



Documenting Production Conditions and Quantifying the Yield Gap of Winter Wheat and Barley in Alborz Province by Using the APSIM Model

Sorayya Navid^{1✉} | Mohammadreza Jahansouz² | Saied Soufizadeh³

1. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: navid.sorayya@ut.ac.ir
2. Department of Agronomy and Plant Breeding, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: jahansouz@ut.ac.ir
3. Department of Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: s_soufizadeh@sbu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Objective: This study aimed to characterize the production conditions and quantify the yield gap of spring wheat and barley in Alborz province using crop and climate models.
Article history: Received 22 December 2024 Received in revised form 11 March 2025 Accepted 19 May 2025 Published online 27 June 2025	Method: The potential regional yield over the past decade was estimated using the APSIM-7.1 sub-models (APSIM-Wheat and APSIM-Barley). These models were first parameterized for dominant local cultivars, and their performance evaluated using climatic data, regional management practices, and genetic coefficients. Data collection involved a four-year study in two phases: farm and field. Parameterization was based on a two-year experiment (2014–2015 at the Atomic Energy Organization farm and 2016–2017 at the University of Tehran), employing a randomized complete block design with 12 treatments (six wheat and six barley cultivars) and three replications. Model evaluation used data from 60 farms in Nazarabad during 2018–2019 and 2019–2020.
Keywords: Actual yield Moisture regime Planting date Potential yield Simulation of yield Yield gap	Results: Model evaluation indices (nRMSE, CRM, D-index, R^2) confirmed the effectiveness of APSIM in simulating wheat and barley yields. Simulations indicated potential yields of approximately 10,800 kg/ha for wheat and 10,350 kg/ha for barley over the past 10 years. The yield gaps at different levels were: Level 1 (difference between potential and leading farmers) –18.5% for wheat and 29.5% for barley; Level 2 (available vs. leading farmers) –14.9% and 3.1%; Level 3 (available vs. actual yields) –26.5% and 24.0%; and Level 4 (actual vs. regional average yields) –18.3% and 23.7%. Key management factors influencing yield gaps included irrigation schedule, water use, planting date, cultivar choice, nitrogen application, and plant density.
	Conclusions: Adopting optimal management practices—such as tailored irrigation, fertilizer application, planting timing, and cultivar selection—can help farmers reduce yield gaps and conserve resources. The APSIM model proves valuable for forecasting, scenario analysis, and decision-making aimed at improving productivity in Alborz province.

Cite this article: Navid, S., Jahansouz, M., & Soufizadeh, S. (2025). Documenting Production Conditions and Quantifying the Yield Gap of Winter Wheat and Barley in Alborz Province by Using the APSIM Model. *Journal of Crops Improvement*, 27 (2), 203-222. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.387384.2910>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.387384.2910>

Publisher: University of Tehran Press.



مستندسازی شرایط تولید و کمی سازی خلأ عملکرد گندم و جو پاییزه در استان البرز با بهره گیری از مدل آپسیم

ثریا نوید^۱ | محمدرضا جهانسوز^۲ | سعید صوفی زاده^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: navid.sorayya@ut.ac.ir

۲. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: jahansuz@ut.ac.ir

۳. گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: s_soufizadeh@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۶

هدف: پژوهش حاضر به منظور مستندسازی شرایط تولید و کمی سازی خلأ عملکرد گیاهان گندم و جو پاییزه در استان البرز با استفاده از مدل های زراعی و اقلیمی انجام شد.

روش پژوهش: جهت پیش بینی متوسط عملکرد پتانسیل منطقه طی ۱۰ سال گذشته از زیرمدل های نسخه ۷/۱ مدل آپسیم (APSIM-Wheat و APSIM-Barley) استفاده شد. به این منظور ابتدا زیرمدل های یادشده برای ارقام غالب تعیین شده پارامتریایی و سپس کارایی مدل برای پیش بینی عملکرد ارقام مورد ارزیابی قرار گرفت. برای انجام عمل پارامتریایی و ارزیابی مدل نیاز به داده های هواشناسی، مدیریت رایج در منطقه و ضرایب ژنتیکی ارقام بود. جهت جمع آوری این داده ها، پژوهشی چهارساله در دو بخش مزرعه ای و میدانی انجام شد. جهت پارامتریایی مدل، آزمایشی دوساله در مزرعه سازمان انرژی اتمی (سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳) و دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران (سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵) در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با ۱۲ تیمار (شش رقم جو و شش رقم گندم) و سه تکرار انجام شد. با استفاده از داده های آزمایش مزرعه ای، ضرایب ژنتیکی ارقام شناسایی و مدل بر مبنای آن بومی سازی شد. جهت ارزیابی مدل نیز نمونه برداری میدانی طی سال های زراعی ۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸، از ۶۰ مزرعه منتخب منطقه نظرآباد واقع در استان البرز صورت گرفت.

یافته ها: در هر دو سال آزمایش شاخص های ارزیابی مدل (R^2 و D-index، CRM، nRMSE) کارایی زیرمدل های آپسیم در شبیه سازی عملکرد گندم و جو را تأیید کردند. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان داد که در شرایط پتانسیل، طی ۱۰ سال گذشته گیاهان گندم و جو در استان البرز به طور متوسط توانایی تولید ۱۰۸۰۰ و ۱۰۳۵۰ کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه را داشته اند. خلأ عملکرد گندم در سطح یک (اختلاف عملکردهای پتانسیل و کشاورزان پیشرو)، سطح دو (اختلاف عملکردهای کشاورزان پیشرو و قابل دسترس)، سطح سه (اختلاف عملکردهای قابل دسترس و واقعی) و سطح چهار (اختلاف عملکرد واقعی و متوسط منطقه)، به ترتیب ۱۸/۵، ۱۴/۹، ۲۶/۵، ۱۸/۳ درصد و در جو به ترتیب ۲۹/۵، ۳/۱، ۲۴/۰ و ۲۳/۷ درصد بود. عوامل مدیریتی از جمله دور آبیاری، حجم آب مصرفی در طول فصل رشد، تاریخ کاشت، رقم مورد کاشت، میزان کود مصرفی نیتروژن و تراکم گیاهی، مهم ترین عوامل مؤثر بر خلأ عملکرد گندم و جو در استان البرز بودند.

نتیجه گیری: بنا بر نتایج این بررسی، کشاورزان منطقه می توانند با اتخاذ راهبردهای مناسب و بهینه مدیریتی (سطوح مختلف رژیم های رطوبتی، کودی، تاریخ کشت و رقم مناسب کشت)، ضمن افزایش تولیدات منطقه در حفظ منابع کشور مؤثر باشند. در این راستا استفاده از مدل زراعی آپسیم نیز در پیش بینی، سناریوسازی و اتخاذ تصمیم های مدیریتی می تواند راهگشا باشد.

کلیدواژه ها:

شبیه سازی عملکرد

شکاف عملکرد

عملکرد پتانسیل

عملکرد واقعی

تاریخ کاشت

رژیم رطوبتی

استناد: نوید، ثریا؛ جهانسوز، محمدرضا و صوفی زاده، سعید (۱۴۰۴). مستندسازی شرایط تولید و کمی سازی خلأ عملکرد گندم و جو پاییزه در استان البرز با بهره گیری از مدل آپسیم. به زراعی کشاورزی، ۲۷ (۲)، ۲۰۳-۲۲۲. DOI: <https://doi.org/10.22059/jci.2025.387384.2910>



۱. مقدمه

سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد^۱ (۲۰۲۲) اعلام نموده است که در سال‌های آتی دستیابی به امنیت غذایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان با چالش‌های مختلفی از جمله افزایش جمعیت، پدیده تغییر اقلیم، تخریب خاک، کاهش منابع آبی، رقابت برای زمین‌های زراعی برای مصارف غیرکشاورزی و کاهش تولیدات کشاورزی همراه خواهد بود. از این‌رو، پژوهش‌گران راهبردهای زیادی را جهت تأمین نیاز روزافزون بشر به مواد غذایی ارائه کرده‌اند که افزایش عملکرد در واحد سطح و کاهش خلأ عملکرد گزینه امیدوارکننده‌تری است. به‌تازگی ارزیابی خلأ عملکرد و تعیین اصلی‌ترین عوامل ایجاد آن نیز ازجمله چالش‌های مهم کشاورزی بوده و در مطالعات متعددی به‌عنوان شاخص مهم برای افزایش عملکرد در مناطق مختلف استفاده شده است (لاله^۲ و همکاران، ۲۰۲۳؛ هاتفیلد^۳ و بریس^۴، ۲۰۱۹).

روش‌های مختلفی جهت کمی‌سازی خلأ عملکرد استفاده می‌شود که ازجمله می‌توان به استفاده از دانش مدل‌سازی اشاره کرد (کیتینگ^۵ و همکاران، ۲۰۲۴). مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی که فرایندهای مؤثر در رشد گیاه و تشکیل عملکرد را پیش‌بینی می‌کنند، با اهدافی مانند درک واکنش گیاهان زراعی به تغییرات اقلیمی و خاکی، ارزیابی ویژگی‌های فیزیولوژیکی در بهبود ژنتیکی عملکرد و کمک به تصمیم‌سازی در راستای بهینه‌سازی استفاده از منابع قابل‌دسترس مورد استفاده قرار می‌گیرند (میهرت^۶ و همکاران، ۲۰۲۴). از طرفی، با توجه به محدودیت‌های زمانی در استفاده از آزمایش‌های زراعی، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد برای برآورد عملکرد محصولات و همچنین بهبود مدیریت بوم‌نظام‌های کشاورزی، می‌تواند به صرفه‌جویی در زمان و هزینه منجر شود (هوکن^۷ و همکاران، ۲۰۱۷). بنابراین در سیستم‌های کشاورزی با توجه به این‌که عملکرد و بهره‌وری گیاهان بسته به شرایط محیطی و عوامل آب‌وهوایی متفاوت است، لذا مدل‌های مختلفی برای تشخیص خلأ عملکردی و بهینه‌سازی پتانسیل تولید توسعه یافته‌اند. ازجمله این مدل‌ها، می‌توان به مدل زراعی اُپسیم^۸ اشاره نمود (ما^۹ و همکاران، ۲۰۱۵).

باوجود اهمیت و جایگاه رهیافت مدل‌سازی در ارزیابی خلأ عملکرد که مستلزم پایش عوامل ژنتیکی، محیطی و مدیریتی، کمی‌کردن تأثیر آن‌ها، پیش‌بینی عملکرد قابل‌برداشت و درنهایت تحلیل خلأ عملکرد است، اما استفاده از این دسته از مدل‌ها در ایران چندان موردتوجه جدی قرار نگرفته است. از طرف دیگر نیز، دلایل پایین‌بودن عملکرد محصولات استراتژیک در کشور با رویکرد خلأ عملکردی، کمتر مطالعه شده است و به‌طورعمده به‌صورت ایستگاهی بوده است. از این‌رو، با توجه به این‌که ایران در کمربند ناحیه خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و در آن مساحت زمین‌های فقیر و غیر حاصلخیز رو به فزونی نهاده و خشکی نیز، همواره عامل اصلی محدودکننده تولید در گندم‌زارها می‌باشد، لذا بررسی وضعیت تولید مناطق مختلف و کمی‌سازی خلأ عملکرد این محصولات در کشور امری ضروری است. در این راستا، روی گیاهان زراعی گندم^{۱۰} و جو^{۱۱} که به‌ترتیب اولین و چهارمین محصول زراعی مهم دنیا و ایران محسوب می‌شوند و نقش مهمی در امنیت غذایی مردم ایران بر عهده دارند، پژوهش حاضر انجام شد، زیرا که تغییر در میزان عملکرد و تولید گیاهان یادشده می‌تواند تأثیرات شگرفی را بر تولید غذا و علوفه در کشور داشته باشد.

1. FAO
2. Laleh
3. Hatfield
4. Beres
5. Keating
6. Mihret
7. Hochman
8. APSIM
9. Ma
10. *Triticum aestivum* L.
11. *Hordeum vulgare* L.

لازم به ذکر است که نتایج مطالعه حاضر ظرفیت تولید بالقوه گندم و جو را در استان البرز از نظر تولید محصول مشخص کرده و سپس براساس با مقایسه عملکرد بالقوه با عملکرد واقعی، خلأ عملکرد این دو محصول را پیش‌بینی می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده برنامه‌ریزان را قادر خواهد ساخت تا با اطلاع از ظرفیت‌های تولید، سیاست‌گذاری خود را بسته به شرایط هر منطقه در جهت مدیریت خلأهای تولید هماهنگ کرده و تا حد امکان به تولید بالقوه نزدیک شوند. از سوی دیگر، به‌دست‌آوردن الگویی برای آنالیز خلأ عملکرد گندم و جو در استان البرز، در آینده به سایر استان‌های مشابه قابل‌تعمیم است و در نتیجه امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر تولید براساس تغییرات مکانی و زمانی عملکرد فراهم خواهد شد.

۲. پیشینه پژوهش

عملکرد تولیدشده توسط گیاه زراعی در شرایط عدم وجود محدودیت آب و عناصر غذایی، آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز را عملکرد پتانسیل (بالقوه) می‌نامند (واندرلینکدن^۱ و همکاران، ۲۰۱۵). عملکرد بالقوه یک گیاه به عوامل آب‌وهوایی مانند تشعشع، درجه حرارت و ویژگی‌های ژنتیکی گیاه وابسته است (قرینه^۲ و همکاران، ۲۰۱۲). بدیهی است که تأثیر دو گروه عوامل محدودکننده (آب و عناصر غذایی) و کاهش‌دهنده (آفات، بیماری‌ها، علف‌های هرز)، باعث کاهش عملکرد بالقوه شده و میزان آن را به عملکرد واقعی کاهش می‌دهند. اختلاف بین عملکرد واقعی یا بالقوه در مقابل عملکرد به‌دست‌آمده تحت شرایط مطلوب مدیریتی (عملکرد مزرعه) را خلأ عملکرد می‌گویند (سدراس^۳ و دنشین^۴، ۲۰۱۶). در یک منطقه مشخص، خلأ عملکرد اختلاف بین عملکرد پتانسیل با عملکرد واقعی به‌دست‌آمده در مزارع کشاورزان آن منطقه می‌باشد (ون ایترسوم^۵ و همکاران، ۲۰۱۶).

آنالیز خلأ عملکرد یک تخمین کیفی از امکان افزایش در ظرفیت تولید غذا برای یک ناحیه مشخص را فراهم می‌آورد که یک جزء مهم در طراحی راهبردهای تأمین غذا در مقیاس منطقه‌ای، ملی و در سطح جهانی است (ون وارت^۶ و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین، در برنامه‌ریزی‌های کلان کشور و اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی مناسب برای منطقه، آگاهی از میزان بالقوه عملکرد از طریق پیش‌بینی آن و تعیین عملکرد واقعی برداشت‌شده ضروری به‌نظر می‌رسد. در این میان می‌توان تأثیر عوامل محدودکننده و کاهش‌دهنده عملکرد را از طریق پایش مشخص نمود و با تعیین و تحلیل خلأ عملکرد امکان ارائه راه‌کارهای اجرایی برای پر کردن این خلأ و نزدیک کردن عملکرد واقعی به عملکرد بالقوه را فراهم کرد.

مدل اسپیم، مدلی مکانیستیکی بوده که حاصل تلاش گروهی از متخصصان استرالیایی است که وضعیت یک مزرعه را از نظر شرایط خاکی و گیاهی با جزئیات مناسب شبیه‌سازی کرده و می‌تواند رشدونمو گیاهان مختلف ازجمله گندم و جو را شبیه‌سازی کند (هوکمن و همکاران، ۲۰۱۷). این مدل می‌تواند با کمک به بهبود مدیریت در زمینه‌های مختلف، ازجمله انتخاب رقم مناسب، تعیین ویژگی‌های مطلوب گیاهی (تاریخ کشت، تراکم گیاهی)، مدیریت کود نیتروژن، پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد محصول، موجبات افزایش عملکرد واقعی گیاهان زراعی در اقلیم فعلی و تغییر یافته را فراهم گرداند (دی‌کتا^۷ و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین با استفاده از مدل‌ها و با کمک آمار هواشناسی بلندمدت می‌توان رفتار گیاه را در شرایط بالقوه و تنش شبیه‌سازی کرده و با ارزیابی نتایج آن و با مستندسازی شرایط تولید

1. Vanderlinkden

2. Gharineh

3. Sadras

4. Denison

5. Van Ittersum

6. Van Wart

7. Devkota

محصولات زراعی، خلأ بین عملکرد واقعی و عملکرد پتانسیل را کاهش داد. پژوهشگران گزارش کردند که برای کاهش خلأ عملکرد و دستیابی به عملکرد مطلوب گیاهان، باید طول فصل رشد گیاه با منابع محیطی موجود تطبیق داشته و سایر ویژگی های گیاهی برای استفاده از منابع محیطی در حد مطلوب باشند. از این رو، می توان محدودیت های محیطی، ژنتیکی و مدیریتی در تولید گیاهان در هر نقطه ای را با کمک مدل های شبیه سازی گیاهان زراعی تجزیه و تحلیل کرد و با اتخاذ سازوکارهای مختلف کاشت از جمله انتخاب ارقام مناسب و مقاوم به تنش های محیطی، تنظیم تاریخ کشت، استفاده از منابع کودی و آبی بهینه میزان تولید هر منطقه را افزایش داد (فرانک^۱ و همکاران، ۲۰۱۵).

۳. روش شناسی پژوهش

۳.۱. روش تعیین خلأ عملکرد گندم و جو در سطوح مختلف تولید

در این پژوهش خلأ عملکرد گندم و جو در سطوح مختلف تولید و هم چنین درصد اختلاف عملکرد هر کدام از سطوح با متوسط عملکرد پتانسیل منطقه تعیین شد (جدول ۱). در جدول (۱) منظور از عملکرد پتانسیل: میانگین عملکرد شبیه سازی شده توسط مدل اپسیم برای منطقه طی ۱۰ سال گذشته، عملکرد کشاورزان پیشرو: میانگین عملکردهای کشاورزان نمونه، عملکرد قابل دسترس: متوسط عملکرد ارقام جدید گندم (سیوند و پارسی) و جو (فجر ۳۰، ریحان ۰۳ و رودشت) در آزمایش های مزرعه ای، عملکرد واقعی: عملکرد به دست آمده از آزمایش های میدانی و با مدیریت کشاورزان و عملکرد منطقه: عملکرد گزارش شده توسط جهاد کشاورزی استان البرز می باشد.

جدول ۱. سطوح محاسبه شده خلأ عملکرد گندم و جو در استان البرز

سطح	خلأ عملکرد
اول	اختلاف عملکرد پتانسیل و عملکرد کشاورزان پیشرو
دوم	اختلاف عملکرد کشاورزان پیشرو و عملکرد قابل دسترس
سوم	اختلاف عملکرد قابل دسترس و عملکرد واقعی
چهارم	اختلاف عملکرد واقعی و متوسط عملکرد منطقه

۳.۱.۱. روش تعیین عملکردهای پتانسیل، قابل دسترس و واقعی منطقه

جهت تعیین عملکرد بالقوه (پتانسیل) گندم و جو در استان البرز، از نسخه ۷/۱ زیرمدل های شبیه ساز سیستم های تولید کشاورزی که یک مدل شبیه سازی رشد محصولات زراعی است، استفاده شد. برای این منظور ابتدا زیرمدل های APSIM-Wheat و APSIM-Barley برای ارقام، غالب تعیین شده پارامتریابی و سپس کارایی مدل برای پیش بینی عملکرد ارقام مورد ارزیابی قرار گرفت. برای انجام عمل پارامتریابی و ارزیابی مدل، نیاز به داده های هواشناسی، مدیریت رایج در منطقه و ضرایب ژنتیکی ارقام بود، پژوهشی چهارساله در دو بخش مزرعه ای و میدانی انجام شد. لازم به یادآوری است که پارامترهای مدل های بیوفیزیکی را می توان به عنوان کمیت هایی تعریف کرد که در ابتدای هر شبیه سازی ارزش دهی می شوند و در طی شبیه سازی تغییر نمی کنند (دونالتی^۲ و کانفالونتری^۳، ۲۰۱۱). در مدل های شبیه سازی دو نوع پارامتر وجود دارد؛ اول پارامترهای گونه ای که برای همه ارقام یکسان بوده و دیگری ویژگی های

ژنتیکی که برای ارقام مختلف متفاوت می‌باشد (والاچ^۱ و همکاران، ۲۰۱۱). بسیاری از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهی از ضرایب ژنتیکی برای بیان صفات کلیدی ارقام مختلف استفاده می‌کنند. ویژگی‌های ژنتیکی بیانگر این موضوع می‌باشند که این ضرایب مربوط به ژنتیک گیاه بوده که محیط روی آن‌ها تأثیری نداشته و تغییر آن‌ها در دامنه خاص خود می‌باشند. رشدنمو گیاه زراعی در مدل اپسیم به‌وسیله ضرایب مختلفی از جمله Vern-sens، Photop-sens، Startgf-، Grains-per-gram-stem، Potential-grain-filling-rate و Phylochron کنترل می‌شوند (میهرت و همکاران، ۲۰۲۴؛ احمد و همکاران، ۲۰۱۶). در این پژوهش جهت پارامتریابی و بومی‌سازی مدل اپسیم، آزمایش‌های مزرعه‌ای دوساله در مزرعه سازمان انرژی اتمی (سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳) و مزرعه آموزشی-پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران (سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵)، واقع در کرج انجام (جدول ۲) و مقادیر این ویژگی‌ها اندازه‌گیری شد. برای این منظور با استفاده از روش آزمون و خطا که یک روش مرسوم برای تعیین ضرایب ژنتیکی محسوب می‌شود، عملکرد و ویژگی‌های فنولوژیکی ارقام برآورد شدند (چن^۲ و همکاران، ۲۰۱۰).

جدول ۲. مختصات جغرافیایی مزارع مورد مطالعه در آزمایش‌های زراعی

سال آزمایش	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
۱۳۹۳-۹۴	۳۵/۸۴	۵۱/۳۰	۱۲۹۷
۱۳۹۵-۹۶	۳۵/۸۰	۵۰/۵۷	۱۳۱۲

آزمایش‌های مزرعه‌ای، به‌صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۱۲ تیمار (شش رقم غالب جو و شش رقم گندم) و سه تکرار انجام شدند (جدول ۳). از متغیرهای دماهای کمینه و بیشینه، بارش و تشعشع استان البرز در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ به‌عنوان ورودی اقلیمی مدل استفاده شد (جدول ۴). بر پایه عمق نفوذ ریشه نیز در سه عمق مختلف و از پنج نقطه مزرعه نمونه‌برداری خاک صورت گرفت. براساس نتیجه تجزیه خاک، بافت خاک مزرعه‌های آزمایشی لوم شنی رسی بود (جدول ۵). در هر دو سال آزمایش عملیات آماده‌سازی زمین در نیمه دوم شهریورماه صورت گرفت. به این منظور پس از عملیات دیسک‌زنی جهت تسطیح خاک با استفاده از فاروئر اقدام به احداث جوی و پشته گردید. هر واحد آزمایشی دارای ۱۲ خط کاشت به طول شش متر با فاصله ۱۵/۵ سانتی‌متر بود که با اعمال فاصله‌ی حدود ۱/۵ سانتی‌متر روی ردیف، تراکم بوته در مترمربع ۴۰۰ بوته در نظر گرفته شد. براساس نتایج آزمون خاک قبل از کاشت حدود ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیز کود فسفات آمونیوم و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار سوپر فسفات تریپل مصرف گردید. در طول فصل رشد نیز متناسب با نیاز کودی، ۱۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار در مرحله اوایل ساقه‌دهی به‌صورت سرک مصرف شد. قبل از کاشت بذور، برای حصول بیشینه سطح سبز مزرعه آبیاری گردید و عملیات کاشت در سال اول آزمایش در ۲۳ مهرماه و در سال دوم در اواسط آبان‌ماه (۱۵ آبان‌ماه)، به‌صورت دستی انجام شد. بلافاصله پس از اتمام عملیات کاشت مزرعه آبیاری گردید. به‌منظور جلوگیری از وقوع تنش خشکی بر گیاهان و ایجاد شرایط پتانسیل برای رشد، طی دوره رشد نیز شش بار (سبز آب، پنج آب، ساق آب، خوشه آب، گل آب، دان آب)، مزرعه آبیاری شد. حجم آب مصرفی نیز ۳۸۰۰ مترمکعب در هکتار بود.

در هر دو سال آزمایش، علف‌های هرز مزرعه به‌صورت دستی وجین شدند و مزارع مورد مطالعه عاری از هرگونه آفات و بیماری بودند، لذا هیچ کنترلی انجام نشد. از ابتدای اجرای طرح، حدود یک متر از هر واحد آزمایشی به‌منظور ثبت مراحل

فنولوژیک علامت گذاری و دو بار در هفته مورد ارزیابی قرار گرفت. معیار رسیدن بوته ها به مرحله رسیدگی فنولوژیکی، ورود بیش از ۵۰ درصد بوته های موردنظر به مرحله مورد هدف بود. معیار رسیدن بوته ها به مرحله رسیدگی فنولوژیکی و فیزیولوژیکی و در نتیجه برداشت نهایی، سخت و سفت شدن بذور و طلایی رنگ شدن بیش از ۵۰ درصد بوته های موردنظر بود.

جدول ۳. ارقام مورد مطالعه در پژوهش حاضر

گیاه	رقم	گیاه	رقم	گیاه	رقم
پیشگام (شاهد و غالب در منطقه)	۳۰	بهمن، ریحان و یوسف (شاهد و غالب در منطقه)	۳۰	تری کاله	۳۰
گندم	سپوند (مناسب کشت منطقه)	جو	فجر ۳۰ و ریحان ۰۳ (مناسب کشت منطقه)	جوانیلو و سناباد (مناسب کشت منطقه)	
			رودشت (رقم اصلاح شده با دانش هسته ای)		

جدول ۴. اطلاعات هواشناسی مزرعه های مورد مطالعه در طول فصل رشد

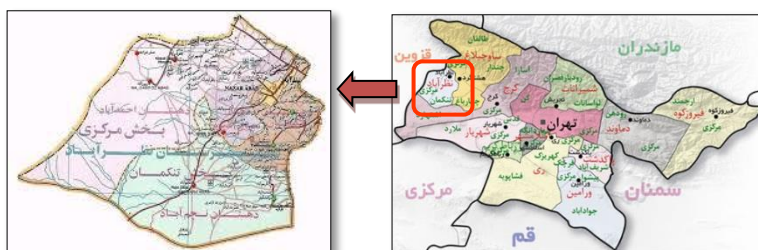
سال	متغیرهای اقلیمی	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	طول رشد
۱۳۹۵-۱۳۹۶	دمای کمینه روزانه (درجه سانتی گراد)	۱۱/۱	۴/۵	۲/۵	-۰/۲	۲/۲	۰/۷	۸/۰	۱۲/۴	۱۷/۵	۲۰/۸	۶/۵
	دمای بیشینه روزانه (درجه سانتی گراد)	۲۴/۸	۱۴/۹	۱۰/۵	۹/۸	۱۱/۹	۱۲/۸	۱۹/۴	۲۷/۵	۳۴/۰	۳۷/۲	۱۸/۴
	متوسط دمای روزانه (درجه سانتی گراد)	۱۸/۰	۹/۷	۶/۵	۴/۸	۷/۰	۶/۸	۱۳/۷	۲۰/۰	۲۵/۸	۲۹/۰	۱۲/۵
	حداقل دمای مطلق روزانه (درجه سانتی گراد)	۵/۴	-۱/۰	-۲/۲	-۷/۲	-۴/۹	-۵/۹	-۰/۲	۳/۶	۱۱/۰	۱۴/۱	-۰/۱
	مجموع بارش (میلی متر)	۵/۰	۲۱/۵	۲۶/۱	۷/۶	۱۶/۹	۱۸/۸	۳۵/۲	۲/۰	۷/۰	۳/۰	۱۴۰/۱
۱۳۹۶-۱۳۹۷	تعداد روزهای یخبندان	۰/۰	۱/۰	۴/۰	۱۳/۰	۷/۰	۱۲/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۳۷/۰
	دمای کمینه روزانه (درجه سانتی گراد)	۱۱/۵	۷/۲	-۱/۷	-۰/۲	-۱/۶	۲/۱	۷/۸	۱۲/۸	۱۶/۴	۱۹/۶	۶/۹
	دمای بیشینه روزانه (درجه سانتی گراد)	۲۵/۸	۱۹/۳	۸/۶	۹/۲	۶/۱	۱۳/۴	۱۷/۸	۲۶/۶	۳۳/۰	۳۵/۷	۱۸/۹
	متوسط دمای روزانه (درجه سانتی گراد)	۱۸/۶	۱۳/۳	۳/۵	۴/۵	۲/۲	۷/۷	۱۲/۸	۱۹/۷	۲۴/۷	۲۷/۷	۱۲/۹
	حداقل دمای مطلق روزانه (درجه سانتی گراد)	۴/۹	۱/۱	-۱۱/۰	-۴/۷	-۷/۶	-۶/۹	-۰/۴	۳/۳	۱۱/۲	۱۴/۹	۰/۰
۱۳۹۷-۱۳۹۸	مجموع بارش (میلی متر)	۰/۰	۳/۲	۵/۰	۳۹/۰	۴۴/۸	۱۹/۹	۳۷/۴	۵۳/۹	۰/۰	۰/۸	۲۰۲/۰
	تعداد روزهای یخبندان	۰/۰	۰/۰	۲۰/۰	۱۷/۰	۱۹/۰	۱۰/۰	۱/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۶۷/۰

جدول ۵. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه های مورد مطالعه

سال	عمق (سانتی متر)	نسبی رطوبت در متر مربع	اسیدیته	فسفر	پتاسیم	نیترژن (درصد)	کربن آلی (درصد)	وزن مخصوص ظاهری (گرم در سانتی متر مکعب)	نسب (درصد)	رس (درصد)	سیلیت (درصد)	باقی خاک
۱۳۹۵-۱۳۹۶	۰-۳۰	۱/۴	۷/۸	۱۷/۳	۳۵۳/۰	۰/۰۶	۱/۱	۱/۳	۶۱/۶	۲۴/۱	۱۴/۳	لوم شنی رسی
	۳۰-۶۰	۱/۲	۷/۸	۱۵/۲	۳۳۳/۰	۰/۰۳	۰/۹	۱/۶	۶۲/۲	۲۲/۲	۱۵/۶	لوم شنی رسی
	۳۰-۹۰	۱/۳	۷/۸	۱۳/۵	۲۸۹/۰	۰/۰۳	۰/۸	۱/۳	۶۲/۲	۲۲/۲	۱۵/۶	لوم شنی رسی
۱۳۹۶-۱۳۹۷	۰-۳۰	۲/۷	۸/۴	۳۱/۲	۲۹۲/۰	۰/۰۷	۱/۹	۱/۳	۲۸/۰	۳۳/۰	۳۹/۰	لوم شنی رسی
	۳۰-۶۰	۳/۰	۸/۳	۱۸/۳	۲۸۱/۰	۰/۰۴	۰/۴	۱/۳	۲۶/۰	۳۴/۰	۴۰/۰	لوم شنی رسی
	۳۰-۹۰	۱/۵	۸/۴	۱۷/۳	۲۵۴/۰	۰/۰۴	۰/۲	۱/۱	۲۶/۰	۴/۰	۴۰/۰	لوم شنی رسی

بنابراین، یک هفته پس از رسیدگی فیزیولوژیکی تمامی ارقام مورد مطالعه (در سال اول آزمایش ۲۷ خردادماه و در سال دوم آزمایش در ۱۵ تیرماه)، از چهار ردیف وسط هر واحد آزمایشی حدود یک متر از سطح خاک کفبر شده و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل گردید. بوته های موردنظر جهت اندازه گیری وزن خشک به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی گراد قرار داده شدند و در نهایت با ترازوهای دیجیتالی عملکرد دانه و زیستی ارقام توزین گردیدند.

در این قسم بررسی‌ها، ارزیابی مدل یا مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده‌شده در شرایط مختلف، جهت تعیین صحت مدل، مهم‌ترین و حیاتی‌ترین گام در بررسی کارایی مدل محسوب می‌شود (اندرزیان^۱ و همکاران، ۲۰۱۱). جهت ارزیابی مدل اِپسیم در شرایط واقعی (مدیریت مزرعه توسط کشاورزان)، از داده‌های آزمایش‌های میدانی استفاده شد. به‌منظور جمع‌آوری داده‌های خاکی، گیاهی و مدیریتی در شرایط واقعی، تعداد ۳۰ مزرعه جو و ۳۰ مزرعه گندم در شهرستان نظرآباد واقع در استان البرز (تنکمان، احمدآباد، نجم‌آباد، خرم‌آباد و گازورسنگ)، انتخاب و در سال‌های زراعی ۹۸-۱۳۹۷ و ۹۹-۱۳۹۸ اقدام به تکمیل پرسش‌نامه و نمونه‌برداری گیاهی و خاکی شد (شکل ۱). در بخش پرسش‌نامه نیز به جمع‌آوری طیف گسترده‌ای از اطلاعات مشتمل بر تاریخچه مزرعه، عملیات کاشت، داشت و برداشت و چگونگی مدیریت مزرعه اقدام شد. هم‌چنین به‌منظور بررسی وضعیت رشد ارقام در مزارع انتخاب‌شده، نمونه‌برداری از خاک و گیاه انجام شد. اندازه‌گیری‌های مربوط به خاک عبارتند از بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن)، جرم مخصوص ظاهری، ضریب نگهداری آب در خاک، اسیدیته، ظرفیت تبادل کاتیونی، میزان ماده آلی، قابلیت هدایت الکتریکی و غلظت‌های نیتروژن معدنی، فسفر و پتاسیم. اندازه‌گیری‌های گیاهی نیز شامل یادداشت‌برداری‌های مراحل اصلی فنولوژیکی در گیاه (سبزشدن، گلدهی و برداشت نهایی) و وزن خشک اندام هوایی به تفکیک هر اندام بودند. به این منظور، نمونه‌برداری‌های تخریبی از دو مرحله مهم گلدهی و برداشت نهایی، صورت گرفت. در هر یک از مراحل نمونه‌برداری، یک مترمربع از هر زمین برداشت و به آزمایشگاه منتقل گردید و همانند بخش زراعی اندازه‌گیری‌های لازم صورت گرفت.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر

از اطلاعات ثبت‌شده در این مرحله برای تعیین کارایی مدل استفاده شد. برای این منظور از شاخص‌های ضریب تبیین^۲ (R^2)، جذر خطای میانگین مربعات نرمال‌شده^۳ ($nRMSE$)، (رابطه ۱)، ضریب جرمی خطا^۴ (CRM)، (رابطه ۲) و ضریب هم‌خوانی^۵ (D -index) (رابطه ۳)، استفاده شد.

رابطه ۱) (بنایان^۶ و همکاران، ۲۰۰۹).

رابطه ۲) (لوگو^۷ و گرین^۸، ۱۹۹۱).

رابطه ۳) (ویلموت^۹، ۱۹۸۲).

$$nRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{n}} \times \frac{100}{M}$$

$$CRM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{\sum_{i=1}^n M_i}$$

$$D-index = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2}$$

1. Andarzian
2. Coefficient of Determination
3. Normalized Root Mean Square Error
4. Coefficient of Residual Mass
5. Agreement Index
6. Bannayan
7. Loague
8. Green
9. Willmott

در روابط بالا، E_i و M_i مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده، n تعداد مشاهدات و M میانگین داده‌های مشاهده شده می‌باشند. $nRMSE$ درصد تفاوت نسبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده نسبت به میانگین داده‌های مشاهده شده را نشان می‌دهد. CRM ، شاخصی است که بیش‌تر^۱ یا کم‌تر بودن^۲ مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل را نسبت به مقادیر مشاهده شده یا واقعی نشان می‌دهد. منفی بودن این شاخص به معنای بیش‌تر بودن و مثبت بودن آن به معنای کم‌تر بودن مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر مشاهده شده است. چنانچه مدل شبیه‌سازی را به‌طور کامل انجام دهد، یعنی مقادیر شبیه‌سازی شده برابر با مقادیر مشاهده شده باشد، مقدار شاخص $D-index$ برابر با یک و اگر مقادیر شبیه‌سازی شده برای تمامی داده‌ها برابر با میانگین داده‌های مشاهده شده باشد، مقدار این شاخص برابر با صفر خواهد بود. درنهایت، با استفاده از زیرمدل‌های اسپیس، عملکرد پتانسیل گیاهان مورد هدف در استان البرز، عملکرد قابل دستیابی با استفاده از داده‌های آزمایش مزرعه‌ای و عملکرد واقعی منطقه با استفاده از نتایج آزمایش‌های میدانی برآورد شدند.

۴. یافته‌های پژوهش

۴.۱. مستندسازی شرایط تولید گندم و جو در استان البرز

۴.۱.۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

در مزارع مورد بررسی در شهرستان نظرآباد درصد شن در محدوده ۵۷-۱۹ درصد، سیلت در محدوده ۵۷-۲۳ درصد و رس در محدوده ۳۲-۱۲ درصد قرار داشت (جدول ۶). براساس روش هیدرومتری و مثلث خاک، بافت خاک بیش از ۵۰ درصد مزارع از نوع لومی بود. تخلخل کل در بافت لومی کم‌تر از ۴۰ درصد بوده و مقدار ماکروپروزیته کم و ناچیز بوده که سرعت نفوذ آب در خاک و همچنین تهویه را کاهش می‌دهد. برای اصلاح بافت خاک می‌توان کود سبز و دامی به کار برد که مشاهدات میدانی نشان داد در برخی از مزارع، کشاورزان به‌طور تجربی این کار را انجام می‌دهند. با توجه به مقادیر نسبتاً کم رس، احتمالاً با کاهش عمق آبیاری و افزایش تعداد دفعات آبیاری می‌توان عملکرد را تا حدودی در منطقه افزایش داد.

جدول ۶. محدوده ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزارع مورد بررسی شهرستان نظرآباد در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری

محدوده مورد بررسی	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	اسیدیت (دسی‌زیمنس در متر)	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس در متر)	کربن آلی (درصد)	نیترات (پی‌پی‌ام)	وزن مخصوص ظاهری (گرم در سانتی‌متر مکعب)
میانگین مزارع	۱۹/۰-۵۷/۵	۲۳/۰-۵۷/۰	۱۲/۰-۳۲/۰	۷/۵-۸/۵	۳/۸-۶/۱	۰/۴-۱/۳	۲۵/۸-۱۵۴/۶	۱/۳-۱/۷
۵۰ درصد مزارع	۲۲/۰-۳۵/۰	۴۰/۵-۴۵/۲	۱۹/۰-۲۷/۰	۷/۷-۸/۳	۴/۰-۵/۸	۰/۶-۱/۰	۴۲/۵-۷۵/۰	۱/۳-۱/۵

هدایت الکتریکی ۵۰ درصد از مزارع مورد مطالعه بین ۴/۰-۵/۸ دسی‌زیمنس بر متر بود. اسیدیت خاک مزارع شهرستان نظرآباد در استان البرز قلیایی بوده و در ۵۰ درصد از مزارع مقدار آن در محدوده ۷/۷-۸/۳ قرار داشت. اسیدیت مناسب از نظر در دسترس بودن مواد مغذی خاک برای گیاه زراعی ۶/۵ تا ۷/۰ بوده و میزان بهینه آن برای گندم و جو ۷-۶ می‌باشد. در هیچ‌یک از نمونه‌های مورد بررسی اسیدیت خاک در محدوده بهینه قرار نداشت، لذا با توجه به تأثیر اسیدیت به شکل قابل استفاده عناصر غذایی و ایجاد محدودیت در جذب عناصر کم‌مصرف و فسفر استفاده از روش‌های مناسب کوددهی در منطقه امری ضروری به نظر می‌رسد.

میزان کربن آلی خاک در مزارع شهرستان نظرآباد بین ۰/۴ تا ۱/۳ درصد و در ۵۰ درصد مزارع در محدوده ۰/۶ تا

1. Overestimation
2. Underestimation

۱/۰ درصد بود. از دلایل پایین بودن میزان کربن آلی در منطقه، جمع آوری و سوزاندن بقایای محصولات توسط کشاورزان و کاربرد بسیار کم کودهای حیوانی بود. در آزمون خاک مشخص شد که مقدار نیترات در مزارع شهرستان نظرآباد در محدوده ۱۵۴/۶-۲۵/۸ پی پی ام و وزن مخصوص ظاهری در محدوده ۱/۷-۱/۳ گرم در سانتی متر مکعب قرار داشت. مقدار نیترات در ۵۰ درصد از مزارع مورد بررسی نیز بین ۴۲/۵ تا ۷۵/۰ پی پی ام و وزن مخصوص ظاهری در محدوده ۱/۵-۱/۳ گرم در سانتی متر مکعب بود. مشاهدات نشان داد که در مزارع تنکمان با کشت صیفی جات و در برخی از مزارع که از کودهای دامی استفاده می شد، مقدار نیترات خاک بالاتر بود که علاوه بر تأثیر مثبت بر رشد، باعث افزایش کمی و کیفی محصولات زراعی می گردد.

۲.۱.۴. روش و دور آبیاری

در بیش از ۵۰ درصد مزارع مورد مطالعه در شرایط واقعی، از آبیاری جوی و پشته ای و در مزارع کشاورزان پیشرو نیز از روش آبیاری بارانی استفاده می شد (شکل ۲). در روش آبیاری جوی و پشته تلفات آبی بیش تر بوده و به دلیل بالا بودن دبی، آب در سطح کمتری پخش می شود. در بیش تر مزارع مورد مطالعه نیز در طول فصل رشد، گیاهان زراعی گندم و جو چهار بار آبیاری شدند. در شرایط پتانسیل نیاز آبی گیاهان گندم و جو حدود ۶۰۰۰-۴۵۰۰ متر مکعب در هکتار بوده که در هفت مرحله فنولوژیکی (پیش کاشت، خاک آب، پنج آب، ساق آب، خوشه آب، گل آب و دان آب) آبیاری انجام می شود. با توجه به این که تعداد و حجم آب مورد استفاده در مزارع کشاورزان کم تر از حد پتانسیل بود، لذا از دلایل عملکرد پایین گندم و جو در شرایط واقعی، محدودیت آب می باشد. مشاهدات میدانی نشان داد که منطقه تنکمان نسبت به سایر مناطق مورد مطالعه از شرایط آبی بهتری برخوردار بودند و کشاورزان این منطقه از لحاظ دسترسی به آب از محدودیت کمتری برخوردار بودند. هم چنین با توجه به دسترسی کشاورزان به آب، در این منطقه تناوب کاهو/نخود فرنگی - گندم/جو داشتند (شکل ۲)، که باعث افزایش عملکرد گندم و جو نسبت به سایر مناطق مورد مطالعه شد.

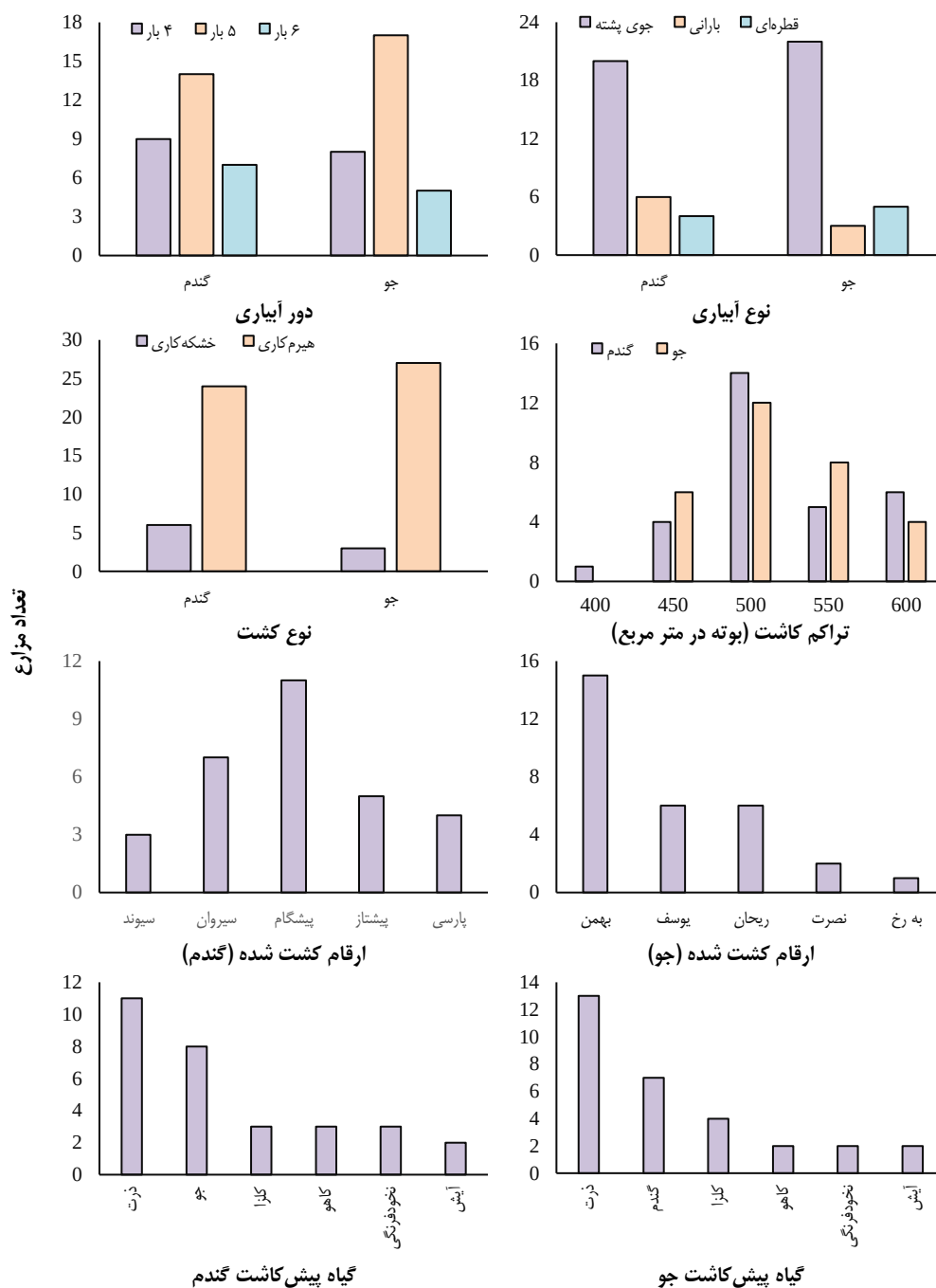
۳.۱.۴. تراکم و تاریخ کشت

مطالعات میدانی نشان داد که بیش از ۵۰ درصد کشاورزان، گیاهان گندم و جو را به ترتیب با تراکم های ۵۰۰ تا ۶۰۰ بوته در متر مربع کشت کردند (شکل ۲) که بیش از تراکم بهینه گندم بود. با توجه به این که در استان البرز تناوب کشت گندم/جو - ذرت رایج بوده، لذا آماده سازی زمین برای کشت گندم و جو پس از برداشت ذرت و در اواسط مهرماه انجام می شود. مشاهدات میدانی نشان داد که تاریخ کشت جو از ۲۵ مهرماه تا اوایل آذرماه و تاریخ کشت گندم از اواسط آبان تا اواسط آذرماه (پنجم) متغیر بود. طی انجام مصاحبه، کشاورزان از جمله دلایل تأخیر در کاشت گندم و جو را عدم برداشت به موقع گیاه ماقبل به دلیل تعداد کم ماشین آلات برداشت (محصول ماقبل) و کشت (گندم و جو) عنوان کردند.

۴.۱.۴. رقم

در مزارع مورد بررسی، کشاورزان از ارقام جو «بهمن، یوسف، ریحان، نصرت و بهرخ» و ارقام گندم «سیوند، سیروان، پیشگام، پیشناز و پارسی» استفاده نمودند (شکل ۲). جو «بهمن و یوسف» و گندم «پیشگام» از جمله ارقام غالب شهرستان نظرآباد بودند که در اکثر مزارع کشت شده و از جمله ارقام دیررس - متوسط رس و قدیمی هستند. متوسط عملکرد ارقام پیشگام، بهمن و یوسف در مزارع مورد مطالعه، به ترتیب ۵۷۲۲، ۵۲۴۲ و ۵۵۸۰ کیلوگرم در هکتار بود (شکل ۲). با وجود این که در سال های اخیر ارقام جدید و پر محصول جو زیادی توسط مؤسسه اصلاح و نهال بذر کرج آزادسازی شده

است، ولی بازدیدهای میدانی نشان داد که همچنان کشاورزان شهرستان نظرآباد از ارقام قدیمی بهمن و یوسف استفاده می کنند. در خصوص ارقام گندم نیز فقط درصد کمی (کمتر از ۱۰ درصد) از کشاورزان از رقم جدید سیوند برای کشت استفاده می کنند. کشاورزان دلیل این امر را ناآگاهی و عدم دسترسی به بذر ارقام جدید اعلام کردند.



شکل ۲. مستندسازی شرایط تولید گندم و جو در استان البرز

۵.۱.۴. میزان و نوع کود مصرفی

مشاهدات میدانی نشان داد که بیش از ۵۰ درصد کشاورزان مورد مطالعه در شهرستان نظرآباد، در طول فصل رشد گندم و جو از ۳۵۰-۳۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار، به‌صورت پیش‌کاشت و سرک (اواسط ساقه‌روی) برای تولید استفاده کردند (شکل ۲). برخی از کشاورزان پیش‌رو نیز در طول فصل رشد گیاهان، از ۴۰۰-۵۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار همراه با کود گاوی، در سه مرحله پیش‌کاشت و سرک در مراحل اوایل ساقه‌روی و گلدهی استفاده کردند. مشاهدات میدانی نشان داد که کشاورزانی که کود نیتروژنی مصرفی را برخلاف روش مصرفی متداول منطقه در سه مرحله استفاده نمودند، عملکرد دانه بیش‌تری داشتند.

۶.۱.۴. نوع گیاه پیش‌کاشت (تناوب)

در شهرستان نظرآباد کشت متناوب گندم/جو- ذرت، گندم- جو و گندم/جو-کلزا بیش‌ترین سهم را در تناوب منطقه داشتند (شکل ۲). به‌نظر می‌رسد ذرت به‌دلیل این‌که به نیروی کار کم‌تری نسبت به کشت سبزی و صیفی‌جات نیاز دارند و همچنین در صورت برداشت به‌موقع، انطباق مناسبی از نظر زمان برداشت و کاشت با محصول ذرت دارند، بیش‌ترین فراوانی را در تناوب با گندم و جو به خود اختصاص داده‌اند. نتایج همچنین نشان داد که در منطقه تنکمان با توجه به کاهوکاری و کشت سبزی‌ها، تناوب کاهو/ نخودفرنگی-گندم/ جو نیز مشاهده شد. لازم به ذکر است که با توجه به نمونه‌برداری‌های میدانی مشخص شد که مزارع منطقه تنکمان نسبت به سایر مناطق مورد مطالعه از حاصلخیزی خوبی برخوردار بودند که یکی از دلایل آن تناوب کشت متنوع این منطقه بود. با توجه به نتایج ارائه‌شده بدون شک در شهرستان نظرآباد، رعایت الگوی تناوب زراعی مناسب، می‌تواند در بهینه‌سازی نظام‌های زراعی، حفظ پویایی و سلامت تولید و همچنین افزایش تولید نقش به‌سزایی داشته باشد. با توجه به این‌که در شهرستان نظرآباد حبوبات و دانه‌های روغنی به‌غیر از کلزا جایگاهی در تناوب کشت منطقه ندارند، لذا پیشنهاد می‌گردد که با تغییر الگوی کاشت و ورود گیاهان یادشده به الگوی تناوب زراعی منطقه که براساس حفظ منابع پایه بناشده باشند، تولیدات غذایی و علوفه‌ای منطقه را افزایش داد.

۷.۱.۴. نوع کشت (هیرم‌کاری/ خشکه‌کاری)

در شهرستان نظرآباد در اکثر مزارع، گندم و جو به‌روش هیرم‌کاری کشت شده بودند (شکل ۲). به اعتقاد کشاورزان، فراوانی روش کشت هیرم‌کاری به دلایل مختلفی از جمله پیشگیری از هجوم علف‌های هرز، کاهش سلب‌ستن خاک و مشکل سبزشدن و افزایش توانایی رقابت با علف‌های هرز، بیش‌تر از خشکه‌کاری بود. کشاورزان اعلام کردند که در خشکه‌کاری به سبب این‌که شرایط برای سبزشدن و افزایش رقابت گیاه زراعی و علف‌هرز فراهم می‌گردد، لذا اکثر کشاورزان برحسب تجربه گندم و جو را به‌روش هیرم‌کاری کشت می‌کنند. همچنین کشاورزان معتقد بودند که در هیرم‌کاری، به‌دلیل این‌که مزارع قبل از کشت آبیاری شده و با گاووروشدن خاک، عملیات خاک‌ورزی باعث از بین‌رفتن علف‌های هرز شده و تا آبیاری مجدد، مزرعه از گزند علف‌های هرز در امان خواهند بود. در بیش از ۵۰ درصد مزارع مورد مطالعه، بافت خاک لومی بوده و میزان ماده آلی کمی داشتند (جدول ۶)، لذا بافت لومی فاقد ویژگی‌های کلوئیدی بوده و بعد از آبیاری سفت شده و علاوه بر سخت‌نمودن کشاورزی در مزارع، درصد سبزشدن بذره‌های گندم و جو را نیز با مشکل روبه‌رو می‌کند. در مشاهدات میدانی نیز این مسئله به‌وضوح قابل مشاهده بود. بنابراین در استان البرز، هیرم‌کاری، بدون افزایش ماده آلی خاک نتیجه عکس بر درصد سبزشدن گیاهان خواهد داشت. لذا توصیه می‌شود که جهت کاهش سلب‌بندی خاک و افزایش درصد سبزشدن گیاهان در استان البرز، همراه کشت هیرم‌کاری، افزایش ماده آلی خاک نیز

بایستی مدنظر باشد. در مواردی نیز که امکان افزایش ماده آلی خاک با روش های مختلف زراعی و مدیریتی برای کشاورز نباشد، خشکه کاری بر هیرم کاری ارجحیت دارد.

۲.۴. پارامتریابی و ارزیابی مدل اپسیم برای شبیه سازی عملکرد

در هر دو سال آزمایش نتایج پارامتریابی زیرمدل های اپسیم نشان داد که در جو و گندم، مقدار شاخص ضریب جرمی خطا (CRM) برای شبیه سازی عملکرد دانه مثبت بود (برآورد کمتر مدل نسبت به مقدار مشاهده شده، جدول ۷). برخلاف بخش پارامتریابی، ارزیابی مدل در شرایط واقعی نشان داد که مدل، عملکردهای دانه و زیستی گیاهان گندم و جو را نسبت به مقادیر مشاهده شده، بیش تر برآورد نمود (CRM منفی). نتایج پارامتریابی مدل نشان داد که در سال های اول و دوم آزمایش مقدار عددی شاخص ضریب هم خوانی (D-index) عملکرد دانه گندم به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۹۴ و جو به ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۹۴ بود که نشان دهنده تطابق بین داده های شبیه سازی و مشاهده شده می باشد. بنابراین، به طور کلی در گیاهان مورد مطالعه در هر دو سال آزمایش، بین مقادیر شبیه سازی شده عملکرد با مقدار مشاهده شده اختلاف چندانی وجود نداشت که مقادیر ضریب R^2 نیز تأییدکننده این امر است. پژوهشگران مختلفی کارایی مدل اپسیم را در پیش بینی عملکرد گندم و جو عالی گزارش کردند (هائو^۱ و همکاران، ۲۰۲۱؛ ژائو^۲ و همکاران، ۲۰۲۰؛ گایدون^۳ و همکاران، ۲۰۱۷). نتایج ارزیابی زیرمدل های اپسیم در شرایط واقعی نشان داد که در هر دو سال آزمایش، در مزرعه های مورد مطالعه استان البرز، مقدار ضریب هم خوانی (D-index) داده های مشاهده شده و شبیه سازی شده بیش تر از ۰/۷۰ بود، لذا مدل اپسیم در شرایط واقعی نیز همانند شرایط بدون تنش عملکرد گندم و جو را به طور جزئی بیش تر برآورد کرد. در شرایط واقعی مقدار جذر میانگین نرمال شده (nRMSE) مدل اپسیم برای عملکرد دانه گیاهان گندم و جو در بازه ۱۰ تا ۲۰ درصد بود، لذا مدل توانست که در شرایط واقعی عملکرد دانه گیاهان زراعی از جمله گندم و جو را با کیفیت قابل قبول (خوب) و عملکرد زیستی را با کیفیت عالی شبیه سازی نماید.

جدول ۷. پارامتریابی و ارزیابی مدل اپسیم برای شبیه سازی عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) گیاهان گندم و جو

گیاه	شاخص	پارامتریابی مدل				ارزیابی مدل			
		سال ۱۳۹۳-۹۴		سال ۱۳۹۵-۹۶		سال ۱۳۹۷-۹۸		سال ۱۳۹۸-۹۹	
		Pre	Obs	Pre	Obs	Pre	Obs	Pre	Obs
گندم	میانگین	۶۴۸۳	۶۲۹۲	۷۶۰۴	۷۱۱۱	۶۰۸۲/۴۵	۶۴۵۸/۵۲	۵۷۱۴/۰۰	۶۰۰۵/۷۸
	nRMSE (%)	۳/۷۹		۳/۵۸		۱۳/۳۴		۱۳/۱۴	
	CRM	+۰/۰۲		+۰/۰۶		-۰/۰۶۰		-۰/۰۵	
	D-index	۰/۸۶		۰/۷۵		۰/۸۹		۰/۷۱	
	R ²	۰/۹۰		۰/۸۳		۰/۸۵		۰/۷۵	
جو	میانگین	۶۸۳۳	۶۷۳۰	۵۸۵۹	۵۶۵۵	۵۰۸۰/۸۳	۵۴۱۶/۹۰	۵۶۶۸/۱۲	۶۱۳۸/۵۸
	nRMSE (%)	۲/۰۲		۰/۴۶		۱۳/۵۲		۱۳/۹۶	
	CRM	+۰/۰۱		+۰/۰۳		-۰/۰۶۰		-۰/۰۸	
	D-index	۰/۹۶		۰/۹۴		۰/۸۰		۰/۷۶	
	R ²	۰/۹۳		۰/۹۲		۰/۷۵		۰/۷۳	

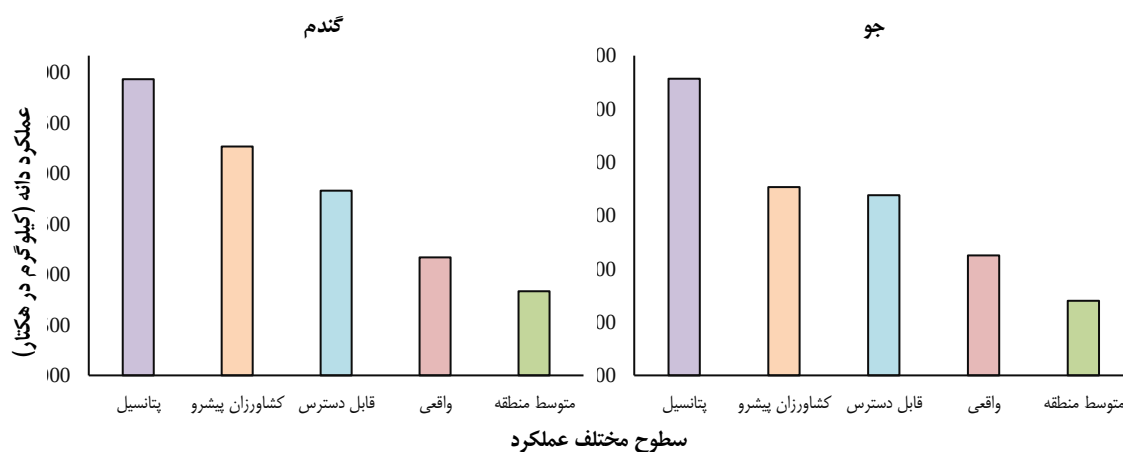
Obs: مقدار مشاهده شده، Pre: مقدار پیش بینی شده توسط مدل، nRMSE: جذر میانگین مربعات نرمال شده، CRM: ضریب جرمی خطا که علامت مثبت و منفی به ترتیب نشان دهنده برآورد کم تر و بیش تر مدل نسبت به مقادیر مشاهده شده است، D-index: شاخص ضریب هم خوانی و R² ضریب تبیین.

1. Hao
2. Zhao
3. Gaydon

۳.۴. کمی‌سازی انواع عملکرد و خلأ عملکرد گندم و جو در استان البرز

۳.۴.۱. عملکرد پتانسیل شبیه‌سازی‌شده

نتایج حاصل از شبیه‌سازی رشدونمو در شرایط اقلیمی استان البرز با استفاده از زیرمدل‌های اِپسیم نشان داد که در شرایط عدم وجود تنش، به‌طور متوسط گیاهان زراعی گندم و جو به‌ترتیب توانایی تولید ۱۰۸۰۰ و ۱۰۳۵۰ کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه را دارا بودند (شکل ۳). عملکرد یادشده، عملکرد پتانسیل ارقام است که در آن رشدونمو تنها تابعی از شرایط آب‌وهوایی و عوامل ژنتیکی می‌باشد. کمی‌سازی پتانسیل عملکرد توسط مدل نشان داد که ارقام گندم و جو پتانسیل قابل‌توجهی در تولید علوفه و دانه در استان البرز داشته و این موضوع نشان‌دهنده آن است که از مدل‌های رشد گیاهان زراعی ازجمله اِپسیم می‌توان به‌عنوان ابزاری قدرتمند و کارآمد، برای تخمین عملکرد و ارزیابی قابلیت مناطق برای تولید استفاده کرد. هم‌چنین ضمن امکان‌سنجی تولید، گسترش نظام‌های تولید محصولات گندم و جو در مناطق مستعد را در برنامه‌های آینده قرار داد. بهینه‌سازی نظام‌های کشاورزی به برنامه‌ریزی‌های دقیق و مختص هر مکان نیاز دارد و ارائه راه‌کارهای مدیریتی در راستای به حداقل رساندن خلأ عملکرد و نزدیک کردن متوسط عملکرد واقعی منطقه به عملکرد پتانسیل نیازمند پژوهش و بررسی می‌باشد. با توجه به این‌که هدف از این آزمایش کمی‌سازی خلأ عملکرد گندم و جو در استان البرز بود، لذا با استفاده از عملکردهای به‌دست‌آمده در شرایط پتانسیل (متوسط عملکرد شبیه‌سازی‌شده با مدل اِپسیم طی ۱۰ سال گذشته)، کشاورزان پیشرو (متوسط عملکرد کشاورز نمونه و کشاورزانی که سطح زیر کشت بیش‌تری از محصولات موردنظر را در منطقه داشتند)، قابل‌دسترس (نتایج حاصل از آزمایش‌های تحقیقاتی)، واقعی (عملکرد کشاورزان) و متوسط منطقه، خلأ عملکرد گیاهان در استان البرز در چهار وضعیت بررسی شد (جدول ۸) که در ادامه درخصوص هرکدام به‌تفصیل توضیح داده می‌شود.



شکل ۳. عملکرد دانه و خلأ عملکرد گیاهان زراعی گندم و جو در سطوح مختلف در استان البرز

جدول ۸. درصد خلأ عملکرد گیاهان گندم و جو در استان البرز و در سطوح مختلف نسبت به عملکرد پتانسیل پیش‌بینی‌شده

گیاه زراعی	کشاورزان پیشرو	قابل‌دسترس	واقعی	متوسط منطقه
گندم	۱۸/۵	۳۰/۷	۴۹/۰	۵۸/۳
جو	۲۹/۵	۳۱/۷	۴۸/۰	۶۰/۴

* در شکل ۳ و جدول ۸ منظور از عملکرد پتانسیل: متوسط حداکثر عملکرد پیش‌بینی‌شده توسط مدل اِپسیم طی ۱۰ سال گذشته، عملکرد کشاورزان پیشرو: متوسط عملکرد کشاورز نمونه و کشاورزانی که سطح زیر کشت بیش‌تری از محصولات موردنظر را در منطقه داشتند، عملکرد قابل‌دسترس: متوسط عملکرد ارقام جدید گندم و جو در مزارع آزمایشی پژوهش حاضر در شرایط بهینه مدیریتی، عملکرد واقعی: متوسط عملکرد در مزارع کشاورزان موردبررسی، متوسط عملکرد منطقه: عملکرد گزارش‌شده توسط جهاد کشاورزی.

۴.۳.۲. عملکرد کشاورزان پیشرو

عملکرد دانه گندم و جو با مدیریت کشاورزان پیشرو در استان البرز به ترتیب ۸۸۰۰ و ۷۳۰۰ کیلوگرم در هکتار بود که به ترتیب ۱۸/۵ و ۲۹/۵ درصد کمتر از عملکرد پتانسیل منطقه بود (شکل ۳). از دلایل پایین بودن عملکرد کشاورزان پیشرو می توان به استفاده از ارقام قدیمی گندم (پارسی) و جو (بهمن و یوسف) (شکل ۲)، تعداد دور (شش تا هفت بار) و حجم آبیاری (۳۵۰۰-۳۰۰۰ مترمکعب) کمتر نسبت به حالت پتانسیل اشاره کرد. نیاز آبی گندم و جو برای تولید پتانسیل، ۶۰۰۰-۴۵۰۰ مترمکعب است که در ۱۰-۷ مرحله تأمین می شود. همچنین نتایج نشان داد که عملکرد کشاورزان پیشرو نسبت به عملکردهای قابل دسترس، واقعی و متوسط منطقه بیش تر بود که براساس بازدیدهای میدانی و مکاتبات شخصی از دلایل آن می توان به مدیریت کشاورزان پیشرو از لحاظ تعداد دور و حجم آبیاری، تاریخ کشت و کوددهی اشاره کرد. کشاورزان نمونه معمولاً از حجم آب (۳۷۰۰ مترمکعب)، میزان و تنوع کودی بیش تری نسبت به سایر کشاورزان برای تولید استفاده کردند. کشاورزان پیشرو بعد از مرحله ساقه روی، چهار مرحله آبیاری (ابتدا و اواسط ساقه روی، گلدهی و پرشدن دانه) و دو مرحله کوددهی (ابتدای ساقه روی و گلدهی) داشتند که علاوه بر کودهای پایه نیتروژن و فسفات از کودهای دامی نیز برای تولید استفاده کردند. سایر کشاورزان پس از کاشت فقط یک مرحله کوددهی داشتند که معمولاً در ابتدای ساقه روی از کودهای اوره به طور سرک برای تولید استفاده کردند. همچنین کشاورزان عادی پس از مرحله ساقه روی دو مرحله آبیاری (ساقه روی و گلدهی) داشتند.

۴.۳.۳. عملکرد قابل دسترس

عملکرد قابل دسترس، میانگین عملکرد ارقام پر محصول و مناسب کشت گندم (سیوند و پارسی) و جو (فجر ۳۰، ریحان ۰۳ و رودشت) برای استان البرز در شرایط بهینه مدیریتی می باشد. متوسط عملکرد قابل دسترس گندم و جو در شرایط بدون تنش به ترتیب ۷۴۸۸ و ۷۰۷۱ کیلوگرم در هکتار بود که نسبت به کشاورزان پیشرو به ترتیب ۱۴/۹ و ۳/۱ درصد (شکل ۳) و نسبت به عملکرد پتانسیل ۳۰/۷ و ۳۱/۷ درصد، خلأ عملکرد وجود داشت (جدول ۸). در شرایط بدون تنش، عملکرد گیاهان گندم و جو به ترتیب ۲۶/۵ و ۲۴/۰ درصد بیش تر از شرایط واقعی (مدیریت شده توسط کشاورزان) بود که از دلایل آن مدیریت بهینه مزرعه از نظر تراکم کاشت (۴۵۰ بوته در مترمربع)، دور و حجم آبیاری (۷ مرحله و ۴۷۰۰ مترمکعب)، کوددهی (۳۵۰ کیلوگرم کود اوره در سه مرحله به صورت پیش کاشت و سرک) و انتخاب ارقام مناسب (جدید و تیمار شده با دانش هسته ای) بود.

۴.۳.۴. عملکرد دانه در شرایط واقعی (مدیریت شده توسط کشاورزان)

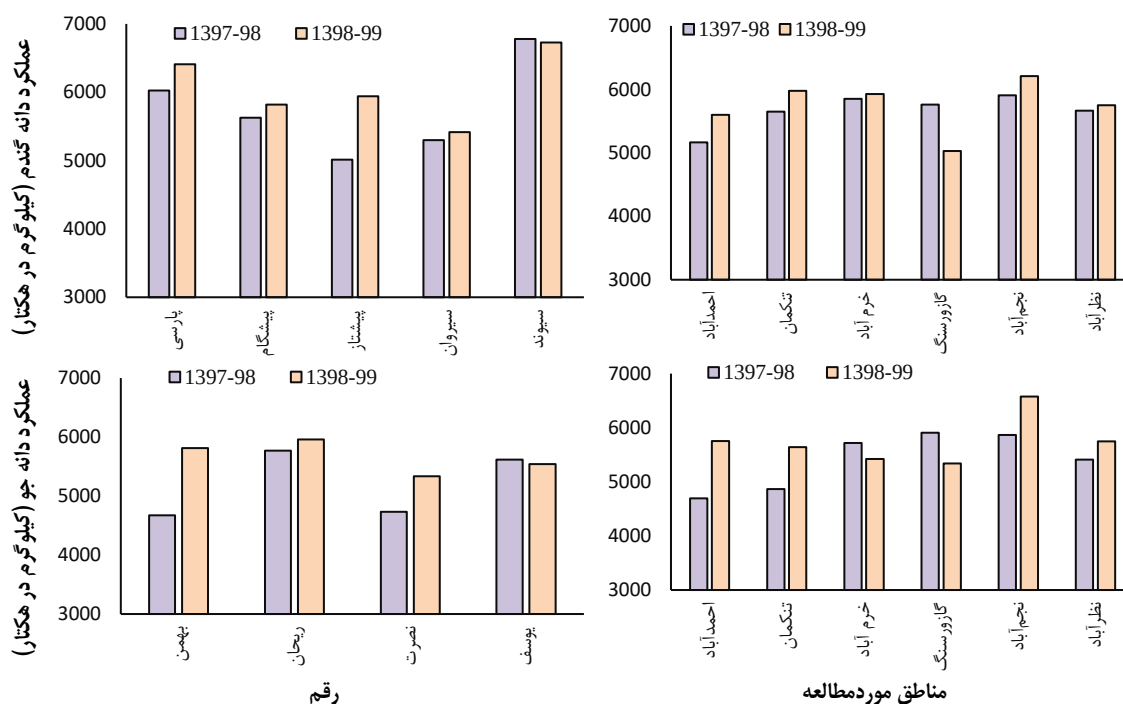
عملکرد در شرایط واقعی، متوسط عملکرد در مزارع کشاورزان مورد بررسی می باشد. متوسط عملکرد دانه ارقام گندم و جو در شهرستان نظرآباد به ترتیب ۵۵۰۶ و ۵۳۷۷ کیلوگرم در هکتار بود (شکل های ۳ و ۴). خلأ عملکرد دانه گندم و جو در شرایط واقعی با عملکرد پتانسیل منطقه، به ترتیب ۴۹/۰ و ۴۸/۰ درصد بود (جدول ۸). لذا خلأ عملکرد قابل توجهی در گیاهان یاد شده در استان البرز مشاهده شد که با اعمال شرایط مدیریتی مناسب می توان میزان خلأ عملکرد را کاهش داد. در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷، عملکرد دانه ارقام مختلف گندم در مناطق مختلف شهرستان نظرآباد از ۵۱۶۳ تا ۵۹۰۴ کیلوگرم در هکتار متغیر بود. در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ نیز عملکرد دانه گندم از ۵۰۲۸ تا ۶۲۱۱ کیلوگرم در هکتار متغیر بود. در مناطق مختلف شهرستان نظرآباد نیز در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷، عملکرد دانه جو از ۴۶۹۱ تا ۵۹۰۸ کیلوگرم در هکتار و در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ از ۵۳۳۷ تا ۶۵۷۶ کیلوگرم در هکتار متغیر بود.

عملکرد گندم و جو در مناطق نجم آباد، گازورسنگ و تنکمان بیش تر از سایر مناطق مورد مطالعه بود. نتایج مکاتباتی حضوری و بازدیدهای میدانی نشان داد که کشاورزان پیشرو (شرکت بستان) و نمونه (کمال پیشگاهی) در منطقه نجم آباد بودند

که از سیستم آبیاری قطره‌ای برای آبیاری استفاده کردند و در طول فصل رشد گندم و جو، ۶-۷ مرحله آبیاری داشتند که دو مرحله از آن در طول دوره رویشی و چهار مرحله آن از اوایل ساقه‌روی تا پرشدن دانه بود. در منطقه نجم‌آباد، عمده کشاورزان از ارقام سیوند و پیشگام برای کشت استفاده نمودند که جزو ارقام پر محصول و جدید محسوب می‌شوند. کشاورزان یادشده در طول فصل رشد نیز از کودهای سولفات‌روی، سوپرفسفات‌تریپل، سولفات‌آمونیم، سولفات‌پتاسیم، اگروهمیک و سولفوریک‌اسید استفاده کردند. عوامل ذکرشده در افزایش عملکرد دانه منطقه نجم‌آباد نقش مهمی داشتند. از دلایل عملکرد بالای منطقه تنکمان نیز تعداد دور آبیاری بالا و رعایت تناوب بود. در منطقه تنکمان به‌علت رواج کاه‌کاری، کشت صیفی‌جات و دسترسی کشاورزان به آب در طول فصل رشد گندم و جو، تعداد دور (پنج تا هفت بار) و حجم آبیاری (۳۵۰۰-۳۰۰۰ مترمکعب در هکتار) بیش‌تر بود. مشابه نتایج حاصل از آزمایش‌های زراعی، در شرایط واقعی نیز ارقام گندم سیوند و جو ریحان نسبت به سایر ارقام مورد مطالعه عملکرد دانه بیش‌تری تولید کردند (شکل‌های ۳ و ۴). بنابراین در مناطقی که کشاورزان از ارقام ذکرشده برای کشت استفاده نمودند، عملکرد افزایش یافت. لازم به یادآوری است که در هر دو سال آزمایش تحقیقاتی ارقام بهمن، ریحان و یوسف که از جمله ارقامی بودند که توسط اکثر کشاورزان استان البرز کشت می‌شدند، نسبت به ارقام جدید جو (کویر، نصرت، فجر ۳۰، نیک، رودشت، ریحان ۰۳) عملکرد کم‌تری داشتند که این نشان‌دهنده آن است که با تغییر رقم و معرفی ارقام جدید به کشاورزان می‌توان میزان تولید دانه و علوفه را در منطقه افزایش داد.

۵.۳.۴. متوسط عملکرد منطقه

متوسط عملکردهای دانه گندم و جو در استان البرز براساس گزارش جهاد کشاورزی، به‌ترتیب ۴۵۰۰ و ۴۱۰۰ کیلوگرم در هکتار بود که نسبت به شرایط واقعی به‌ترتیب ۱۸/۳ و ۲۳/۷ درصد (شکل ۴) و نسبت به عملکرد پتانسیل به‌ترتیب ۸۳/۳ و ۶۰/۴ درصد خلأ عملکرد مشاهده شد (جدول ۸).



شکل ۴. عملکرد دانه ارقام گندم و جو در مناطق مورد بررسی استان البرز در سال‌های آزمایش

۵. بحث

۵.۱. مستندسازی شرایط تولید گندم و جو در استان البرز

پژوهش گران گزارش کردند که با افزایش هدایت الکتریکی خاک از ۲/۵ دسی زیمنس بر متر، فعالیت میکروارگانیسم ها و ریشه گیاهان مختل و این امر موجب کاهش عملکرد محصولات کشاورزی می شود (فلاح زاده^۱ و حاج عباسی^۲، ۲۰۱۱). بالا بودن هدایت الکتریکی مزارع مورد بررسی، احتمالاً یکی از عوامل محدود کننده رشد و عملکرد غلات منطقه می باشد. سطح مناسب کربن آلی برای گیاهان زراعی گندم و جو حدود دو درصد می باشد، در حالی که حداکثر میزان کربن آلی مشاهده شده در مزارع مورد بررسی ۱/۳ درصد بود. کاهش کربن آلی خاک باعث افزایش وزن مخصوص ظاهری می گردد (دکستر^۳، ۲۰۰۹). در بوم نظام های زراعی انتخاب تناوب زراعی مناسب، مدیریت مناسب، عملیات زراعی به خصوص شخم، کاربرد مناسب کودهای شیمیایی و آلی، حفظ پوشش گیاهی و مدیریت صحیح بقایای گیاهی نقش تعیین کننده ای در میزان و پویایی عناصر معدنی و آلی می تواند داشته باشد (مکنیل^۴ و آنکوویچ^۵، ۲۰۰۷).

لازم به ذکر است که کشاورزان بذر مورد نیاز خود را از طریق تعاونی ها و مراکز خدماتی سازمان جهاد کشاورزی تهیه می کنند که همکاری مسئولان جهاد کشاورزی در ترویج انتخاب رقم مناسب کشت در هر منطقه می تواند نقش مهمی در بهبود عملکرد منطقه داشته باشد، زیرا که عملکرد دانه غلات که ناشی از اثرات تجمعی اجزای متشکله آن می باشد، تحت تأثیر عوامل محیطی و ژنتیکی قرار دارد (کورالیز^۶ و همکاران، ۲۰۱۹). کشت رقم مناسب براساس ویژگی های مؤثر بر عملکرد جهت کشت در مناطق خاص به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک بسیار با اهمیت بوده و می تواند در افزایش مقاومت به تنش های محیطی و کاهش خلأ عملکرد نقش به سزایی داشته باشد (السیایده^۷ و همکاران، ۲۰۱۹).

در هر دو سال آزمایش شاخص های ارزیابی مدل (CRM، nRMSE، D-index و R²) کارایی زیرمدل های اپسیم در شبیه سازی عملکرد گندم و جو را تأیید کردند. با توجه به دستیابی به ضرایب ژنتیکی برخی از ارقام گندم و جو که سطح زیر کشت قابل توجهی در ایران دارند، می توان با استفاده از زیرمدل های اپسیم (APSIM-Wheat و APSIM-Barley)، عملکرد گندم و جو را در مناطق مختلف، شرایط بدون تنش و واقعی (سطوح مختلف رژیم های رطوبتی، کودی، تاریخ کشت های مختلف و غیره)، بدون اجرای آزمایش های زمان بر و پرهزینه برآورد نمود. همچنین استفاده از مدل های گیاهان زراعی مانند اپسیم، در برنامه ریزی های مدیریتی، در شرایط بحران نقش مؤثری داشته و می توان جهت کاهش اثرات نامطلوب تغییرات اقلیمی، برای اتخاذ تصمیم های مدیریتی مانند انتخاب تاریخ کشت مناسب، انتخاب ارقام مقاوم به تنش های محیطی و برنامه ریزی آبیاری بهینه از آن ها استفاده کرد.

خلأ عملکرد گندم در سطح یک (اختلاف عملکردهای پتانسیل و کشاورزان پیشرو)، سطح دو (اختلاف عملکردهای کشاورزان پیشرو و قابل دسترس)، سطح سه (اختلاف عملکردهای قابل دسترس و واقعی) و سطح چهار (اختلاف عملکرد واقعی و متوسط منطقه)، به ترتیب ۱۸/۵، ۱۴/۹، ۲۶/۵، ۱۸/۳ درصد و در جو به ترتیب ۲۹/۵، ۳/۱، ۲۴/۰ و ۲۳/۷ درصد بود. عوامل مدیریتی از جمله دور آبیاری، حجم آب مصرفی در طول فصل رشد، تاریخ کاشت، رقم مورد کاشت، میزان کود مصرفی نیتروژن و تراکم گیاهی، مهم ترین عوامل مؤثر بر خلأ عملکرد گندم و جو در استان البرز بودند. در تمام سطوح

1. Fallahzade

2. Hajabbasi

3. Dexter

4. Mc-Nill

5. Unkovich

6. Corraliza

7. Alsayaydeh

عملکرد، میزان خلأ عملکرد جو در استان البرز بیش‌تر از گندم بود که باید در برنامه‌های مدیریتی موردتوجه قرار گیرد. پژوهش‌گران اظهار داشتند که دستیابی به عملکرد پتانسیل برای کشاورزان به‌دلیل هزینه بالای تولید و نیاز بالا به نهاده‌ها و با توجه به قانون بازده نزولی ممکن نیست (پاسوکوین^۱ و همکاران، ۲۰۱۴)، اما با اعمال مدیریت بهینه می‌توان میزان خلأ عملکرد گیاهان را کاهش داد.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج پارامتریابی زیرمدل‌های اُپسیم نشان داد که در سال‌های آزمایش، مقدار جذر میانگین مربعات نرمال‌شده (nRMSE)، برای عملکرد دانه کم‌تر از ۱۰ درصد بود که تأییدکننده توانمندی بالای مدل اُپسیم در شبیه‌سازی عملکرد گندم و جو می‌باشد. همچنین سایر شاخص‌های ارزیابی مدل ازجمله nRMSE، CRM، D-index و R^2 نیرومندی مدل را تأیید کردند. بنابراین با توجه به دستیابی به ضرایب ژنتیکی برخی از ارقام گندم و جو که سطح زیر کشت قابل‌توجهی در ایران دارند، می‌توان با استفاده از زیرمدل‌های اُپسیم (APSIM-Wheat و APSIM-Barley) عملکرد گندم و جو را در مناطق مختلف، شرایط بدون تنش و واقعی (سطوح مختلف رژیم‌های رطوبتی، کودی، تاریخ کشت‌های مختلف و غیره)، بدون اجرای آزمایش‌های زمان‌بر و پرهزینه برآورد نمود.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که در شرایط پتانسیل، در استان البرز گندم و جو به‌طور متوسط، توانایی تولید ۱۰۸۰۰ و ۱۰۳۵۰ کیلوگرم در هکتار عملکرد دانه را داشتند. خلأ عملکرد گندم در سطوح یک (اختلاف عملکردهای پتانسیل و کشاورزان پیشرو)، دو (اختلاف عملکردهای کشاورزان پیشرو و قابل‌دسترس)، سه (اختلاف عملکردهای قابل‌دسترس و واقعی) و چهار (اختلاف عملکرد واقعی و متوسط منطقه)، به‌ترتیب ۱۸/۵، ۱۴/۹، ۲۶/۵، ۱۸/۳ درصد و در جو به‌ترتیب ۲۹/۵، ۳/۱، ۲۴/۰ و ۲۳/۷ درصد بود. عوامل مدیریتی نظیر دور آبیاری، حجم آب مصرفی در طول فصل رشد، تاریخ کشت، رقم، میزان کود مصرفی نیتروژن و تراکم گیاهی، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خلأ عملکرد گندم و جو در استان البرز بودند. بنابراین کشاورزان منطقه می‌توانند با اتخاذ تدابیر مناسب و بهینه مدیریتی ضمن افزایش تولیدات منطقه در حفظ منابع کشور مؤثر باشند. در این راستا استفاده از مدل زراعی اُپسیم نیز در پیش‌بینی، سناریوسازی و اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی می‌تواند راه‌گشا باشد.

۷. تشکر و قدردانی

از حمایت‌های پرسنل دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران و مزرعه پژوهشی سازمان انرژی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۸. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۹. منابع

Ahmed, M., Akram, M.N., Asim, M., Aslam, M., Hassan, F., Higgins, S., Stockle, C., & Hoogenboom, G. (2016). Calibration and validation of APSIM-Wheat and CERES-Wheat for spring wheat under rainfed conditions: Models evaluation and application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 384-401. <https://doi.org/10.25081/jp.2024.v16.8810>.

- Alsayaydeh, R., Bawalize, A., Al-Ajloumi, Z., Akash, M.W., Abuelenein, J., & Alabdallat, M. (2019). Agronomic evaluation and yield performance of selected Barley (*Hordeum vulgare* L.) Landraces from Jordan. *International Journal of Agronomy*, 5(2), 1-12. <https://doi.org/10.1155/2019/9575081>.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazrae, H., Barati, M.E., Barati, M.A., & Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AcuaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.023>.
- Bannayan, M., Hoogenboom, G., & Crout, N.M.J. (2009). Photothermal impact on maize performance: a simulation approach. *Ecological Modeling*, 180, 277-290. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.04.022>.
- Corraliza, M.G., Rplp, V., Lopez, M.L., & Moreno, G. (2019). Wheat and barley can increase grain yield in shade through acclimation of physiological and morphological traits in Mediterranean conditions. *Nature, Scientific Reports*, 9, 9547. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46027-9>.
- Devkota, K.P., Hoogenbom, G., Boote, K.J., Singh, U., Lamers, J.P.A., Devkota, M., & Velk, P.L.G. (2015). Simulating the impact of water saving irrigation and conservation agriculture practices for rice – wheat systems in the irrigated semi-arid drylands of Central Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214, 266-280. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.264>.
- Dexter, A.R. (2004). Soil physical quality: Effects of soil texture, density, and organic matter, and effect on root growth. *Geoderma*, 120, 201-214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>.
- Donatelli, M., & Confalonieri, R. (2011). Biophysical models for cropping system simulation, in: Flichman, G. (Eds). *Bio-Economic Models applied to agricultural Systems*, pp, 59-87.
- Fallahzade, J., & Hajabbasi, M.A. (2011). Changes in soil quality indicators by reclamation of salt-affected land in Abarkooh Plain, Central Iran. *Journal of Water and Soil Science*, 15(55), 139-150. <https://doi.org/20.1001.1.24763594.1390.15.55.11.9>.
- FAO. (2022). Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), FAO Statistical Database, from <http://faostat.fao.org>.
- Frank, S., Schmid, E., Havilk, P., Schneider, U.A., Bottcher, H., Balkovic, J., & Obersteiner, M. (2015). The dynamic soil organic carbon mitigation potential of European cropland. *Global. Environmental Change*, 35, 269-278. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.08.004>.
- Gaydon, D.S., Wang, E., Poulton, P.L., Ahmad, B., Ahmed, F., Akhter, S., Ali, I., Amarasingha, R., Chaki, A.K., & Chen, C. (2017). Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. *Field Crops Research*, 204, 52-75. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.015>.
- Gharineh, M.H., Bakhshandeh, A.M., Andarzian, B., & Fayeizadeh, N. (2012). Agro-climatic zonation of Khuzestan province based on potential yield of irrigated wheat using WOFOST model. *Agroecology*, 4, 255-264. <https://doi.org/10.22067/jag.v4i3.15314>.
- Hao, S., Ryo, D., Western, A., Perry, E., Bogen, H., Jan, H. & Franssen, H. (2021). Performance of a wheat yield prediction model and factors influencing the performance. *Agricultural Systems*, 194, 103-225. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103278>.
- Hatfield, J.L., & Beres, B.L. (2019). Yield gaps in wheat: path to Enhancing productivity. *Front Plant Science*. 10, 1603. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01603>.
- Hochman, Z., Gobbett, D., Horan, H., & Garcia, J.N. (2017). Data rich yield gap analysis of wheat in Australia. *Field Crops Research*, 197, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.017>.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., & Smith, C.J. (2024). 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).
- Laleh, K.M., Ghorbani Javid, M., Alahdadi, I., Soltani, E., Soufizadeh, S., & Gonzalez-Andujar, J.L. (2023). Wheat yield gap assessment in using the comparative performance analysis (CPA). *Agronomy*, 13, 705. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030705>.
- Loague, K., & Green, R.W. (1991). Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7, 51-73. [https://doi.org/10.1016/0169-7722\(91\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0169-7722(91)90038-3).
- Ma, Y., Feng, S., & Song, X. (2015). Evaluation of optimal irrigation scheduling and groundwater recharge at representative sites in the North China Plain with SWAP model and field experiments. *Agriculture Journal*, 116, 125-136. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108229>.
- Mc-Nill, A., & Unkovich, M. (2007). The Nitrogen Cycle in Terrestrial Ecosystems. *Springer*, Pp. 37-64. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68027-7_2.

- Mihret, Y.C., Ketsela, G.M., & Mintesinot, S.M. (2024). Implementation and application of APSIM for crop modelling in Ethiopia: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(10), e31612. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31612>.
- Pasquin, J.M., Pampolino, M.F., Witt, C., Dobermann, A., Oberthur, T., Fisher, M.J., & Inubushi, K. (2014). Closing yield gaps in maize production in Southeast Asia through site-specific nutrient management. *Field Crops Research*, 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.11.016>.
- Sadras, V.O., & Denison, R.F. (2016). Neither crop genetics nor crop management can be optimized. *Field Crop Research*, 189, 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.01.015>.
- Van Wart, J., Kersebaum, K.C., Peng, S., Milner, M., & Cassman, K.G. (2013). Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crop Research*, 143, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.018>.
- Vander Linkden, A., Oosting, S.J., Vande Ven, G.W., De Boer, I.J., & Van Ittersum, M.K. (2015). A framework for quantitative analysis of livestock systems using theoretical concepts of production ecology. *Agricultural Systems*, 139, 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.06.007>.
- VanIttersum, M.K., Howden, S.M., & Asseng, S. (2016). Sensitivity of productivity and deep drainage of wheat cropping systems in a Mediterranean environment to changes in CO₂, temperature and precipitation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 97 (1), 25-35. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00114-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00114-2)
- Willmott, C.J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, 1309-1313. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063).
- Zhao, P., Zhou, Y., Li, F., Ling, X., Deng, N., Peng, S., & Man, J. (2020). The adaptability of Apsim-Wheat model in the middle and lower reaches of the Yangtze River plain of China: a case study of winter wheat in Hubei province. *Agronomy*, 10, 981-995. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070981>.