

Filling the yield gap caused by some agronomic factors in some of the major climatic zones of irrigated barley in Iran using modelling approach

Mohammad Reza Rahimi¹, Reza Deihimfard^{*2}, Omid Noori³

1. Ph.D. Student in Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Iran. E-mail: rahimi_mr61@yahoo.com
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Iran. E-mail: deihim@sbu.ac.ir
3. Assistant Prof., Dept. of Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Iran. E-mail: nouri.omid@gmail.com

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 01.21.2024

Revised: 01.31.2024

Accepted: 04.04.2024

Keywords:

APSIM,
Cultivar,
Exploitable yield,
GYGA,
Irrigation

ABSTRACT

Background and Objectives: Following wheat, barley is the second most important cereal grain in Iran and plays an important role in livestock and poultry nutrition. To feed the growing population, cereal production should be increased noticeably in the coming years. One of the ways to increase production is to reduce the existing yield gap. Considering the average yield of about 3 t ha⁻¹ in the country and the existence of a large gap compared to the exploitable yield, this study was conducted to identify and quantify some of the factors affecting irrigated barley yield in the major barley-growing areas of Iran.

Materials and Methods: In this study, the APSIM model was employed to simulate exploitable, water-limited, sowing date-limited, and cultivar-limited yields. The data required for running the model included the long-term weather data (from 1989 to 2019 for 30 years) of the studied areas obtained from the Iran Meteorological Organization, the soil data which were extracted from the HC27 soil database, and management data obtained from some questionnaires filled out by farmers of the study areas. The main zones of irrigated barley cultivation in the country and the farmer's actual yield in these areas were determined using the statistics of the Ministry of Agriculture. Finally, by calculating the types of yield gaps at different production levels, the impact of limitation in water, sowing date, and cultivar on yield gap was determined.

Results: The results showed that the exploitable yield gap in the studied zones was an average of 4.4 t ha⁻¹, equivalent to 56.4% of the exploitable yield. The average of water-limited, sowing date-limited, and cultivar-limited yield gaps were estimated as 1.4, 0.5, and 0.16 t ha⁻¹ in the studied zones, respectively. The other agronomic yield gap with 2.3 t of yield reduction had the largest share of the exploitable yield gap. The highest increase in yield due to the change of sowing date was observed in Kabudarahang (8%) and the lowest one was simulated in Sabzevar (3%). The simulation results showed that three times more irrigation in Arak, Kabudarahang, and Hamedan and two times more in other studied zones is necessary to fill the water-limited yield gap. Cultivar-limited yield gap was

observed only in three locations of Shiraz, Marvdasht, and Sabzevar (on average, 3.6% of exploitable yield gap). This type of yield gap could be compensated by replacing the Bahman cultivar with Reyhan.

Conclusion: Our results approved that the exploitable yield gap in the studied areas varied from 3.9 to 5 t ha⁻¹. About 32% of the exploitable yield gap in the studied zones was due to the water-limited yield gap and around 11% of the yield gap was owing to the sowing date-limited yield gap. Cultivar-limited yield gap also had the lowest share of the exploitable yield gap with 3.6%. The greater proportion of the exploitable yield gap (around 53%) was owing to other limiting and reducing factors such as pests, diseases, weeds, soil salinity, soil compaction, improper nutrition, unfavorable density, and other socio-economic factors. The results of this study showed that with a slight change in the sowing date, increasing the number of irrigation and improving irrigation management, and using appropriate cultivars, a significant increase in barley yield is achievable in the studied locations and close the yield gap to the self-sufficiency level in barley production in Iran.

Cite this article: Rahimi, Mohammad Reza, Deihimfard, Reza, Noori, Omid. 2025. Filling the yield gap caused by some agronomic factors in some of the major climatic zones of irrigated barley in Iran using modelling approach. *Journal of Plant Production Research*, 31 (4), 137-157.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/JOPP.2024.22086.3110

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

پر کردن خلاء عملکرد ناشی از برخی عوامل زراعی در تعدادی از پهنه‌های اقلیمی اصلی کشت جو آبی در ایران با رویکرد مدل‌سازی

محمد رضا رحیمی^۱، رضا دیهیم‌فرد^{۲*}، امید نوری^۳

۱. دانشجوی دکتری آگرواکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، ایران. رایانامه: rahimi_mr61@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه آگرواکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، ایران. رایانامه: deihim@sbu.ac.ir
۳. استادیار گروه آگرواکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، ایران. رایانامه: nouri.omid@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: جو بعد از گندم دومین غله مهم در ایران می‌باشد و نقش مهمی در تغذیه دام و طیور دارد. برای تغذیه جمعیت رو به رشد، تولید غلات باید افزایش قابل‌توجهی طی سالیان آتی داشته باشد. یکی از راه‌های افزایش تولید، کاستن از خلاء عملکرد موجود می‌باشد. با توجه به میانگین عملکرد حدود سه تن در هکتار کشور و وجود شکاف زیاد عملکرد در مقایسه با عملکرد قابل بهره‌برداری، این مطالعه برای شناسایی و کمی کردن برخی عواملی که باعث ایجاد خلاء عملکرد در جو آبی در مناطق غالب کشت جو در ایران می‌شود، انجام شد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۶	
واژه‌های کلیدی: آبیاری، رقم، عملکرد قابل بهره‌برداری، APSIM GYGA	مواد و روش‌ها: این مطالعه در سال ۱۴۰۰ انجام شد. در این مطالعه برای شبیه‌سازی عملکردهای قابل بهره‌برداری، آب محدود، تاریخ کشت محدود و رقم محدود از مدل APSIM که قبلاً برای جو آبی کالیبره شده بود استفاده شد. داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی مدل شامل داده‌های بلندمدت هواشناسی (۱۳۶۸ تا ۱۳۹۸ به مدت ۳۰ سال) که از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد و اطلاعات مربوط به خاک مناطق مورد مطالعه از نتایج مطالعات سایر پژوهش‌گران به دست آمد. داده‌های مدیریتی مورد نیاز برای شبیه‌سازی نیز از کشاورزان مناطق مورد مطالعه از طریق پرسشنامه به دست آمد. پهنه‌های اصلی کشت جو آبی در کشور و عملکردهای واقعی کشاورزان در این مناطق با استفاده از آمارهای وزارت جهاد کشاورزی مشخص شد. در نهایت با محاسبه انواع خلاء عملکرد در سطوح مختلف تولید میزان تأثیر محدودیت آب، تاریخ کشت و رقم بر خلاء عملکرد مشخص شد.
	یافته‌ها: نتایج نشان داد که خلاء عملکرد قابل بهره‌برداری در پهنه‌های مورد مطالعه به‌طور میانگین ۴/۴ تن در هکتار بود که معادل ۵۶/۴ درصد از عملکرد قابل بهره‌برداری است. میانگین خلاء عملکرد آب محدود، تاریخ کشت محدود و رقم محدود به ترتیب در پهنه‌های مورد

مطالعه ۱/۴، ۰/۵ و ۰/۱۶ تن در هکتار برآورد شد. در حالی که خلاء عملکرد سایر عوامل زراعی با ۲/۳ تن کاهش عملکرد بیشترین سهم را از خلاء عملکرد قابل بهره‌برداری داشت. بیشترین افزایش عملکرد در اثر تغییر تاریخ کشت در کیودرآهنگ به مقدار ۸ درصد و کمترین افزایش در سبزوار به مقدار ۳ درصد به دست آمد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که ۳ نوبت آبیاری بیش‌تر در اراک، کیودرآهنگ و همدان و در سایر مناطق مورد مطالعه نیز ۲ نوبت آبیاری بیش‌تر برای پر کردن خلاء عملکرد آب محدود لازم می‌باشد. خلاء عملکرد رقم محدود فقط در سه منطقه شیراز، مرودشت و سبزوار مشاهده شد (به‌طور میانگین ۳/۶ درصد از خلاء عملکرد قابل بهره‌برداری) که البته با جایگزینی رقم ریحان با رقم بهمن این میزان خلاء قابل جبران می‌باشد.

نتیجه‌گیری: خلاء عملکرد قابل بهره‌برداری در پهنه‌های مورد مطالعه از ۳/۹ تا ۵ تن در هکتار متغیر بود. حدود ۳۲ درصد از خلاء عملکرد قابل بهره‌برداری در پهنه‌های مورد مطالعه مربوط به خلاء عملکرد آب محدود و حدود ۱۱ درصد مربوط به خلاء عملکرد تاریخ کشت محدود بود. خلاء عملکرد رقم محدود نیز با ۳/۶ درصد کم‌ترین سهم را از خلاء عملکرد قابل بهره‌برداری داشت. بخش عمده خلاء عملکرد قابل بهره‌برداری به میزان حدود ۵۳ درصد ناشی از سایر عوامل محدودکننده و کاهنده عملکرد از جمله آفات، بیماری‌ها، علف‌های هرز، شوری خاک، فشردگی خاک، تغذیه نامناسب، تراکم نامطلوب و دیگر عوامل اقتصادی-اجتماعی بود. نتایج این مطالعه نشان داد که با اندک تغییری در تاریخ کشت، افزایش دفعات و بهبود مدیریت آبیاری و استفاده از ارقام مناسب می‌توان عملکرد جو را در پهنه‌های مورد مطالعه به‌طور قابل توجهی افزایش داد و به خودکفایی در تولید این محصول نزدیک‌تر شد.

استناد: رحیمی، محمدرضا، دهبیم‌فرد، رضا، نوری، امید (۱۴۰۳). پر کردن خلاء عملکرد ناشی از برخی عوامل زراعی در تعدادی از پهنه‌های اقلیمی اصلی کشت جو آبی در ایران با رویکرد مدل‌سازی. نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی، ۳۱ (۴)، ۱۵۷-۱۳۷.

DOI: 10.22069/JOPP.2024.22086.3110



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

جو سازگاری اکولوژیکی گسترده‌ای در بین غلات دارد (۱)، با مناطق خشک و نیمه خشک سازگار می‌باشد (۲)، در مقایسه با سایر محصولات زراعی نیازهای محیطی و نهاده‌های کم‌تری نیاز دارد و مدیریت آن آسان‌تر و کشت آن از نظر اقتصادی سودمند است (۳). جو بعد از گندم با حدود ۲ میلیون هکتار و تولید سالانه ۳ میلیون تن (میانگین ۵ ساله از ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲) بیش‌ترین سطح زیر کشت را در بین محصولات زراعی کشور دارد (۴). با این‌حال، این میزان تولید جو نمی‌تواند نیاز کشور را برای مصارف مختلف برآورده کند، زیرا میانگین عملکرد کشاورزان ۲/۹ تن در هکتار (میانگین آمار ۱۰ ساله از ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۹) می‌باشد و اختلاف قابل‌توجهی با حداکثر عملکرد قابل حصول دارد.

پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ جمعیت جهان ۳۵ درصد افزایش یابد که در نتیجه تولید غذا نیز ۷۰ تا ۱۰۰ درصد باید افزایش یابد (۵). بر این اساس تولید غلات باید ۵۰ درصد یا حتی بیش‌تر طی ۵۰ سال آینده افزایش یابد تا پاسخگوی تقاضای رو به رشد مواد غذایی باشد (۶). از سوی دیگر، افزایش تولید منجر به فشار بیش‌تر بر منابع آب و خاک و افزایش ردپای محیط‌زیستی^۱ خواهد شد (۷). بنابراین، نیاز مبرم به توسعه سیستم‌های تولید کشاورزی با کارایی و پایداری بالا برای تغذیه جمعیت رو به رشد وجود دارد (۷). یکی از راهبردهای امیدوارکننده برای کمک به حل این نگرانی، کاهش خلاء عملکرد محصولات عمده زراعی از طریق بهبود ژنتیک، مدیریت بهینه محصول و سازگاری گیاهان زراعی با محیط‌های هدف است (۸). به اختلاف بین عملکردهای واقعی در مقابل

عملکرد پتانسیل که تحت شرایط مطلوب مدیریتی به‌دست می‌آید خلاء عملکرد گفته می‌شود (۹). تخمین خلاء عملکرد در سطح مزرعه نیازمند مقایسه عملکرد واقعی کشاورزان با عملکرد پتانسیل برآورد شده می‌باشد. عملکرد پتانسیل^۲ در واقع حداکثر عملکرد به‌دست آمده یک رقم در محیط معین و تحت شرایط مطلوب و یا بدون محدودیت‌های رشد مثل آب، مواد غذایی، آفات یا بیماری‌ها می‌باشد (۱۰). تجزیه و تحلیل خلاء عملکرد، تخمینی کمی از امکان افزایش ظرفیت تولید غذا در یک ناحیه مشخص را فراهم می‌آورد که در طراحی راهبردهای تأمین غذا بسیار مهم می‌باشد (۵). بیزا و همکاران (۲۰۱۷) عوامل مؤثر بر خلاء عملکرد را به عوامل اقلیمی (تابش، دما، بارش و ...)، عوامل مرتبط با خاک (نوع خاک، حاصلخیزی خاک، آب و شیب خاک و ...)، عوامل مدیریتی (کوددهی، آبیاری، تاریخ کشت و ...)، ویژگی‌های مزرعه (اندازه، درآمد و ...) و عوامل اجتماعی و اقتصادی (عوامل نهادی، جمعیتی و تکنیکی) دسته‌بندی کردند (۱۶).

لیو و همکاران (۲۰۱۶) در تجزیه و تحلیل خلاء عملکرد ذرت در شمال شرقی چین، خلاء عملکرد کل را ۶۴ درصد برآورد کردند که ۴۰ درصد از آن مربوط به عوامل زراعی بود (۱۱). چاپاگین و گود (۲۰۱۵) در بررسی خلاء عملکرد جو دیم در آلبرتا کانادا خلاء عملکرد مربوط به ژنتیک و رطوبت را به‌ترتیب ۱۲ و ۳۲ درصد برآورد کردند (۸). مقدار ۱/۹ تن در هکتار از کاهش عملکرد پتانسیل گندم در مناطق اصلی کشت گندم در چین مربوط به محدودیت دسترسی به آب بود (۷). در مطالعه‌ای دیگر در آرژانتین مشخص شد که بهترین بازه زمانی برای کشت سویا از اوایل تا اواخر ماه دسامبر بود و

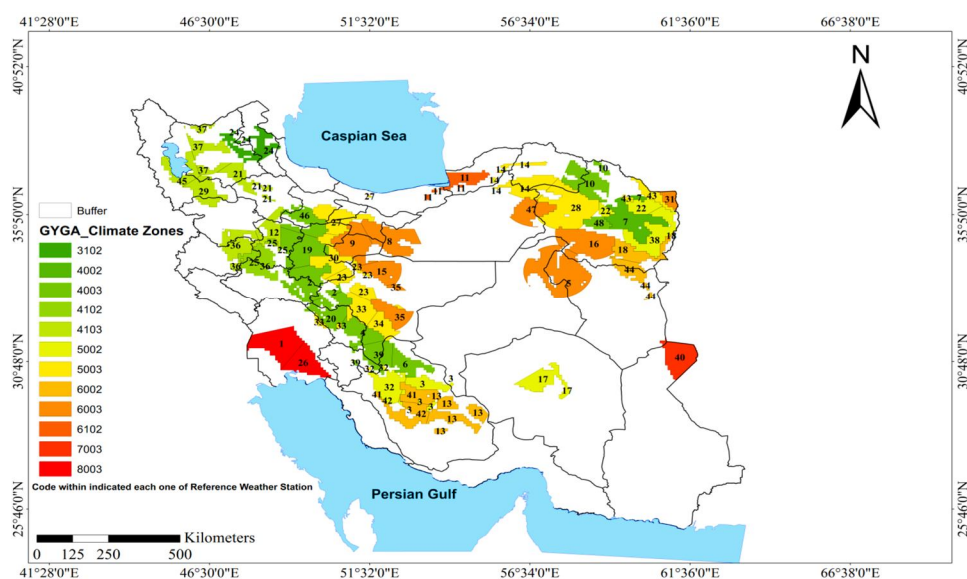
تعیین پهنه‌های اقلیمی هر منطقه از نتایج مطالعه استی و همکاران (۲۰۲۲) استفاده شد که با استفاده از روش اقلیمی گیگا^۱ برای ایران، انجام شده است (۱۷) (شکل ۱). در این طبقه‌بندی اقلیمی، پهنه‌ها بر مبنای سه مؤلفه اصلی اقلیمی شامل درجه روز رشد با دمای پایه صفر درجه سانتی‌گراد، شاخص خشکی و نوسانات دمایی تفکیک می‌شوند (۱۸). بر این اساس، این مطالعه در پنج پهنه ۴۱۰۳، ۵۰۰۲، ۵۰۰۳ و ۶۰۰۲ از ۱۲ پهنه موجود در کشور، انجام شد (شکل ۱ و جدول ۱). کدهای پهنه‌بندی گیگا هر کدام معنای خاص خود را دارند. برای مثال کد ۴۱۰۲ نشان‌دهنده این است که مؤلفه درجه روز رشد (GDD) در کلاس ۴۰۰۰ (دامنه ۳۷۹۲-۴۸۲۹)، شاخص خشکی در کلاس ۱۰۰ (دامنه ۰/۳۸۹۳-۰/۲۶۹۶) و نوسانات دمایی در کلاس ۲ (دامنه ۸/۳۵۵-۳/۸۳۳) قرار دارد. به عبارت دیگر از جمع کلاس‌های تعیین شده توسط گیگا برای هر سه متغیر در یک منطقه کد پهنه آن به دست می‌آید (۴۱۰۲ = ۴۰۰۰ + ۱۰۰ + ۲).

۴۳ کیلوگرم در هکتار در روز کاهش عملکرد به‌زای هر روز تاخیر در کاشت نسبت به تاریخ مذکور مشاهده شد (۱۲). معادل ۱۹/۸ درصد از خلاء عملکرد ذرت در چین مربوط به انتخاب رقم نامناسب گزارش شد (۱۳). خلاء عملکرد مربوط به تاریخ کشت نامناسب در چغندر قند در شهرستان‌های مختلف استان خراسان رضوی از ۵ تا ۲۳ درصد از خلاء عملکرد کل برآورد شد؛ در حالی که خلاء مربوط به کمبود آب از ۱۱ تا ۵۹ درصد در شهرستان‌های مذکور متغیر بود (۱۴). خلیق و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه نظام کشت گندم و برنج در پنجاب پاکستان گزارش کردند که تاریخ کاشت فعلی برای واریته‌های موجود مشکل‌ساز است، به‌طوری‌که تاریخ کاشت بهینه برنج تا یک ماه دیرتر از تاریخ‌های فعلی است، اما تاریخ کاشت بهینه گندم یک ماه (یا بیشتر) زودتر از تاریخ‌های فعلی است (۱۵).

مطالعات اندکی در سطح ملی در مورد ارزیابی خلاء عملکرد جو و عوامل مؤثر بر آن در ایران وجود دارد. بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف تعیین خلاء‌های مختلف عملکرد در بخشی از پهنه‌های (کلاس) اقلیمی اصلی کشت جو در کشور و تحلیل عوامل مؤثر بر آن با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: این مطالعه در سال ۱۴۰۰ انجام شد. مطابق آخرین آمار منتشر شده از طرف وزارت جهاد کشاورزی، تعدادی از مناطق اصلی کشت جو بر مبنای سطح زیر کشت استخراج شد تا وضعیت خلاء عملکرد در آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. برای



شکل ۱- پهنه‌بندی مناطق اقلیمی اصلی کشت جو آبی در ایران (۱۹).

مطالعه حاضر در پهنه‌های ۴۱۰۲، ۴۱۰۳، ۵۰۰۲، ۵۰۰۳ و ۶۰۰۲ انجام شد. برای اطلاعات بیشتر در خصوص ویژگی‌های هر پهنه به جدول ۱ رجوع شود. اعداد داخل نقشه نشان‌دهنده ایستگاه‌های هواشناسی مرجع در پهنه‌ها می‌باشد.

Fig. 1. Zoning of the main climatic zones of irrigated barley in Iran (19).

The present study was conducted in zones 4102, 4103, 5002, 5003, and 6002. For more information about the characteristics of each zone, refer to Table 1. The numbers inside the map indicate the meteorological stations in the zones.

جدول ۱- مختصات جغرافیایی، اقلیمی و خاکی پهنه‌های مورد مطالعه.

Table 1. Geographical, climatic and soil characteristics of the studied zones.

کد خاک بر مبنای HC27 Soil code based on HC27	نوسان دمایی Temperature Seasonality	شاخص خشکی Aridity Index	واحد دمایی GDD Growing Degree Days	محتوای رطوبت در دسترس گیاه (mm) Plant available water content	میانگین بلندمدت بارندگی سالانه (mm) Long-term average annual rainfall	میانگین بلندمدت دمای سالانه (°C) Long-term average annual temperature	سطح زیر کشت (ha) Area	پهنه‌های مورد مطالعه بر اساس GYGA کد The studied zones based on GYGA code
5	3.383 تا 8.355	0.2696 تا 0.389	3792 تا 4829	171	307	11.5	27223	4102
5	> 8.356	0.2696 تا 0.3893	3792 تا 4829	171	310	10.9	43060	4103
14, 8	3.383 تا 8.355	0 تا 0.2695	4830 تا 5949	149	273	16	71515	5002
17, 8, 5	> 8.356	0 تا 0.2695	4830 تا 5949	156	228	16.8	160023	5003
5	3.383 تا 8.355	0 تا 0.2695	5950 تا 7111	171	329	18.0	42465	6002

^۱ برای مشاهده مناطق مورد مطالعه در هر پهنه، به شکل ۱ رجوع شود. ^۲ واحد دمایی بر اساس دمای پایه صفر درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است. ^۳ شاخص خشکی برابر با نسبت بارندگی سالانه بر پتانسیل تبخیر سالانه. ^۴ مقدار انحراف معیار دمای ماهانه از متوسط دمای سالانه (برای اطلاعات بیشتر به منبع ۲۰ مراجعه کنید). ^۵ کد خاک ۵: خاک رسی، حاصلخیزی متوسط، عمق ۱۲۰ سانتی‌متر؛ کد خاک ۸: خاک رسی، حاصلخیزی کم، عمق ۱۲۰ سانتی‌متر؛ کد خاک ۱۴: خاک لومی، حاصلخیزی متوسط، عمق ۱۲۰ سانتی‌متر؛ کد خاک ۱۷: خاک لومی، حاصلخیزی کم، عمق ۱۲۰ سانتی‌متر (برگرفته از منبع ۲۱)

^۱ Refer to Fig 1 to see the studied areas in each zone. ^۲ Growing Degree Days is calculated according to the base temperature of 0 °C. ^۳ The aridity index is the ratio of annual rainfall to annual potential evaporation. ^۴ Standard deviations of the monthly temperature compared to the average annual temperature (20). ^۵ Soil code 5: clay soil, medium fertility, depth 120 cm; soil code 8: clay soil, low fertility, depth 120 cm; soil code 14: loamy soil, medium fertility, depth 120 cm; soil code 17: loamy soil, low fertility, depth 120 cm (21)

پرسش‌نامه‌هایی که توسط کشاورزان تکمیل شده بود و همچنین از مراکز تحقیقات کشاورزی در مناطق مورد مطالعه به دست آمد. این داده‌ها شامل، نوع رقم مورد استفاده توسط کشاورزان، تراکم، روش کاشت، تاریخ کاشت و برداشت، زمان و مقدار آبیاری، نوع و مقدار کودهای استفاده شده و سایر شرایط مدیریتی بود. اطلاعات به دست آمده از پرسش‌نامه علاوه بر این که به عنوان ورودی مدل APSIM در نظر گرفته شد، در تجزیه و تحلیل خلاء عملکرد نیز استفاده شدند.

برای شاخصه‌های خاک مناطق مورد مطالعه از نقشه پروفیل خاک HC27 استفاده شد که در مطالعه نهبندانی و همکاران (۲۰۲۰) برای مناطق مختلف ایران تخمین زده شده است (۲۱). در نقشه پروفیل HC27، سه پارامتر اصلی خاک که مورد نیاز مدل می‌باشد (LL^1 , DUL^2 , SAT^3) بر اساس بافت خاک، خاک، عمق ریشه و محتوای کربن آلی خاک تخمین زده می‌شود. در مجموع از ۲۷ نوع خاک موجود در HC27 فقط چهار نوع خاک در مناطق مورد مطالعه وجود داشت (جدول ۱).

سناریوهای شبیه‌سازی خلاء عملکرد: به منظور تجزیه و تحلیل خلاء عملکرد در پهنه‌های مورد مطالعه، عملکرد جو در سطوح مختلف شامل عملکرد قابل بهره‌برداری^۴، عملکرد آب محدود^۵، عملکرد تاریخ کشت محدود^۶ و عملکرد رقم محدود^۷ توسط مدل شبیه‌سازی شدند. داده‌های مربوط به عملکرد واقعی کشاورزان هر منطقه نیز از وزارت جهاد کشاورزی اخذ گردید. تشریح هر یک از عملکردهای شبیه‌سازی شده در جدول ۲ ارائه شده است.

به کارگیری مدل APSIM: مبنای اصلی این پژوهش استفاده از مدل APSIM-Barley به منظور برآورد عملکرد پتانسیل، عملکرد قابل بهره‌برداری و سایر عملکردها در سطوح مختلف مدیریتی است. این مدل پیش از این برای جو آبی در سطح کشور واسنجی و اعتبارسنجی شده و نتایج قابل قبولی برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد جو در اقلیم‌های مختلف کشور داشته است (۲۲). این مدل بر پایه شیوه‌های بیوفیزیکی در سیستم‌های کشاورزی برای شبیه‌سازی شمار زیادی از گیاهان، مراتع و درختان به کار می‌رود و فرآیندهای مختلفی از جمله بیلان آب در خاک، تغییرات نیتروژن و فسفر خاک، فرسایش، و تأثیر عوامل مدیریتی و رقم را بر فرآیندهای فیزیولوژیک شبیه‌سازی می‌کند (۲۳). در این مدل رشد و نمو به صورت روزانه شبیه‌سازی می‌شود و به عوامل مختلف از جمله آب و هوا (دما، بارندگی، تابش)، خاک (آب و نیتروژن خاک)، ارقام مختلف و اطلاعات مدیریتی گیاه زراعی پاسخ نشان می‌دهد.

برای شبیه‌سازی رشد و نمو و عملکرد جو با استفاده از این مدل، افزون بر داده‌های مربوط به آب و هوا، داده‌های گیاهی (ضرایب ژنتیکی)، داده‌های مدیریتی و داده‌های مربوط به شاخصه‌های خاک نیاز می‌باشد. داده‌های بلندمدت (۱۳۶۸-۱۳۹۸) آب و هوایی از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد که شامل، حداکثر و حداقل دما، بارندگی و ساعات آفتابی بود. ساعات آفتابی با استفاده از معادله آنگستروم (۲۴) به تشعشع روزانه تبدیل شدند تا قابل استفاده در مدل باشند. ضرایب ژنتیکی نیز برای سه رقم جو آبی (بهمن، ریحان و ماکویی) که در حال حاضر در مناطق مختلف کشور کشت می‌شوند از طریق واسنجی مدل به دست آمد. برای واسنجی مدل، از داده‌های تعدادی از آزمایش‌های مزرعه‌ای که تحت شرایط مختلف آب و هوایی و خاک و همچنین شیوه‌های مدیریتی متنوع انجام شده بودند استفاده شد. داده‌های مدیریتی از

- 1- Lower Limit
- 2- Drained Upper Limit
- 3- Saturated
- 4- Exploitable yield
- 5- Water-limited yield
- 6- Sowing date-limited yield
- 7- Cultivar-limited yield

جدول ۲- انواع عملکردهای شبیه‌سازی شده توسط مدل.

Table 2. Different types of yield simulated by the model.

تشریح Description	عملکردها Yields
۸۵ درصد از عملکرد پتانسیل شبیه‌سازی شده توسط مدل، با دسترسی نامحدود به آب و عناصر غذایی در غیاب آفات و بیماری‌ها. 85% of the potential yield is simulated by the model, with unlimited access to water and nutrients in the absence of pests and diseases.	عملکرد قابل بهره‌برداری Exploitable yield
مشابه عملکرد قابل بهره‌برداری است با این تفاوت که آب تنها عامل محدود کننده است و سایر عوامل در سطح بهینه در مدل تعریف می‌شوند. میزان و زمان آبیاری اعمال شده توسط کشاورزان هر منطقه به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته می‌شود. The same as exploitable yield, except that water is the only limiting factor, and the other factors are defined at the optimal level in the model. The amount and timing of irrigation applied by farmers in each region is considered as input for the model.	عملکرد آب محدود Water-limited yield
مشابه عملکرد قابل بهره‌برداری است با این تفاوت که تاریخ کاشت عامل محدود کننده بوده و سایر عوامل بهینه هستند. تاریخ کاشت اعمال شده توسط کشاورزان در هر منطقه به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته می‌شود. Identical to exploitable yield, except that sowing date is the only limiting factor, and the other factors are optimal. The sowing date applied by farmers in each region is considered as input for the model.	عملکرد تاریخ کشت محدود Sowing date-limited yield
مشابه عملکرد قابل بهره‌برداری است با این تفاوت که رقم کشت شده عامل محدود کننده بوده و سایر عوامل بهینه هستند. ضرایب ژنتیکی رقم کشت شده توسط کشاورزان در هر منطقه به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته می‌شود. The same as exploitable yield, except that cultivated cultivar is the limiting factor, and the other factors are held at optimal levels. The genetic coefficients of the cultivars cultivated by farmers in each region are considered as model input.	عملکرد رقم محدود Cultivar-limited yield
میانگین عملکرد مشاهده شده کشاورزان در هر منطقه که توسط وزارت جهاد کشاورزی گزارش شده است. Average of farmer's observed yields in each region as reported by the Ministry of Agriculture.	عملکرد واقعی کشاورز Farmer's actual yield

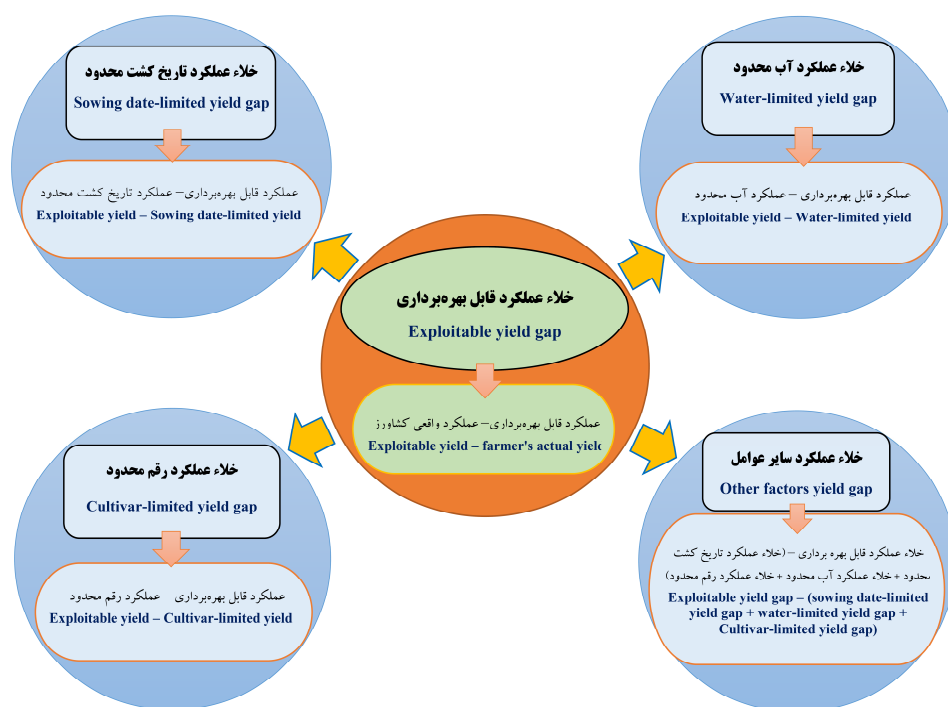
منطقه محاسبه می‌شود. دفعات و حجم آبیاری مورد استفاده توسط کشاورزان در طول فصل رشد در هر منطقه به منظور برآورد خلاء مربوط به محدودیت آب مدنظر قرار گرفت. در ادامه جهت برآورد میزان آبیاری اضافه مورد نیاز برای پر کردن خلاء عملکرد آب محدود در هر منطقه شبیه‌سازی‌هایی با دفعات مختلف آبیاری انجام شد تا دفعات آبیاری مورد نیاز برای پر کردن خلاء در هر منطقه مشخص شود. بدین‌منظور در همدان، کبودرآهنگ، اراک و نیشابور با ۷ مرتبه آبیاری به‌میزان ۵۰ میلی‌متر در هر مرتبه میزان عملکرد

بر اساس عملکردهای شبیه‌سازی شده در سطوح مختلف مدیریتی (جدول ۲)، انواع خلاء عملکرد محاسبه شد (شکل ۲). خلاء عملکرد کل، اختلاف بین عملکرد قابل بهره‌برداری و عملکرد واقعی کشاورز است. خلاء عملکرد کل دربرگیرنده خلاء عملکرد آب محدود، خلاء عملکرد تاریخ کشت محدود، خلاء عملکرد رقم محدود و خلاء مربوط به محدودیت سایر عوامل زراعی می‌باشد. خلاء عملکرد آب محدود از اختلاف بین عملکرد قابل بهره‌برداری و عملکرد در شرایط محدودیت آب کشاورزان هر

خلاء عملکرد رقم محدود مربوط به استفاده از ارقام کم‌بازده‌تر یا ارقام نامناسب با شرایط هر منطقه می‌باشد. برای بررسی میزان خلاء مربوط به رقم، علاوه بر رقم غالب مورد استفاده کشاورزان در هر منطقه دو رقم دیگر نیز شبیه‌سازی شد تا اختلاف عملکرد آن‌ها با رقم غالب منطقه مشخص شده و در صورتی که ارقام شبیه‌سازی شده عملکرد بیشتری از رقم غالب منطقه داشتند، اختلاف عملکرد به‌عنوان خلاء مربوط به رقم لحاظ شد. بدین‌منظور پارامترهای سه رقم مورد استفاده کشاورزان شامل ماکویی، بهمن و ریحان در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. با کسر مجموع خلاءهای آب محدود، تاریخ کشت محدود و رقم محدود از خلاء عملکرد قابل بهره‌برداری، خلاء عملکرد مربوط به محدودیت سایر عوامل زراعی به‌دست آمد، که شامل عواملی مانند تغذیه گیاه، سرمازدگی، شوری، فشردگی خاک، آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز و غیره می‌شود.

به سطح عملکرد قابل بهره‌برداری رسید. در مرودشت، شیراز و ساوه با ۶ مرتبه آبیاری به میزان ۵۰ میلی‌متر در هر مرتبه و در سبزواری با ۸ مرتبه آبیاری عملکرد افزایش یافت و به سطح عملکرد قابل بهره‌برداری رسید.

خلاء عملکرد تاریخ کشت محدود از اختلاف بین عملکرد قابل بهره‌برداری با عملکرد در شرایط تاریخ کشت واقعی کشاورزان هر منطقه به‌دست می‌آید. برای بررسی مطلوب یا نامطلوب بودن تاریخ‌های کشت استفاده شده توسط کشاورزان، تاریخ‌هایی زودتر و دیرتر از تاریخ‌های کشت کشاورزان تعریف (۶ تا ۲۰ روز زودتر و ۶ تا ۲۰ روز دیرتر از تاریخ‌های کشت مرسوم بین کشاورزان هر منطقه) و توسط مدل شبیه‌سازی شد تا با مقایسه عملکردهای حاصل از تاریخ‌های کشت متفاوت، تاریخ کشت مطلوب با بیش‌ترین عملکرد برای هر منطقه مشخص گردد و میزان خلاء عملکرد مربوط به تاریخ کشت مرسوم بین کشاورزان هر منطقه مشخص شود.



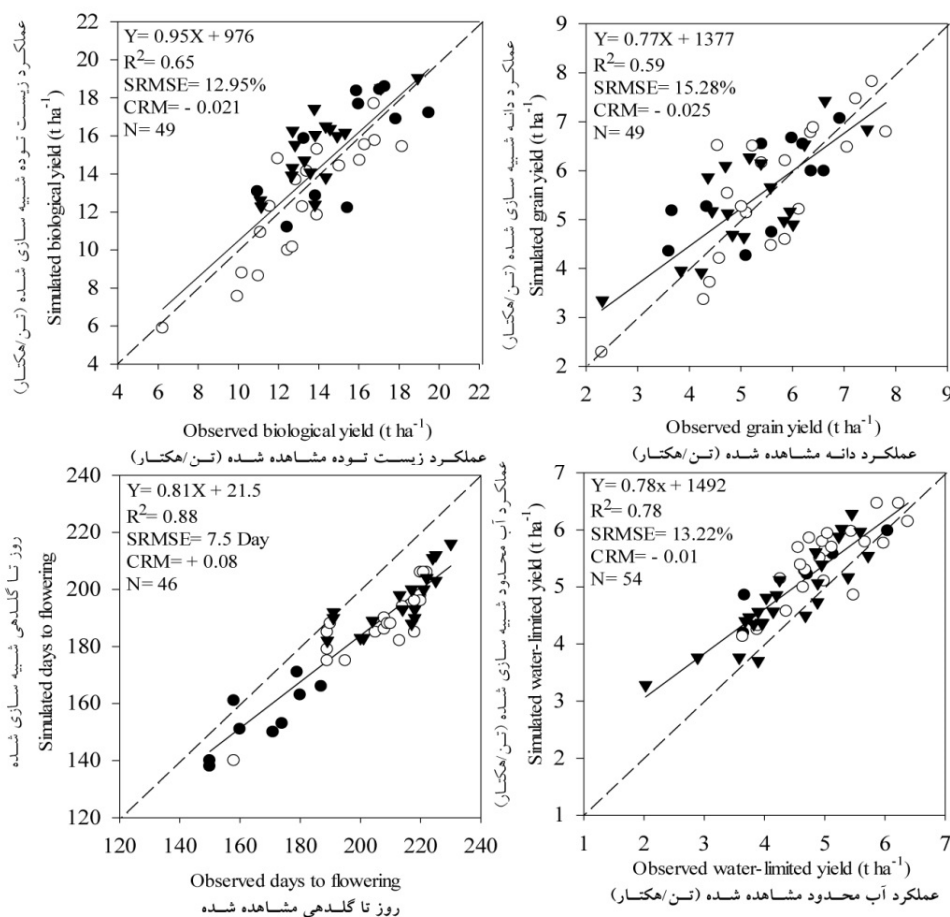
شکل ۲- انواع خلاء عملکرد شبیه‌سازی شده ناشی از محدودیت عوامل زراعی.

Fig. 2. Different simulated yield gaps due to limitation of agronomic factors.

نتایج و بحث

و ۷/۵ روز به دست آمد (شکل ۳) که نشان می‌دهد مدل با دقت قابل‌قبولی این موارد را برآورد کرده است. با توجه به ضریب جرم باقی‌مانده (CRM) برای عملکرد زیست‌توده (-۰/۰۲۱)، عملکرد دانه (-۰/۰۲۵) و عملکرد آب محدود (-۰/۰۱) مدل، تخمین اندکی بالاتر از داده‌های مشاهده شده داشته است بر خلاف روز تا گلدهی (+۰/۰۸) که تخمین مدل کم‌تر از داده‌های مشاهده شده می‌باشد (شکل ۳).

اعتبارسنجی مدل: ارزیابی مدل برای شبیه‌سازی رشد جو بر اساس روز تا گلدهی، عملکرد زیست‌توده، عملکرد دانه و عملکرد در شرایط محدودیت آب نشان داد که مدل با دقت خوبی این شاخص‌ها را شبیه‌سازی می‌کند. ریشه میانگین مربعات خطای استاندارد شده (SRMSE) برای عملکرد زیست‌توده، عملکرد دانه، عملکرد آب محدود و روز تا گلدهی به ترتیب ۱۲/۹۵ درصد، ۱۵/۲۸ درصد، ۱۳/۲۲ درصد



شکل ۳- اعتبارسنجی مدل استفاده شده در این پژوهش.

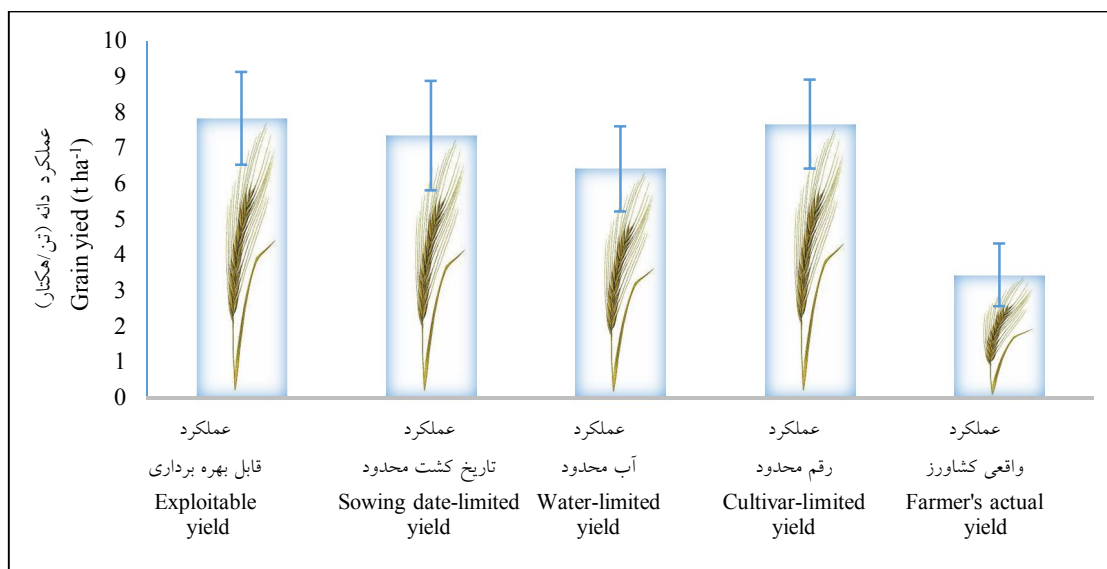
خط ممتد، رگرسیون و خط نقطه‌چین بیانگر ۱:۱ می‌باشند. شاخص‌های مربوط به ارزیابی مدل (SRMSE, CRM) در متن توضیح داده شده‌اند.

Fig. 3. Evaluation of the model used in the current study. Continuous line is regression and dotted line is 1:1. The model evaluation indicators (SRMSE, CRM) are explained in the text.

به‌ترتیب $7/4$ و $6/4$ تن در هکتار شبیه‌سازی شد (شکل ۴) در حالی‌که دامنه عملکرد تاریخ کشت محدود $6/9$ تا $7/7$ تن در هکتار و عملکرد آب محدود 6 تا $6/8$ تن در هکتار در بین پهنه‌های مورد مطالعه متغیر بود (جدول ۳). با توجه به وابستگی شدید محصولات زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به آبیاری به‌منظور تکمیل چرخه زندگی گیاه و رسیدن به بیشینه تولید، در شرایط محدودیت آب و عدم تامین کامل نیاز گیاه به‌طور طبیعی عملکرد کاهش یافته و به نسبت میزان محدودیت آب، عملکرد در مناطق مختلف نسبت به عملکرد قابل بهره‌برداری کاهش می‌یابد. تاریخ کشت گیاه نیز به دلیل اثرات متقابلی که با حرارت دریافتی گیاه در طول دوره رشد دارد و نیز استفاده مطلوب از بارندگی‌ها و مواجهه با سرمازدگی، تأثیر معناداری در میزان عملکرد گیاه دارد و در صورت عدم به‌کارگیری تاریخ کاشت مطلوب، کاهش عملکرد اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

عملکردهای شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی: براساس نتایج شبیه‌سازی میانگین عملکرد قابل بهره‌برداری در پهنه‌های مورد مطالعه $7/8$ تن در هکتار به‌دست آمد (شکل ۴). دامنه عملکرد قابل بهره‌برداری در این پهنه‌ها و طی سال‌های شبیه‌سازی از $7/3$ تن در هکتار در پهنه 5003 تا $8/3$ تن در هکتار در پهنه 4102 متغیر بود (جدول ۳). الستی و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه خود دامنه عملکرد پتانسیل جو آبی را در بازه زمانی 1380 تا 1394 در کشور بین 5 تا $9/8$ تن در هکتار با میانگین 7 تن در هکتار برآورد کردند (۱۷). جناب و نظری (۲۰۱۹) نیز عملکرد پتانسیل جو آبی را در استان قزوین $8/2$ تن در هکتار تخمین زدند (۲۵).

در شرایط محدودیت آب و تاریخ کاشت عملکرد جو در مقایسه با عملکرد قابل بهره‌برداری کاهش یافت. میانگین شبیه‌سازی عملکرد تاریخ کشت و آب محدود در تمامی پهنه‌ها و سال‌های مورد مطالعه



شکل ۴- عملکردهای شبیه‌سازی شده در سطوح مختلف تولید و عملکرد واقعی کشاورز (میانگین پنج پهنه مورد مطالعه و ۳۰ سال). خطای استاندارد روی هر بارچارت نشان‌دهنده واریانس بین سال‌ها و پهنه‌های اقلیمی است.

Fig. 4. Simulated yields at different production levels and farmer's actual yield (averaged across the five studied zones and 30 years).

The error bars on each bar chart show the variance between years and climatic zones.

و در پهنه‌هایی مثل پهنه ۶۰۰۲، عدم استفاده از رقم مطلوب باعث کاهش عملکرد قابل بهره‌برداری گردیده است. هم‌چنین عملکرد واقعی کشاورزان در پهنه‌های مورد مطالعه از ۲/۹ تن در هکتار در پهنه ۵۰۰۲ تا ۴ تن در هکتار در پهنه ۴۱۰۳ با میانگین ۳/۴ تن در هکتار متغیر بود که اختلاف زیادی با میانگین عملکرد قابل بهره‌برداری (۷/۸ تن در هکتار) دارد (جدول ۳). تفاوت قابل توجه عملکرد واقعی کشاورزان در پهنه‌های مختلف دلایل متعددی هم‌چون شرایط اقلیمی متنوع و شیوه‌های مدیریتی متفاوت دارد.

میانگین عملکرد رقم محدود در بین پهنه‌های مورد مطالعه با حدود ۷/۷ تن در هکتار اختلاف کمی با عملکرد قابل بهره‌برداری داشت به طوری که در دو پهنه ۴۱۰۲ و ۴۱۰۳ هیچ اختلافی با عملکرد قابل بهره‌برداری نداشت و بیش‌ترین اختلاف با عملکرد قابل بهره‌برداری به میزان ۰/۴ تن در هکتار در پهنه ۶۰۰۲ مشاهده شد. ارقام مناسب و سازگار با هر پهنه و با پتانسیل عملکرد بالا یکی از عواملی است که در کنار رعایت موارد مدیریتی باعث تضمین عملکرد مطلوب می‌باشد. در مناطقی که کشاورزان به این ارقام دسترسی دارند پتانسیل افزایش عملکرد بالاتر می‌باشد

جدول ۳- عملکردهای شبیه‌سازی شده و عملکرد واقعی کشاورز در پنج پهنه مورد مطالعه (تن/هکتار).

Table 3. Simulated and farmer's actual yields in the five studied zones (t ha⁻¹).

عملکرد واقعی کشاورز Farmer's actual yield	عملکرد رقم محدود Cultivar-limited yield	عملکرد آب محدود Water-limited yield	عملکرد تاریخ کشت محدود Sowing date-limited yield	عملکرد قابل بهره‌برداری Exploitable yield	کد اقلیمی پهنه Climatic zone code
3.9 ± 0.21	8.3 ± 0.22	6.6 ± 0.20	7.7 ± 0.25	8.3 ± 0.22	4102
4 ± 0.15	8.1 ± 0.20	6.5 ± 0.24	7.5 ± 0.15	8.1 ± 0.20	4103
2.9 ± 0.17	7.2 ± 0.26	6.2 ± 0.13	7 ± 0.30	7.5 ± 0.32	5002
3.4 ± 0.15	7.2 ± 0.18	6 ± 0.17	6.9 ± 0.37	7.3 ± 0.14	5003
3 ± 0.14	7.6 ± 0.14	6.8 ± 0.25	7.7 ± 0.21	8 ± 0.12	6002

* اعداد سمت راست علامت ± نشان‌دهنده خطای معیار در ۳۰ سال مورد مطالعه است

* The numbers on the right side of the '±' sign indicate the standard error of the 30 years studied

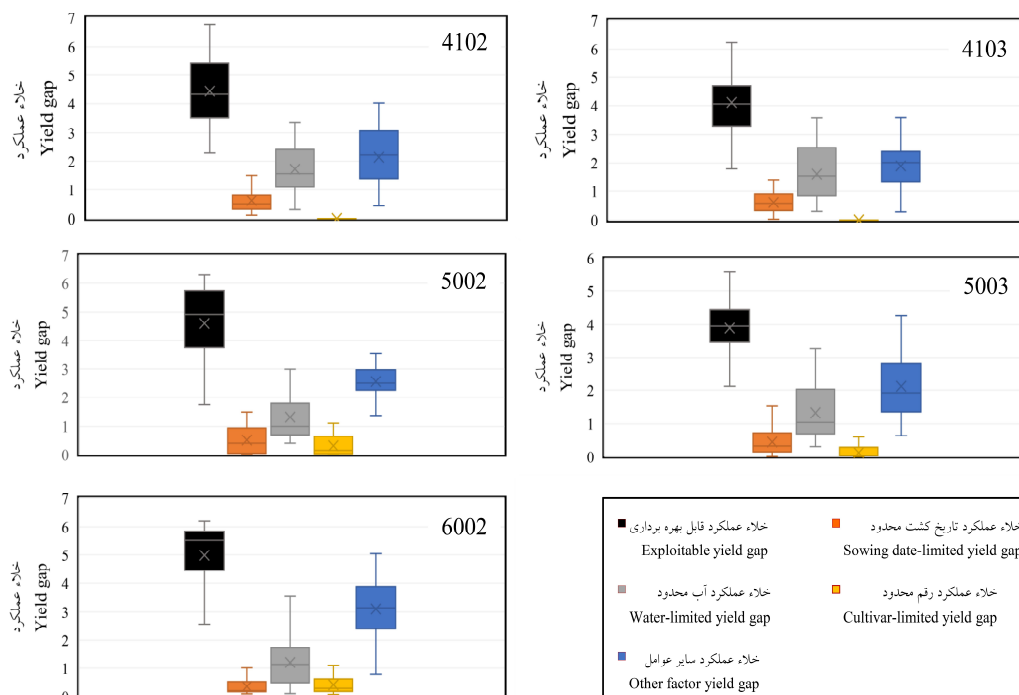
آبی در پهنه‌های مورد مطالعه می‌باشد. در واقع کشاورزان توانسته‌اند فقط ۴۳/۶ درصد از عملکرد قابل بهره‌برداری را برداشت کنند. خلاء عملکرد نسبتاً زیاد در محصولات مختلف توسط پژوهش‌گران دیگر نیز گزارش شده است. به‌عنوان نمونه الستی و همکاران (۲۰۲۲) خلاء عملکرد جو آبی را در کشور ۵۸ درصد (۱۷)، زاهد و همکاران (۲۰۱۹) خلاء عملکرد گندم آبی را در کشور ۶۲ درصد (۲۶) و محمدرزاده و همکاران (۲۰۲۰) نیز خلاء عملکرد چغندر قند را در سطح کشور ۵۵ درصد گزارش کردند

خلاء عملکردهای محاسبه شده

خلاء عملکرد قابل بهره‌برداری: میانگین خلاء عملکرد قابل بهره‌برداری در پهنه‌های مورد مطالعه ۴/۴ تن در هکتار شبیه‌سازی شد. در حالی که دامنه خلاء عملکرد قابل بهره‌برداری از ۳/۹ تن در هکتار در پهنه ۵۰۰۳ تا ۵ تن در هکتار در پهنه ۶۰۰۲ متغیر بود (شکل ۵). این مقدار خلاء عملکرد نشان‌دهنده اختلاف زیاد بین عملکرد واقعی کشاورزان با عملکرد قابل بهره‌برداری در پهنه‌های مورد مطالعه است و بیانگر وجود ۵۶/۴ درصد خلاء عملکرد قابل حصول در مزارع جو

خلاء عملکرد بالاتر و در نتیجه پتانسیل بیش‌تری برای افزایش عملکرد جاری دارند.

(۲۷). توزیع مکانی عملکرد واقعی کشاورز و عملکرد قابل‌بهره‌برداری نشان داد که پهنه‌های با عملکرد واقعی کم یا عملکرد پتانسیل قابل بهره‌برداری بالا



شکل ۵- خلاءهای عملکرد محاسبه شده در پهنه‌های مورد مطالعه (تن/هکتار).

برای اطلاعات بیش‌تر در خصوص پهنه‌ها به جدول ۱ و شکل ۱ رجوع شود. علامت ضربدر در نمودار جمع‌ای نشان‌دهنده میانگین است.

Fig. 5. Calculated yield gaps in the studied zones ($t\ ha^{-1}$).

Refer to Table 1 and Figure 1 for more information about the zones. The cross symbol in the box plot indicates the average.

هکتار برآورد شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها هم‌چنین نشان داد تاخیر در تاریخ کشت جو در پهنه‌های اقلیمی ۴۱۰۳ (کبودرآهنگ)، ۴۱۰۲ (همدان)، ۵۰۰۲ (نیشابور) و ۵۰۰۳ (اراک، ساوه و سبزوار) باعث انطباق بهتر با شرایط محیطی و افزایش عملکرد جو شد. در حالی‌که کشت زودتر در مروت در پهنه ۵۰۰۲ و شیراز از پهنه ۶۰۰۲ باعث افزایش عملکرد شد (جدول ۴).

خلاء عملکرد تاریخ کشت محدود: خلاء عملکرد ناشی از تاریخ کشت نامناسب در پهنه‌های مورد مطالعه به‌طور میانگین حدود ۱۱ درصد از خلاء عملکرد قابل‌بهره‌برداری برآورد شد. بیش‌ترین مقدار خلاء عملکرد تاریخ کشت محدود در پهنه‌های ۴۱۰۲ و ۴۱۰۳ (۰/۶ تن در هکتار) و کم‌ترین آن در پهنه ۶۰۰۲ (۰/۳ تن در هکتار) بود (شکل ۵). میانگین این خلاء در پهنه‌های مورد مطالعه حدود ۰/۵ تن در

جدول ۴- پر کردن خلاء عملکرد ناشی از محدودیت تاریخ کاشت در مناطق مختلف در ۵ پهنه مورد مطالعه.

Table 4. Filling the sowing date-limited yield gap in different location of the five studied zones.

درصد افزایش عملکرد Yield increase (%)	تاریخ کشت مطلوب** Optimal sowing date		تاریخ کشت مرسوم* Conventional sowing date		منطقه مورد مطالعه (پهنه) Study location (zone)
	عملکرد (تن/هکتار) Yield (t ha ⁻¹)	تاریخ کشت Sowing date	عملکرد (تن/هکتار) Yield (t ha ⁻¹)	تاریخ کشت Sowing date	
6.8	7.9	۸ آبان 30 October	7.4	۲۳ مهر 15 October	اراک (۵۰۰۳) Arak (5003)
5.8	7.3	۱۴ آبان 5 November	6.9	۲۸ مهر 20 October	ساوه (۵۰۰۳) Saveh (5003)
3	6.6	۸ آبان 30 October	6.4	۲۸ مهر 20 October	سبزوار (۵۰۰۳) Sabzevar (5003)
3.9	8	۱۹ آبان 10 November	7.7	۲۵ آبان 16 November	شیراز (۶۰۰۲) Shiraz (6002)
8	8.1	۲۸ مهر 20 October	7.5	۱۰ مهر 2 October	کبودرآهنگ (۴۱۰۳) Kabudarahang (4103)
7.8	8.3	۱۷ آبان 8 November	7.7	۲۵ آبان 16 November	مرودشت (۵۰۰۲) Marvdasht (5002)
6.3	6.7	۳ آبان 25 October	6.3	۲۳ مهر 15 October	نیشابور (۵۰۰۲) Neyshabour (5002)
7.8	8.3	۳۰ مهر 22 October	7.7	۱۶ مهر 8 October	همدان (۴۱۰۲) Hamedan (4102)

* تاریخ کاشت کشاورز

* Farmer sowing date

** تاریخ کاشت مطلوب در هر منطقه بر اساس شبیه‌سازی تاریخ‌های مختلف کاشت از ۶ تا ۲۰ روز زودتر و ۶ تا ۲۰ روز دیرتر از تاریخ‌های کاشت مرسوم به دست آمد

** Optimal sowing date at each location was obtained through simulating different sowing dates (6 to 20 days earlier and 6 to 20 days later than the conventional sowing dates)

مگاژول در مترمربع). با تاخیر در تاریخ کشت این میزان تابش دریافتی به دلیل افزایش بیش‌تر طول فصل رشد از انتهای فصل رشد افزایش بیش‌تری یافت. در مقابل مرودشت (پهنه ۵۰۰۲) و شیراز (پهنه ۶۰۰۲) فصل رشد کوتاه‌تری داشتند و تشعشع تجمعی دریافتی آن‌ها به ترتیب ۳۱۸۳ و ۳۱۶۹ مگاژول بر مترمربع بود که با کشت زودتر، تشعشع دریافتی در این مناطق افزایش یافت و باعث افزایش عملکرد شد. عملکرد بالای شبیه‌سازی شده ذرت در دشت‌های شمالی چین به دلیل دریافت تابش کافی و دمای

بیش‌ترین افزایش عملکرد در اثر تغییر تاریخ کاشت در کبودرآهنگ (پهنه ۴۱۰۳) به مقدار ۸ درصد و کم‌ترین افزایش در سبزوار (پهنه ۵۰۰۳) به مقدار ۳ درصد بود (جدول ۴). با تنظیم تاریخ کاشت، گیاهان زراعی می‌توانند از دما، تابش و بارندگی (به عنوان عوامل محرک اصلی در رشد و نمو) بسیار کارآمدتر استفاده کنند. به عنوان مثال به دلیل فصل رشد طولانی‌تر در کبودرآهنگ (پهنه ۴۱۰۳) و همدان (پهنه ۴۱۰۲)، گیاه جو تشعشع تجمعی بیش‌تری نسبت به بقیه پهنه‌ها دریافت کرد (به ترتیب ۴۲۷۱ و ۴۱۸۴

مزارع جو را آبیاری کنند (جدول ۵). با توجه به داده‌های به‌دست آمده از پرسش‌نامه‌ها، بسیاری از کشاورزان در مناطق مورد مطالعه مانند نیشابور (پهنه ۵۰۰۲) و سبزوار (پهنه ۵۰۰۳) از روش‌های آبیاری سنتی به‌ویژه آبیاری کرتی و جویچه‌ای استفاده می‌کنند که راندمان بسیار پایینی دارند. خلاء عملکرد آب محدود بالا در همدان (پهنه ۴۱۰۲)، کبودرآهنگ (پهنه ۴۱۰۳) و اراک (پهنه ۵۰۰۳) علی‌رغم استفاده گسترده‌تر از سیستم‌های آبیاری بارانی به دلیل دفعات کم و هم‌چنین برنامه‌ریزی نامناسب آبیاری می‌باشد. با توجه به مذاکرات رو در رو با کشاورزان هر پهنه، تغییر اقلیم نیز از دیگر عوامل محدودیت آب در مناطق مورد مطالعه است؛ به‌طوری‌که برخی کشاورزان به‌خصوص در سبزوار (پهنه ۵۰۰۳) به دلیل کاهش بارش‌ها در این فصل مجبور به آبیاری محصول در زمستان می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی جهت برآورد مقدار آبیاری مورد نیاز برای پر کردن خلاء عملکرد در پهنه‌های مورد مطالعه نشان داد که ۳ نوبت آبیاری بیشتر در اراک (پهنه ۵۰۰۳)، کبودرآهنگ (پهنه ۴۱۰۳) و همدان (پهنه ۴۱۰۲) و ۲ نوبت آبیاری بیشتر در ساوه (پهنه ۵۰۰۳)، سبزوار (پهنه ۵۰۰۳)، شیراز (پهنه ۶۰۰۲)، مرودشت (پهنه ۵۰۰۲) و نیشابور (پهنه ۵۰۰۲) برای پر کردن خلاء عملکرد آب محدود در این مناطق لازم می‌باشد (جدول ۵). شایان ذکر است که امکان جبران بخشی از کمبود آب از طریق بهبود راندمان سیستم‌های آبیاری موجود (۳۷ درصد) (۳۲) و نیز تجهیز مزارع به سیستم‌های آبیاری تحت فشار در کشور وجود دارد.

تجمعی بیش‌تر به‌دست آمد (۲۸). در مطالعه‌ای دیگر، سه تاریخ کشت گندم پاییزه شامل ۱۶ مهر، ۱ آبان و ۱۶ آبان در منطقه شهرکرد با یکدیگر مقایسه شد که بیش‌ترین عملکرد در تاریخ ۱۶ مهر به دست آمد (۲۹). رشد بیش‌تر بوته و تجمع مواد فتوسنتزی قبل از وقوع سرما برای گندم پاییزه در این منطقه و هم‌چنین عدم هم‌زمانی مرحله پر شدن دانه با هوای گرم خردادماه از عوامل افزایش عملکرد به دلیل تاریخ کشت زودتر یعنی ۱۶ مهرماه، گزارش شد. کشت زودتر لوبیا چشم‌بلبلی در اول آوریل (فروردین) در منطقه‌ای در برزیل باعث افزایش عملکرد به‌علت استفاده بهتر از آب از طریق تعرق و کاهش اتلاف آب به‌دلیل کاهش تبخیر شد (۳۰). کمالی و همکاران (۲۰۱۷) در مقایسه سه تاریخ کشت اول آبان، ۱۵ آبان و ۳ آذر در اصفهان، بیش‌ترین عملکرد دانه را در تاریخ کشت ۱۵ آبان برای جو رقم فجر ۳۰ توصیه کردند و علت آن را تعادل بهتر بین رشد رویشی و زایشی در مقایسه با دو تاریخ کشت زودتر و دیرتر بیان نمودند (۳۱).

خلاء عملکرد آب محدود: به‌طور میانگین حدود ۳۲ درصد از خلاء عملکرد قابل‌بهره‌برداری در پهنه‌های مورد مطالعه مربوط به محدودیت آب بود. به‌طوری‌که به‌طور میانگین ۱/۴ تن در هکتار از خلاء عملکرد قابل‌بهره‌برداری ناشی از محدودیت آب بود. آب‌های زیر زمینی که منابع آب غالب برای آبیاری جو در پهنه‌های مورد مطالعه می‌باشد طی دو دهه اخیر به‌دلیل برداشت‌های بی‌رویه به شدت محدود شده‌اند. بنابراین به‌دلیل محدودیت منابع آبی در پهنه‌های مورد مطالعه، کشاورزان فقط می‌توانند ۴ تا ۶ نوبت در هر فصل

جدول ۵- پر کردن خلاء عملکرد ناشی از محدودیت آب در مناطق مختلف در ۵ پهنه مورد مطالعه.

Table 5. Filling the water-limited yield gap in different zones and the corresponding study locations.

درصد افزایش عملکرد Yield increase (%)	آبیاری مطلوب**		آبیاری مرسوم (آب محدود)		منطقه مورد مطالعه (پهنه) Study location (zone)
	عملکرد (تن/هکتار) Yield (t ha ⁻¹)	تعداد آبیاری Number of irrigation	عملکرد (تن/هکتار) Yield (t ha ⁻¹)	تعداد آبیاری* Number of irrigation	
27.4	7.9	7	6.2	4	اراک (۵۰۰۳) Arak (5003)
17.7	7.3	6	6.2	4	ساوه (۵۰۰۳) Saveh (5003)
15.8	6.6	8	5.7	6	سبزوار (۵۰۰۳) Sabzevar (5003)
17.6	8	6	6.8	4	شیراز (۶۰۰۲) Shiraz (6002)
24.6	8.1	7	6.5	4	کبودرآهنگ (۴۱۰۳) Kabudarahang (4103)
22.1	8.3	6	6.8	4	مرودشت (۵۰۰۲) Marvdasht (5002)
19.6	6.7	7	5.6	5	نیشابور (۵۰۰۲) Neyshabour (5002)
25.8	8.3	7	6.6	4	همدان (۴۱۰۲) Hamedan (4102)

* تعداد آب استفاده شده توسط کشاورز

* Number of irrigation applied by the farmers

** میزان آبیاری مطلوب در هر منطقه بر اساس تیمارهای شبیه‌سازی با تعداد دفعات مختلف آبیاری به دست آمد تا آب مورد نیاز برای پر کردن خلاء آب محدود برای رسیدن به سطح عملکرد قابل بهره‌برداری در هر منطقه مشخص شود

** The optimal amount of irrigation at each location was determined based on simulation treatments with different irrigation numbers to fill the yield gap in order to reach the exploitable yield level

همکاران (۲۰۱۷) بعد از مطالعه ۱۴ محصول زراعی در ۶۶ کشور از همه قاره‌ها تاکید کردند که محدودیت‌های آبی ناشی از فقدان منابع آبی و تغییر اقلیم، از موانع اصلی کاهش خلاء عملکرد به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک می‌باشد به طوری که برای پر کردن خلاء عملکرد زراعی، تخصیص منابع آب شیرین برای آبیاری باید حداقل ۱۴۶ درصد افزایش یابد (۳۴).

خلاء عملکرد رقم محدود: خلاء عملکرد ناشی از رقم در مقایسه با محدودیت آب و تاریخ کشت، سهم کم‌تری را از خلاء عملکرد قابل بهره‌برداری داشت؛

عباسی و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه خود، راندمان کاربرد آب آبیاری جو را در سطح کشور ۳۷/۲ درصد برآورد کردند (۳۲). بالبو و همکاران (۲۰۱۹) آبیاری را یک عامل مدیریتی بسیار مهم در کمربند غربی ذرت ایالات متحده عنوان کردند که عامل حدود ۵۰ درصد از خلاء عملکرد ذرت و سویا در این منطقه است (۳۳). در مطالعه‌ای در مناطق اصلی تولید گندم زمستانه در چین با استفاده از رویکرد مدل‌سازی مشخص شد که محدودیت دسترسی به آب باعث کاهش عملکرد پتانسیل گندم به میزان ۱/۹ تن در هکتار می‌شود (۷). دیویس و

(۱۳). بنابراین استفاده از ارقام جدید و با پتانسیل عملکرد بالاتر و سازگار با هر منطقه جهت افزایش عملکرد و کاهش خلاء ضروری می‌باشد.

خلاء عملکرد ناشی از سایر عوامل زراعی: نتایج این پژوهش نشان داد که سایر عوامل مؤثر بر عملکرد جو، به‌جز تاریخ کشت نامناسب و محدودیت آب و رقم نامناسب که باعث ایجاد خلاء عملکرد می‌شوند، به‌طور میانگین باعث کاهش ۲/۳ تن در هکتار عملکرد محصول شدند. این میزان معادل حدود ۵۳ درصد از خلاء عملکرد قابل‌بهره‌برداری می‌باشد. کم‌ترین کاهش عملکرد در اثر سایر عوامل مربوط به کبودرآهنگ (پهنه ۴۱۰۳) با ۱/۹ تن در هکتار و بیش‌ترین کاهش مربوط به شیراز (پهنه ۶۰۰۲) با ۳/۱ تن در هکتار بود (شکل ۵). اطلاعات به‌دست آمده از کشاورزان براساس پرسش‌نامه‌ها نشان داد علاوه بر موارد بررسی شده در این مطالعه، عواملی هم‌چون مدیریت نامناسب آفات و علف‌های هرز، تراکم غیر بهینه گیاه، روش‌های نامناسب کشت، سله بستن خاک، تغذیه نامناسب گیاه و استفاده از ادوات نامناسب کاشت، تأثیر زیادی بر خلاء عملکرد موجود دارند و شایسته است که در پژوهش‌های آینده مدنظر قرار گیرند. هم‌چنین اطلاعات کسب شده از کشاورزان بخصوص کشاورزان سبزوار (پهنه ۵۰۰۳)، نیشابور (پهنه ۵۰۰۲) و شیراز (پهنه ۶۰۰۲) نشان داد که برداشت اضافه از آب‌های زیرزمینی باعث شور شدن آب و خاک در این مناطق شده است که این عامل نیز در افزایش خلاء عملکرد ناشی از سایر عوامل نقش قابل‌توجهی داشته است.

نتیجه‌گیری

میانگین عملکرد واقعی جو آبی در پهنه‌های مورد مطالعه در این پژوهش طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۹۹ که ۳/۴ تن در هکتار است، فاصله زیادی با میانگین

به‌طوری‌که فقط ۳/۶ درصد (۰/۱۶ تن در هکتار) از میانگین خلاء عملکرد قابل بهره‌برداری در پهنه‌های مختلف مربوط به انتخاب رقم ناسازگار توسط کشاورزان بود. به‌طور مثال، در مناطق همدان (پهنه ۴۱۰۲)، کبودرآهنگ (پهنه ۴۱۰۳)، اراک (پهنه ۵۰۰۳) و نیشابور (پهنه ۵۰۰۲) رقم بهمن توسط کشاورزان کشت می‌شود که با جایگزین کردن آن با ارقام ماکویی و ریحان در شبیه‌سازی‌ها عملکرد به‌دست آمده کاهش یافت که نشان‌دهنده این است که در این مناطق رقم کشت شده توسط کشاورزان مناسب می‌باشد. بنابراین خلاء عملکرد رقم محدود در این مناطق صفر می‌باشد (شکل ۵). در مقایسه، در مناطق شیراز (پهنه ۶۰۰۲)، مرودشت (پهنه ۵۰۰۲) و سبزوار (پهنه ۵۰۰۳) رقم ریحان رقم غالب کشت شده توسط کشاورزان می‌باشد که بعد از جایگزینی توسط رقم بهمن در شبیه‌سازی‌ها مشاهده شد که عملکرد به‌دست آمده به‌ترتیب ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۱ تن در هکتار افزایش یافت. بنابراین خلاء عملکرد رقم محدود مشاهده شده در سه منطقه شیراز (پهنه ۶۰۰۲)، مرودشت (پهنه ۵۰۰۲) و سبزوار (پهنه ۵۰۰۳) به‌ترتیب ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۱ تن در هکتار بود (شکل ۵)، که البته با جایگزینی رقم ریحان با رقم بهمن این میزان خلاء قابل جبران می‌باشد. رقم ماکویی که از ارقام قدیمی می‌باشد مانند مناطق قبلی در این سه منطقه نیز عملکرد پایین‌تری نسبت به رقم کشت شده توسط کشاورزان (ریحان) داشت. ارقام با عملکرد بالا، سنبله بزرگ‌تر و وزن دانه بالاتری دارند (۱۳). اسپه و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که ارقام اصلاح شده برنج باعث افزایش عملکرد معادل ۲۴/۱ کیلوگرم در هکتار در سال در کالیفرنیا شده‌اند (۳۵). طبق گزارش ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) انتخاب ارقام نامناسب ذرت توسط بیش از نیمی از کشاورزان در چین باعث خلاء عملکرد ۱۹/۸ درصدی شده است

به‌طور کامل قابل‌جبران است. بخش بیش‌تر خلاء عملکرد قابل‌بهره‌برداری به میزان ۵۳ درصد ناشی از سایر عوامل از جمله آفات، علف‌های هرز، شوری خاک، فشردگی خاک، تغذیه نامناسب، تراکم نامطلوب و دیگر عوامل اقتصادی-اجتماعی بود. با توجه به سطح زیر کشت بالای جو در کشور و از طرفی خلاء زیاد بین عملکرد واقعی و عملکرد قابل‌بهره‌برداری این محصول و واردات قابل‌توجه آن جهت تامین نیازهای مختلف در کشور، نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند راهگشای برنامه‌ریزان بخش تولید باشد تا با مدیریت بهتر و افزایش عملکرد واقعی کشاورزان تا سطح عملکرد قابل‌بهره‌برداری نیاز کشور به جو با خودکفایی در داخل تامین گردد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

عملکرد قابل‌بهره‌برداری (۷/۸ تن در هکتار) دارد. به‌طورکلی خلاء عملکرد قابل‌بهره‌برداری در پهنه‌های مورد مطالعه از ۳/۹ تن در هکتار در پهنه ۵۰۰۳ تا ۵ تن در هکتار در پهنه ۶۰۰۲ متغیر بود. حدود ۳۲ درصد از خلاء عملکرد قابل‌بهره‌برداری در پهنه‌های مورد مطالعه مربوط به خلاء عملکرد آب محدود می‌باشد که با افزایش دفعات آبیاری در صورت وجود منابع آب و هم‌چنین بهبود برنامه‌ریزی آبیاری و استفاده از شیوه‌های نوین آبیاری با راندمان بالا می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی کاهش پیدا کند. حدود ۱۱ درصد از خلاء عملکرد قابل‌بهره‌برداری نیز مربوط به خلاء عملکرد تاریخ کشت محدود بود که با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها با کمی تغییر در تاریخ کشت قابل‌جبران می‌باشد. خلاء عملکرد رقم محدود با ۳/۶ درصد کم‌ترین سهم را از خلاء عملکرد قابل‌بهره‌برداری داشت. در شیراز (پهنه ۶۰۰۲) و مرودشت (پهنه ۵۰۰۲) و سبزوار (پهنه ۵۰۰۳) با جایگزینی رقم بهمن به‌جای رقم ریحان این خلاء

منابع

1. Harwood, W. A. (2019). An introduction to barley: the crop and the model. *Barley: Methods and Protocols*, 1-5.
2. Cammarano, D., Ceccarelli, S., Grando, S., Romagosa, I., Benbelkacem, A., Akar, T., & Ronga, D. (2019). The impact of climate change on barley yield in the Mediterranean basin. *European Journal of Agronomy*, 106, 1-11.
3. Verstegen, H., Köneke, O., Korzun, V., & von Broock, R. (2014). The world importance of barley and challenges to further improvements. *Biotechnological approaches to barley improvement*, 3-19.
4. FAO, 2020. FAOSTAT (2020): FAO Statistical Databases. Available online at: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>.
5. Van Wart, J., Kersebaum, K. C., Peng, S., Milner, M., & Cassman, K. G. (2013). Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Research*, 143, 34-43.
6. Miralles, D. J., Abeledo, L. G., Prado, S. A., Chenu, K., Serrago, R. A., & Savin, R. (2021). Barley. In *Crop physiology case histories for major crops* (pp. 164-195). Academic Press.
7. Zhang, S. Y., Zhang, X. H., Qiu, X. L., Liang, T. A. N. G., Yan, Z. H. U., CAO, W. X., & LIU, L. L. (2017). Quantifying the spatial variation in the potential productivity and yield gap of winter wheat in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 16 (4), 845-857.
8. Chapagain, T., & Good, A. (2015). Yield and production gaps in rainfed wheat, barley, and canola in Alberta. *Frontiers in plant science*, 6, 990.

9. Patrignani, A., Lollato, R. P., Ochsner, T. E., Godsey, C. B., & Edwards, J. T. (2014). Yield gap and production gap of rainfed winter wheat in the southern Great Plains. *Agronomy Journal*, 106(4), 1329-1339.
10. Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittone, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—a review. *Field Crops Research*, 143, 4-17.
11. Liu, Z., Yang, X., Lin, X., Hubbard, K. G., Lv, S., & Wang, J. (2016). Maize yield gaps caused by non-controllable, agronomic, and socioeconomic factors in a changing climate of Northeast China. *Science of the Total Environment*, 541, 756-764.
12. Madias, A., Di Mauro, G., Vitantonio-Mazzini, L. N., Gambin, B. L., & Borrás, L. (2021). Environment quality, sowing date, and genotype determine soybean yields in the Argentinean Gran Chaco. *European Journal of Agronomy*, 123, 126217.
13. Zhang, W., Cao, G., Li, X., Zhang, H., Wang, C., Liu, Q., & Dou, Z. (2016). Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers. *Nature*, 537 (7622), 671-674.
14. Mohammadi-Ahmadmahmoudi, E., Deihimfard, R., & Noori, O. (2020). Yield gap analysis simulated for sugar beet-growing areas in water-limited environments. *European Journal of Agronomy*, 113, 125988.
15. Khaliq, T., Gaydon, D. S., Cheema, M. J. M., & Gull, U. (2019). Analyzing crop yield gaps and their causes using cropping systems modelling—A case study of the Punjab rice-wheat system, Pakistan. *Field Crops Research*, 232, 119-130.
16. Beza, E., Silva, J. V., Kooistra, L., & Reidsma, P. (2017). Review of yield gap explaining factors and opportunities for alternative data collection approaches. *European Journal of Agronomy*, 82, 206-222.
17. Alasti, O., Zeinali, E., Soltani, A., & Torabi, B. (2022). Exploring the current status of barley yield and production gap of Iran. *European Journal of Agronomy*, 139, 126547.
18. van Bussel, L. G., Grassini, P., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., ... & van Ittersum, M. K. (2015). From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Research*, 177, 98-108.
19. Alasti, O., Zeinali, E., Soltani, A., & Torabi, B. (2021). Estimating the Potential Increase of Irrigated Barley Production over Iran via Closure of Yield Gap Based on GYGA Protocol. *Journal of Agroecology*, 13 (2), 325-344. [In Persian with English abstract]
20. Soltani, A., Nehbandani, A. R., Dadrasi, A., Alimaghani, S. M., Zeinali, E., & Torabi, B. (2018). Agro-Ecological Zoning (AEZ) of Iran for Plant Production. Research report. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. [In Persian]
21. Nehbandani, A., Soltani, A., Taghdisi Naghab, R., Dadrasi, A., & Alimaghani, S. M. (2020). Assessing HC27 soil database for modeling plant production. *International Journal of Plant Production*, 14, 679-687.
22. Rahimi, M. R., Deihimfard, R., & Noori, O. (2024). Analyzing unexploitable, agronomic, and non-agronomic yield gaps in irrigated barley growing areas of arid and frost-prone regions from Iran. *Agronomy for Sustainable Development*.
23. Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., ... & Smith, C. J. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European journal of agronomy*, 18 (3-4), 267-288.
24. Wang, J., Wang, E., Yin, H., Feng, L., & Zhao, Y. (2015). Differences between observed and calculated solar radiations and their impact on simulated crop yields. *Field Crops Research*, 176, 1-10.

25. Jenab, M., & Nazari, B. (2019). The study of water productivity and yield gap of wheat, barley and maize in Qazvin province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49 (6), 1405-1417. [In Persian with English abstract]
26. Zahed, M., Soltani, A., Zeinali, E., Torabi, B., Zand, E., & Alimagham, 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]
27. Mohammadzadeh, Z., Soltani, A., Ajamnoroezi, H., & Bazrgar, A. B. (2020). Modeling of sugar beet yield gap and potential in Iran. *Journal of Sugar Beet*, 36 (1), 27-46. [In Persian with English abstract]
28. Gao, Z., Feng, H. Y., Liang, X. G., Lin, S., Zhao, X., Shen, S., & Zhou, S. L. (2021). Adjusting the sowing date of spring maize did not mitigate against heat stress in the North China Plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 298, 108274.
29. Fallah, S., & Reza Tadayon, M. (2014). Effect of sowing date and planting density on growth, yield and yield components of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in Shahrekord area. *Research in Field Crop Journal*, 1 (2), 11-21. [In Persian with English abstract]
30. Nunes, H. G. G. C., Farias, V. D. S., Sousa, D. P., Costa, D. L. P., Pinto, J. V. N., Moura, V. B., ... & Souza, P. J. O. P. (2021). Parameterization of the AquaCrop model for cowpea and assessing the impact of sowing dates normally used on yield. *Agricultural Water Management*, 252, 106880.
31. Kamali, N., Khajehpour, M. R., & Soleymani, A. (2017). Studying some physiological factors influencing the growth of Barley cultivars affected by planting date. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 48 (1), 183-197. [In Persian with English abstract]
32. Abbasi, F., Sohrab, F., & Abbasi, N. (2017). Evaluation of irrigation efficiencies in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 17 (67), 113-120. [In Persian with English abstract]
33. Balboa, G. R., Archontoulis, S. V., Salvagiotti, F., Garcia, F. O., Stewart, W. M., Francisco, E., & Ciampitti, I. A. (2019). A systems-level yield gap assessment of maize-soybean rotation under high-and low-management inputs in the Western US Corn Belt using APSIM. *Agricultural Systems*, 174, 145-154.
34. Davis, K. F., Rulli, M. C., Garrassino, F., Chiarelli, D., Seveso, A., & D'Odorico, P. (2017). Water limits to closing yield gaps. *Advances in water resources*, 99, 67-75.
35. Espe, M. B., Hill, J. E., Leinfelder-Miles, M., Espino, L. A., Mutters, R., Mackill, D., & Linquist, B. A. (2018). Rice yield improvements through plant breeding are offset by inherent yield declines over time. *Field Crops Research*, 222, 59-65.

