ۱۵ مهر با ۸۴۳۳

(al., 2021).

با توجه به اینکه در بین تاریخ‌های مختلف، تاریخ کاشت ۱۵ مهر برترین تاریخ کاشت از لحاظ عملکرد پتانسیل در سراسر مناطق بود این تاریخ کاشت به عنوان تاریخ کاشت بهینه برای شبیه-سازی بعدی جهت محاسبه عملکرد قابل دستیابی، آب محدود و نیتروژن محدود استفاده شد.

الیگودرز (۲۳۴ روز) نسبت به سایر مناطق (۲۰۷ روز) و همچنین طول دوره رشد بیشتر در تاریخ کاشت ۱۵ مهر (۲۲۴ روز) نسبت به سایر تاریخ‌های کاشتها (۲۰۷ روز) اشاره نمود. در واقع طول دوره رشد بیشتر باعث فتوسنتز بیشتر و افزایش ساخت ماده خشک می‌شود که این ماده خشک در نهایت باعث افزایش عملکرد دانه می‌گردد. بسیاری از مطالعات نشان‌دهنده ارتباط مثبت طول دوره رشد بیشتر و عملکرد بالاتر هستند (Rahimi-Moghaddam et Amiri et al., 2021);



شکل ۳- عملکرد پتانسیل گندم در مناطق مورد مطالعه و تاریخ‌های کاشت مختلف.
 Fig. 3. Potential grain yield in the study areas under different sowing dates.

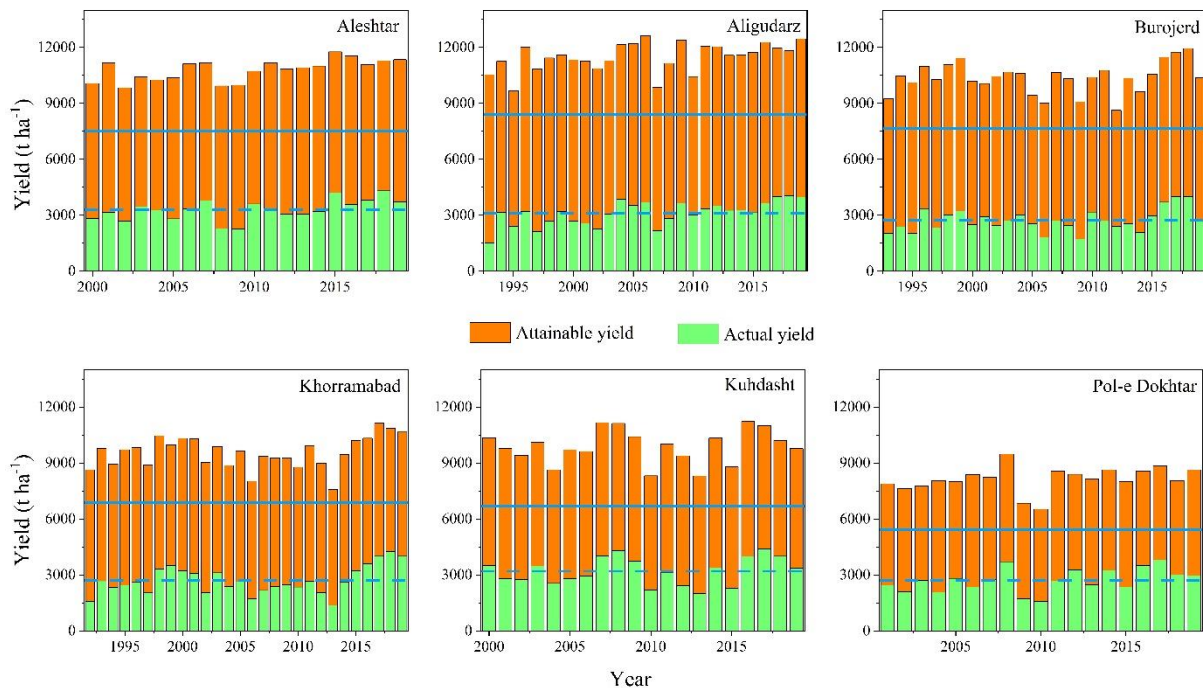
میزان آن در منطقه خرم‌آباد در سال ۱۳۹۲ بود (شکل ۴). بالاترین عملکرد قابل دستیابی (۹۰۱۱/۴ کیلوگرم در هکتار) در منطقه الیگودرز و سال ۱۳۷۲ بود و کمترین (۴۹۵۵/۱ کیلوگرم در هکتار) میزان آن در منطقه پلدختر و سال ۱۳۸۹ بود (شکل ۴). همچنین از نظر تغییرات عملکرد آب محدود، عملکرد از ۳۴۷۳/۵ کیلوگرم در هکتار (منطقه الشتر و سال ۱۳۸۷) تا ۸۵۰۶/۲ کیلوگرم در هکتار (منطقه الیگودرز و سال ۱۳۸۵) متغیر بود در حالی که این تغییرات برای عملکرد نیتروژن محدود از ۲۹۵۲/۳ کیلوگرم در هکتار (در منطقه الشتر در سال

عملکردهای واقعی، قابل دستیابی، آب محدود و نیتروژن محدود در مناطق مختلف

بطور کلی عملکرد واقعی، قابل دستیابی، آب محدود و نیتروژن محدود در سراسر استان لرستان برابر با ۲۹۷۷/۳، ۷۱۷۹/۲، ۶۳۰۲/۷ و ۴۲۱۲/۵ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۴، ۵ و ۶). این عملکردها در بین مناطق و سال‌های مختلف بسیار متفاوت بودند به طوری که بیشترین عملکرد واقعی (۴۴۰۲/۲ کیلوگرم در هکتار) در منطقه کوه‌دشت در سال ۱۳۹۶ بود و کمترین (۱۳۶۰/۹ کیلوگرم در هکتار)

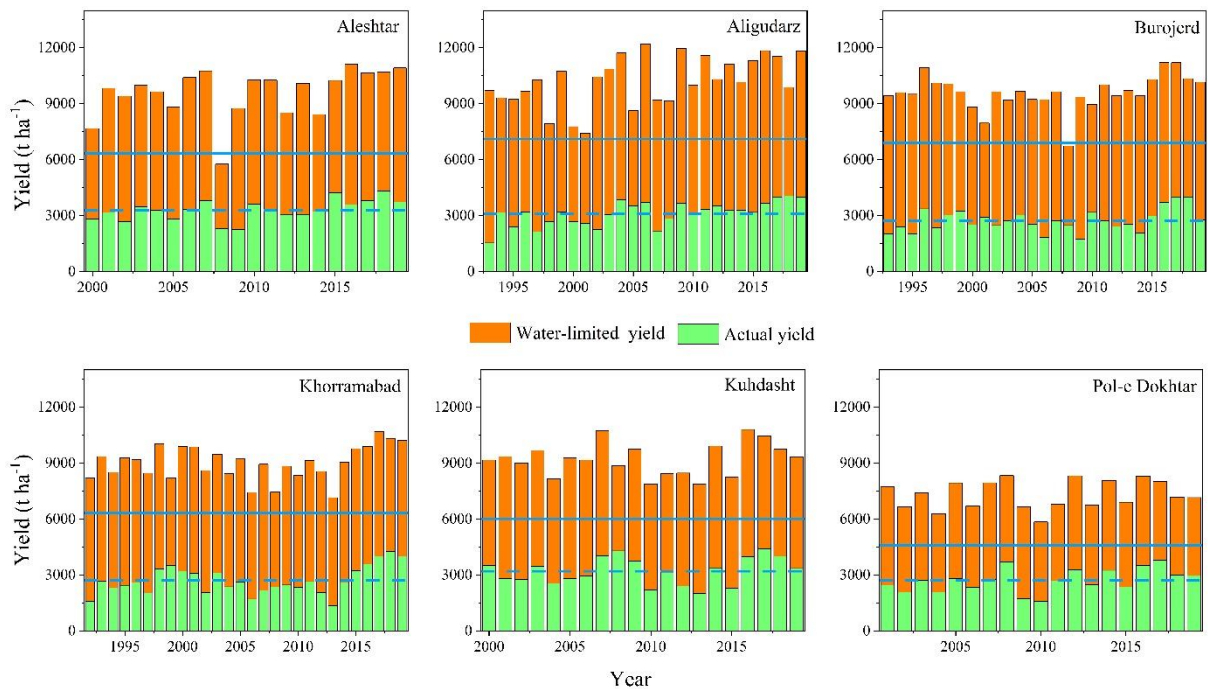
دستیابی به ترتیب برابر با ۸/۶ و ۱۰/۴ تن در هکتار می‌باشد (Chapagain & Good, 2015). تغییرات بالای بین مناطق و سال‌های مختلف می‌تواند مربوط به تغییرات فاکتورهای اقلیمی (دما، بارندگی و تشعشع) باشد. به عنوان مثال بالاترین و کمترین عملکرد قابل دستیابی در الیگودرز و پلدختر به دست آمد که به ترتیب بیشترین و کمترین دما را در طول فصل رشد دارند (جدول ۱). تغییرات بیشتر عملکرد آب محدود نسبت به عملکرد قابل دستیابی و نیتروژن محدود را می‌تواند به تاثیر بیشتر فاکتور آبیاری به نیتروژن دانست. بسیاری از گزارشات نیز نشان می‌دهند که تغییرات آب و بارندگی می‌توانند در عملکرد دانه محصولات زراعی بسیار بالا باشد (Rahimi-Moghdam et al., 2019, 2021).

(۱۳۸۷ تا ۴۷۱۵/۷ کیلوگرم در هکتار (منطقه خرم آباد در سال ۱۳۸۷ متغیر بود (شکل ۵ و ۶). بطور کلی در سراسر مناطق مختلف تغییرات در میزان عملکرد آب محدود (از ۴۷۲۲/۱ تا ۷۴۴۸/۲ کیلوگرم در هکتار) نسبت به عملکرد قابل دستیابی (از ۶۵۳۷/۵ تا ۷۹۸۲/۷ کیلوگرم در هکتار) و نیتروژن محدود (از ۳۸۵۰/۲ تا ۴۴۱۴/۵ کیلوگرم در هکتار) بسیار بیشتر بود (شکل ۴، ۵ و ۶). همانطور که در شکل ۴ مشخص می‌باشد عملکرد واقعی در استان برابر با ۲۹۷۷/۴ کیلوگرم در هکتار می‌باشد این در حالی است که عملکرد قابل دستیابی برابر با ۷۱۷۹/۲ و بنابراین نشان می‌دهد که در استان لرستان عملکرد پتانسیل بیشتر می‌باشد. این در حالی است که برای کشورهای دیگر نیز عملکردهای قابل دستیابی بالا می‌باشد. به عنوان مثال در کشورهای مانند چین و انگلستان عملکردهای قابل



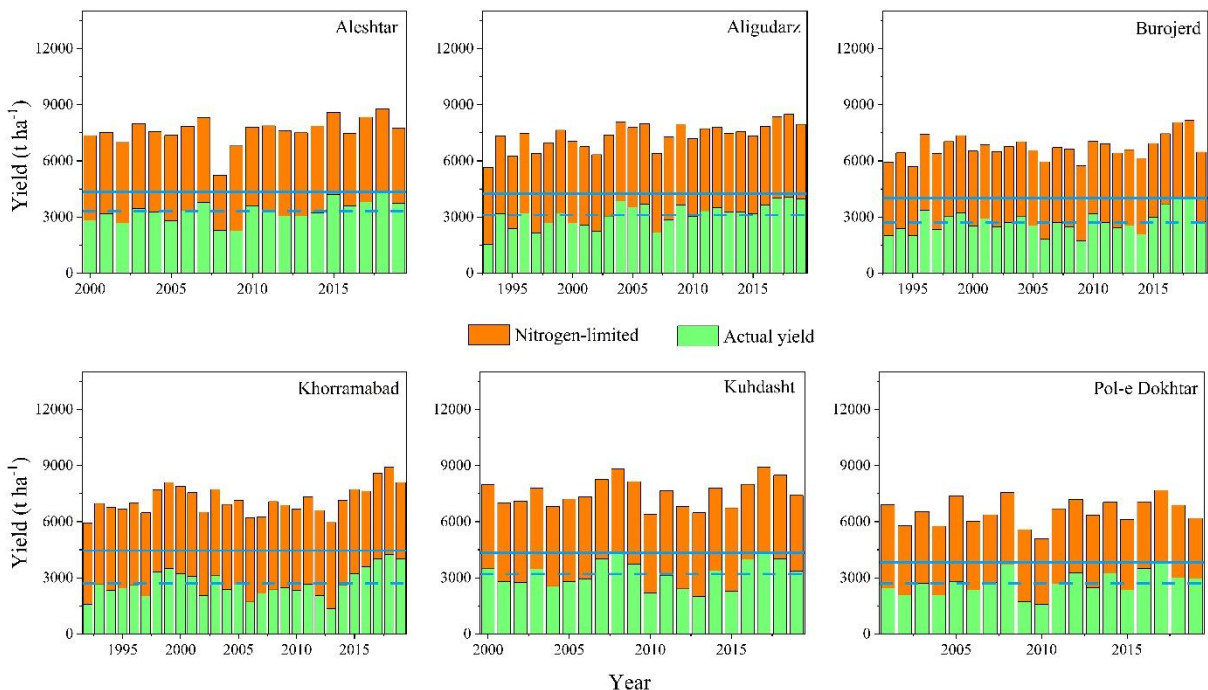
شکل ۴- عملکردهای واقعی و قابل دستیابی گندم در مناطق مورد مطالعه و سال‌های مختلف. توجه کنید که خط ممتد نشان دهنده میانگین عملکرد قابل دستیابی و خط چین میانگین عملکرد واقعی در سال‌های مورد مطالعه می‌باشد.

Fig. 4. Wheat actual and attainable yields in the study areas under different years. Note that the continuous and dashed lines represent the main attainable and actual yields in the study years, respectively.



شکل ۵- عملکردهای واقعی و آب محدود گندم در مناطق مورد مطالعه و سال‌های مختلف. توجه کنید که خط ممتد نشان دهنده میانگین عملکرد قابل دستیابی و خط چین بیانگر میانگین عملکرد واقعی در سال‌های مورد مطالعه می باشد.

Fig. 5. Wheat actual and water-limited yields in the study areas under different years. Note that the continuous and dashed lines represent the main attainable and actual yields in the study years , respectively.



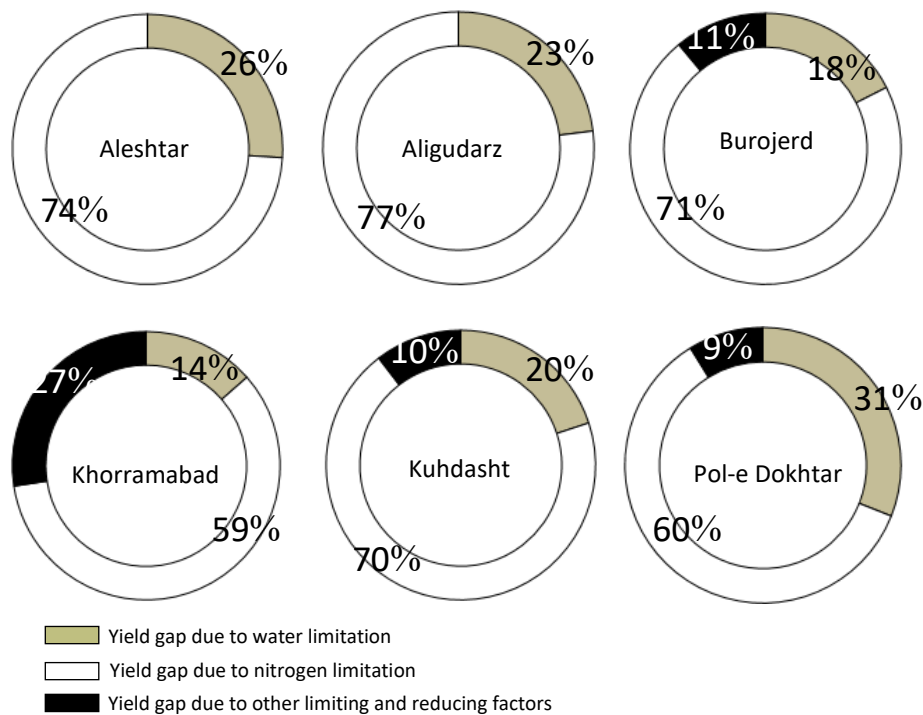
شکل ۶- عملکردهای واقعی و نیتروژن محدود گندم در مناطق مورد مطالعه و سال‌های مختلف. توجه کنید که خط ممتد نشان دهنده میانگین عملکرد قابل دستیابی و خط چین بیانگر میانگین عملکرد واقعی در سال‌های مورد مطالعه می باشد.

Fig. 6. Wheat actual and nitrogen-limited yields in the study areas under different years. Note that the continuous and dashed lines represent the main attainable and actual yields in the study years , respectively.

خألهای عملکرد در مناطق مختلف

نتایج نشان داد که خأ عملکرد در گندم آبی استان لرستان به مقدار قابل توجهی وجود دارد به طوری که در سراسر مناطق و سال‌های مورد بررسی میزان کل خأ عملکرد گندم آبی برابر با ۴۱۷۷/۵ کیلوگرم در هکتار می‌باشد (شکل ۴، ۵ و ۶). نتایج همچنین نشان داد که تغییرات زیادی در بین مناطق مختلف از لحاظ خأ کل در سطح استان لرستان وجود داشت به طوری که از ۲۶۶۱/۸ کیلوگرم در هکتار (پلدختر) تا ۵۶۰۸/۴ کیلوگرم در هکتار (الیگودرز) متغیر بود (شکل ۴، ۵ و ۶). همچنین از لحاظ سهم مدیریت‌های مختلف در خأ عملکرد کل تفاوت اساسی وجود داشت. به طور کلی در سراسر مناطق و سال‌های مورد بررسی سهم مدیریت نیتروژن، آب و سایر عوامل کاهنده و محدود کننده عملکرد در سطح استان برابر با ۶۸، ۲۲ و ۱۰ درصد بود

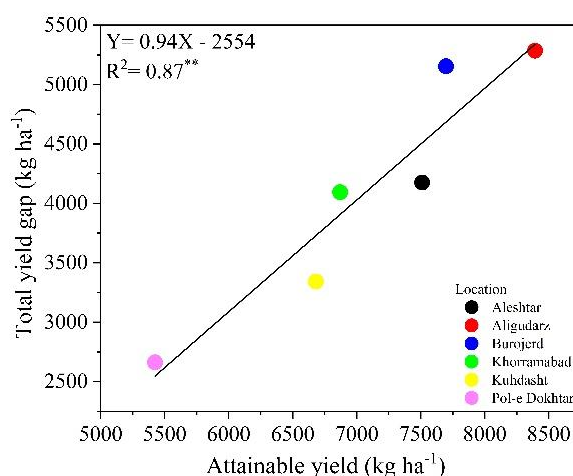
(شکل ۷). از لحاظ سهم مدیریت‌های مختلف در خأ عملکرد در مناطق مورد بررسی نیز تفاوت قابل توجهی وجود داشت. به عنوان مثال در زمینه خأ عملکرد آب محدود بالاترین میزان مربوط به شهرستان پلدختر (۳۱ درصد) و کمترین مقدار آن مربوط به شهرستان خرم‌آباد (۱۴ درصد) بود. برای خأ عملکرد نیتروژن محدود شهرستان الیگودرز بیشترین سهم (۷۷ درصد) را به خود اختصاص داد در حالی که کمترین سهم این محدودیت برای شهرستان خرم‌آباد (۵۹ درصد) به دست آمد. بیشینه سهم خأ عملکرد ناشی از سایر عوامل محدود کننده و کاهنده عملکرد نیز در منطقه خرم‌آباد (۲۷ درصد) ثبت گردید در حالی که کمترین مقدار آن در منطقه الیگودرز و الشتر (بدون محدودیت) محاسبه شد (شکل ۷).



شکل ۷- درصد خألهای عملکرد آب محدود، نیتروژن محدود و سایر عوامل محدود کننده و کاهنده در مناطق مختلف.

Fig. 7. The percentage of yield gaps caused by water limitation, nitrogen limitation, and other limiting and reducing factors in different locations.

نتایج مشخص نمود که عملکرد قابل دستیابی بالاتر منجر به خأ عملکرد بیشتر شد. آنالیز رگرسیون بین خأ عملکرد کل و عملکرد قابل دستیابی نشان داد که آن‌ها به طور معنی دار و مثبتی با یکدیگر رابطه دارند و عملکرد قابل دستیابی ۸۷ درصد از تغییرات مکانی را توجیه نمود (شکل ۸).



شکل ۸- رگرسیون بین خلأ عملکرد کل و عملکرد قابل دستیابی
Fig. 8. Regression between total yield gap and attainable yield

مرحله کاشت و همچنین زمان پنجه زنی بکار می‌برند بنابراین در مراحل انتهایی گیاه با تنش نیتروژن مواجه می‌شود و میزان عملکرد کاهش پیدا کند. کمبود نیتروژن در طول نمو سنبلچه می‌تواند موجب مرگ و میر تعدادی از سنبلچه‌ها شود. در تحقیقی نشان داده شد کمبود نیتروژن باعث کاهش سنبلچه‌ها می‌شود، همچنین کمبود نیتروژن در مرحله ساقه‌دهی و گلدهی باعث چروکیده شدن دانه‌ها و کاهش وزن هزار دانه از ۴۰ گرم به ۳۲ گرم می‌شود (Hiroshi et al., 2007). حجارپور و همکاران (Hajjarpoor et al., 2015) با بررسی خلأ عملکرد گندم آبی در گرگان گزارش کردند که مصرف بهینه کودهای نیتروژن باعث رفع ۲۵ درصد خلأ عملکرد می‌شود. خلأ عملکرد آب محدود، کمتر از نیتروژن بود که علت آن تعداد آبیاری بالا در مناطق مورد بررسی بود. البته در برخی از مناطق میزان آن نسبتاً بالا بود که علت آن مربوط به دمای منطقه مورد مطالعه بود. به عنوان مثال همانطور که در جدول ۱ دیده می‌شود تعداد آبیاری در شهرستان پلدختر در منطقه بروجرد بیشتر بود در حالی که در این منطقه میزان خلأ عملکرد آب محدود بیشتر بود که ناشی از دمای بالاتر منطقه پلدختر نسبت به بروجرد بود. در زمینه خلأ عملکرد ناشی از سایر عوامل محدود کننده و کاهنده کمترین میزان را در بین خلأهای عملکرد مختلف به خود اختصاص داد. با این وجود در برخی مناطق مقدار قابل توجهی را به خود اختصاص داد. بنابراین پرداختن

در واقع این موضوع نشان می‌دهد که مناطقی با عملکرد واقعی کمتر یا عملکرد قابل دستیابی بیشتر دارای خلأ عملکرد بیشتر و همچنین پتانسیل بیشتری برای افزایش تولید در شرایط حال حاضر را دارند. تغییرات مکانی از نظر خلأ عملکرد کل برای محصولات مختلف گزارش شده است. به عنوان مثال برای گیاه نخود ۵۰، ۲۸ و ۴۹ درصد خلأ عملکرد به ترتیب برای جنوب استرالیا (Mawalagedera et al., 2022)، مرکز هندوستان (Gireesh et al., 2019) و اتیوپی (van Loon et al., 2018) گزارش شده است. در مدل‌سازی پتانسیل و خلأ عملکرد گندم آبی در ایران گزارش شد که کشاورزان فقط ۳۸ درصد از عملکرد پتانسیل گندم آبی دست یافته‌اند و در همه‌ی مناطق کشور خلأ عملکرد ۶۲ درصد و در صورتی که کشاورزان در ایران با اعمال مدیریت زراعی مناسب در مزارع آبی بتوانند به ۸۰ درصد از عملکرد پتانسیل دست یابند، عملکرد این محصول به ۷ تن در هکتار خواهد رسید (Zahed et al., 2019). همانطور که نتایج نشان داد از نظر منابع مختلف خلأ عملکرد در سراسر مناطق، خلأ عملکرد ناشی از محدودیت نیتروژن بیشترین مقدار را داشت این خلأ بیشتر مربوط به توزیع نیتروژن بود. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود میزان کاربردی نیتروژن در مناطق مختلف کم نیست اما با توجه به اطلاعات به دست آمده از کشاورزان، بیشتر کشاورزان مناطق مورد مطالعه، نیتروژن کاربردی را در دو

زراعی گندم آبی لرستان عملکرد قابل دستیابی برابر با ۷۱۷۹/۲ است. این در حالی هست که کشاورزان در حال حاضر ۴۱ درصد عملکرد قابل دستیابی را تولید می‌کنند. به بیان دیگر، در حال حاضر خلاء عملکرد کل گندم آبی در بوم‌نظام‌های زراعی استان لرستان برابر با ۵۹ درصد می‌باشد. همچنین نتایج مشخص کرد که بیشترین سهم خلاء عملکرد کل مربوط به عدم کاربرد مدیریت بهینه کود نیتروژن می‌باشد که در صورت به کارگیری مدیریت بهینه کود نیتروژن، خلاء عملکرد کل در سطح همه‌ی مناطق مورد بررسی در استان لرستان به طور قابل توجهی کاهش پیدا خواهد کرد. نتایج بیان داشت که مدیریت بهینه آبیاری در مناطق گرم، اهمیت بیشتری در کاهش خلاء عملکرد دارد و در برخی مناطق مانند شهرستان خرم‌آباد مدیریت سایر عوامل کاهنده و محدود کننده عملکرد (علف‌های هرز، بیماری و آفات) می‌تواند نقش بسزایی در کاهش خلاء عملکرد کل داشته باشد.

به سایر عوامل مانند کنترل علف‌های هرز، آفات و بیماری‌ها و همچنین بهبود روش‌های مکانیزه کاشت و حاصلخیزی خاک می‌تواند به کاهش این خلاء عملکرد و به موازت آن کاهش خلاء عملکرد کل در منطقه خرم‌آباد کمک کند. خالقانی (2008, Khaleghani) گزارش کرد که عدم مدیریت مناسب علف‌های هرز در مزارع کشور منجر به کاهش ۲۳ درصدی عملکرد می‌شود. از طرفی دیگر شهبازی و بشارتی (2013, Shahbazi & Besharati) گزارش کردند که ۶۳ و ۴۲ درصد از اراضی کشاورزی کشور به ترتیب با کمبود موادآلی، فسفر و پتاسیم مواجه هستند.

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که مدل APSIM-wheat توانست رشد، نمو و عملکرد گیاه گندم آبی رقم چمران را تحت شرایط مختلف مدیریتی شامل تیمارهای آبیاری، نیتروژن و تاریخ کاشت را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند. نتایج نشان داد که در حال حاضر در بوم‌نظام‌های

References

- 1- Ahmed, M., Aslam, M.A., Asif, M., & Hayat, R. (2014). Use of APSIM to model nitrogen use efficiency of rain-fed wheat. *International Journal of Agriculture and Biology*, 16(3), 461-470.
- 2- Amiri, S., Eyni-Nargeseh, H., Rahimi-Moghaddam, S., & Azizi, K. (2021). Water use efficiency of chickpea agro-ecosystems will be boosted by positive effects of CO₂ and using suitable genotype× environment× management under climate change conditions. *Agricultural Water Management*, 252, 106928. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106928>.
- 3- Anonymous. (2017). *Agricultural Statistics*. Department of Planning and Economy. Information and Communication Center. Ministry of Agriculture Jihad, Iran. (In Persian).
- 4- Archontoulis, S.V., Miguez, F.E., & Moore, K.J. (2014). Evaluating APSIM maize, soil water, soil nitrogen, manure, and soil temperature modules in the Midwestern United States. *Agronomy Journal*, 106(3), 1025-1040.
- 5- Baygi, Z., Saifzadeh, S., Shirani Rad, A.H., Valadabadi, S.A., & Jafarnejad, A. (2017). Investigating the effects of sowing date on growth indices and yield and yield components of spring wheat cultivars in Neyshabur. *Applied Research in Field Crops*, 30 (2), 1-18. (In Persian with English abstract)
- 6- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., & Bussière, F. (2003). An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18 (3-4), 309-32. [https://doi.org/10.1016/s1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/s1161-0301(02)00110-7).
- 7- Chapagain, T., & Good, A. (2015). Yield and production gaps in rainfed wheat, barley, and canola in Alberta. *Frontiers in Plant Science*, 6, 990. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00990>.
- 8- Deihimfard, R., Nassiri Mahallati, M., & Koocheki, A. 2015. Yield gap analysis in major wheat growing areas of Khorasan province, Iran, through crop modeling. *Field Crops Research*, 184, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.09.002>.
- 9- Deihimfard, R. 2011. Analysis of yield gaps of wheat and sugarbeet in Khorasan province using simulation modelling. In: Ph.D. Dissertation. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. 181 p. (In Persian with English abstract).

- 10- Enayatgholizadeh, M.R., Fathi, G., & Razaz, M. (2011). Evaluation grain yield and yield component of three wheat cultivars to drought stress and different levels of nitrogen. *Journal of Crop Ecophysiology*, 5 (17), 1-14. (In Persian with English abstract).
- 11- Espe, M.B., Cassman, K.G., Yang, H., Guilpart, N., Grassini, P., Van Wart, J., Anders, M., Beighley, D., Harrell, D., Linscombe, S., & McKenzie, K. (2016). Yield gap analysis of US rice production systems shows opportunities for improvement. *Field Crops Research*, 196, 276-283. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.011>
- 12- Gaydon, D.S., Wang, E., Poulton, P.L., Ahmad, B., Ahmed, F., Akhter, S., Ali, I., Amarasingha, R.P., Chaki, A.K., Chen, C., & Choudhury, B.U. (2017). Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. *Field Crops Research*, 204, 52-75.
- 13- Gireesh, S., Kumbhare, N.V., Nain, M.S., Kumar, P., & Gurung, B. (2019). Yield gap and constraints in production of major pulses in Madhya Pradesh and Maharashtra. *Indian Journal of Agricultural Research*, 53(1), 104-107. <https://doi.org/10.18805/ijare.a-5067>
- 14- Hajjarpoor, A., Soltani, A., & Torabi, B. (2015). Using boundary line analysis in yield gap studies: Case study of wheat in Gorgan. *Journal of Crop Production*, 8, 183-201. (In Persian with English abstract).
- 15- Hiroshi, N., Satoshi, M., & Kusuda, O. (2007). Effect of nitrogen application rate and timing on grain yield and protein content of the bread cultivar in south western Japan. *Plant Production Science*, 11, 151-157. <https://doi.org/10.1626/pp.s.11.151> .
- 16- Hochman, Z., Carberry, P.S., Robertson, M.J., Gaydon, D.S., Bell, L.W., & McIntosh, P.C. (2013). Prospects for ecological intensification of Australian agriculture. *European Journal of Agronomy*, 44, 109-123. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.11.003> .
- 17- Hochman, Z., Gobbett, D., Holzworth, D., McClelland, T., van Rees, H., Marinoni, O., Garcia, J.N., & Horan, H. (2012). Quantifying yield gaps in rainfed cropping systems: A case study of wheat in Australia. *Field Crops Research*, 136, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.008> .
- 18- Holzworth, D.P., Huth, N.I., deVoil, P.G., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E.J., Snow, V., Murphy, C., & Moore, A.D. (2014). APSIM–evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software*, 62, 327-50.
- 19- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N., Meinke, H., Hochman, Z., & McLean, G. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18 (3), 267-288. [https://doi.org/10.1016/s1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/s1161-0301(02)00108-9) .
- 20- Khaleghani, J. (2008). Assessing the weed damage to wheat fields. Final report of the research project. Iranian Research Institute of Plant Protection. 101 p. (In Persian with English abstract).
- 21- Kpongor, D.S. (2007). Spatially explicit modeling of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) production on complex terrain of a semi-arid region in Ghana using APSIM. Ph.D. Dissertation. Universitäts-und Landesbibliothek Bonn, Germany.
- 22- Lobell, D.B., Cassman, K.G., & Field, C.B. (2009). Crop yield gaps: Their importance, magnitudes and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34, 179-204. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.041008.093740> .
- 23- Madani, A., Makarem, A.H., Vazin, F., & Joudi, M. (2012). The impact of post-anthesis nitrogen and water availability on yield formation of winter wheat. *Plant, Soil and Environment*, 58(1), 9-14. <https://doi.org/10.17221/299/2011-pse> .
- 24- Mawalagedera, S.M.M.R., Nigussie, T., McMurray, L., Walelea, C., & Brand, J.D. (2022). Yield gap of winter pulses in South Eastern Australia. Proceedings of the 20th Australian Agronomy Conference, 18-22 September 2022, Toowoomba, Qld, Australia.
- 25- Mendenhall, W., Sincich, T., & Boudreau, N.S. (1996). *A Second Course in Statistics: Regression Analysis* (Vol. 6). Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey.
- 26- Mokhtassi- Bidgoli, A. (2013). Quantifying the population dynamics of flaxweed (*Descurainia sophia*) in bread wheat under different water and nitrogen regimes. Ph.D. Dissertation, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, pp. 184 p. (In Persian with English abstract).
- 27- Prescott, J.A. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 6, 114-118 .

- 28- Rahimi-Moghaddam, S., Deihimfard, R., Azizi, K., & Roostaei, M. (2021). Characterizing spatial and temporal trends in drought patterns of rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) across various climatic conditions: A modelling approach. *European Journal of Agronomy*, 129, 126333. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126333>
- 29- Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J., & Deihimfard, R. (2018). Adaptation strategies to lessen negative impact of climate change on grain maize under hot climatic conditions: A model-based assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.032> .
- 30- Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J., & Deihimfard, R. (2019). Optimal genotype× environment× management as a strategy to increase grain maize productivity and water use efficiency in water-limited environments and rising temperature. *Ecological Indicators*, 107, 105570. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105570> .
- 31- Reddy, K.R., & Hodges, H.F. (2000). Climate change and global crop productivity. *Biologia Plantarum*, 43, 1-5. <https://doi.org/10.1079/9780851994390.0001> .
- Sarlio-Lahteenkorva, S., & Lahelma, E. (2008). Food insecurity is associated with past and present economic disadvantage and body mass index. *Journal of Food and Nutrition*, 131, 2880-2884. <https://doi.org/10.1093/jn/131.11.2880>.
- 33- Saxton, K.E., & Willey, P.H. (2006). The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. *Watershed Models*, 401-435. <https://doi.org/10.1201/9781420037432-29> .
- 34- Seifert, E. (2014). OriginPro 9.1: Scientific data analysis and graphing software—Software review. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 54(5), 1552–1552. <https://doi.org/10.1021/ci500161d> .
- 35- Shahbazi, K., & Besharati, H. (2013). Overview of agricultural soil fertility status of Iran. *Land Management Journal I*: 1-15. (In Persian with English abstract).
- 36- van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research*, 143, 4-17.
- 37- van Loon, M.P., Deng, N., Grassini, P., Rattalino, E., Juan, I., Wolde-meskel, E., Bajjukya, F., Marrou, H., & van Ittersum, M.K. (2018). Prospect for increasing grain legume crop production in East Africa. *European Journal of Agronomy*, 101, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009> .
- 38- van Wart, J., van Bussel, L.G., Wolf, J., Licker, R., Grassini, P., Nelson, A., Boogaard, H., Gerber, J., Mueller, N.D., Claessens, L., & van Ittersum, M.K. (2013). Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Research*, 143, 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009> .
- 39- Wallach, D., & Goffinet, B. (1987). Mean squared error of prediction in models for studying economic and agricultural systems. *Biometrics*, 43 561–576. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.09.004> .
- 40- Willmott, C.J. & Matsuura, K. (2005) Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30, 79-82. <http://dx.doi.org/10.3354/cr030079>
- 41- Willmott, C.J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, 1309–1313. <https://doi.org/10.2307/2531995> .
- 42- Zahed, M., Soltani, A., Zeinali, E., Torabi, B., Zand, E., & Alimaghani, S. (2019). Modeling of irrigated wheat yield potential and gap in Iran. *Journal of Crop Production*, 12(3), 35-52. (In Persian with English abstract).