



به‌زرعی کشاورزی

دوره ۲۳ ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۰
صفحه‌های ۵۸-۴۳

مقاله پژوهشی:

پارامتریابی و ارزیابی مدل APSIM-Wheat برای گندم زمستانه: کاربرد مدل تحت تغییرات اقلیمی

مصطفی کشاورز مهر^۱، حسین مقدم^۲، مصطفی اویسی^۳، جواد بذرافشان^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲. استادیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳. دانشیار، گروه زراعت و اصلاح نباتات، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۴. دانشیار، گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۰۸

چکیده

این پژوهش به منظور پارامتریابی و ارزیابی مدل APSIM-Wheat برای گندم زمستانه و استفاده از مدل جهت ارزیابی اثرات تغییرات اقلیم بر عملکرد گندم انجام شد. از مدل برای شبیه‌سازی شاخص سطح برگ، ماده خشک و عملکرد گندم زمستانه رقم روشن در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ در دو منطقه کرج و خمین تحت چهار سطح آبیاری و سه سطح کود نیتروژن استفاده شد. آزمایش‌ها در هر دو منطقه به صورت کرت خردشده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد. عامل آبیاری به‌عنوان کرت اصلی و عامل نیتروژن به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. پارامتریابی مدل براساس داده‌های مشاهداتی حاصل از تیمار آبیاری کامل و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در هر دو منطقه انجام شد. نتایج حاصل از ارزیابی مدل نشان داد که مقادیر شبیه‌سازی‌شده تخمین نزدیکی از مقادیر مشاهده شده بودند، به‌طوری‌که RMSE در هر دو منطقه به‌ترتیب برای ماده خشک و عملکرد کم‌تر از ۷۰۲ و ۴۵۵ کیلوگرم در هکتار و هم‌چنین برای شاخص سطح برگ کم‌تر از ۰/۵۶ بودند. RMSE نرمال‌شده در مجموع حالت‌های کم‌تر از ۱۷/۸ درصد و شاخص توافق ویلموت بالاتر از ۰/۸۲ بودند. ارزیابی مدل، کارایی بالا و امکان استفاده از آن در سایر مطالعات را نشان داد. نتایج حاصل از تحلیل تغییرات اقلیمی نشان داد که افزایش دما از صفر تا پنج درجه سانتی‌گراد موجب حداکثر ۷۵ درصد کاهش و افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن موجب حداکثر ۲۴ درصد افزایش عملکرد دانه شده و در صورت افزایش بیش از سه درجه سانتی‌گراد دما در تمامی غلظت‌های ممکن دی‌اکسیدکربن، عملکرد دانه کاهش خواهد یافت.

کلیدواژه‌ها: افزایش دما، شبیه‌سازی، کارایی مدل، مدل رشد گیاهی، مدل فرایندگرا.

Parameterization and Evaluation of APSIM-Wheat Model for Winter Wheat: Model Application under Climate Change

Mostafa Keshavarz Mehr¹, Hosein Moghaddam^{2*}, Mostafa Oveisi³, Javad Bazrafshan⁴

1. Ph.D. Candidate, Agronomy and Plant Breeding Department, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

2. Assistant Professor, Agronomy and Plant Breeding Department, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

3. Associate Professor, Agronomy and Plant Breeding Department, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

4. Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

Received: August 30, 2017

Accepted: October 11, 2017

Abstract

The present research has been conducted to parameterize and evaluate the APSIM-Wheat model for winter wheat and to use the model for evaluation of climate change effects on grain yield. The model is used to simulate leaf area index, dry matter, and grain yield of Roshan cultivar winter wheat in Karaj and Khomein regions between 2014 and 2015, under four irrigation regimes and three levels of nitrogen fertilizers. The experiments have been conducted in both regions as split-plot in a randomized complete block design. Irrigation is considered as main plot and nitrogen as a sub-plot. Model parameterization is based on observational data from full irrigation and 200 kg/ha nitrogen treatment in both regions. Results from the model evaluation show that the simulated values closely predict the observed values so that the RMSE in both regions is less than 670 and 450 kg/ha for biomass and yield, respectively, being below 0.56 for leaf area index as well. Normalized RMSE in all treatments has been below 17.8%, with Wilmot's index being above 0.82. The evaluation of model shows high performance and its possible use in other studies. Results from climate change analysis show that increasing the temperature from 0 to 5 °C leads to a maximum reduction of 75% in grain yield and an increase in carbon dioxide concentration, resulting in a maximum increase of 24% and, if the temperature increase exceeds three degrees Celsius, the grain yield will decrease in all possible concentrations of carbon dioxide.

Keywords: Crop growth model, model performance, process-based model, simulation, temperature increase.

۱. مقدمه

مدل‌ها نمایش ریاضی سیستم‌های حقیقی و روشی مؤثر جهت مطالعه سیستم‌های پیچیده بیوفیزیکی می‌باشند (Holzworth *et al.*, 2011). مدل با شبیه‌سازی پاسخ گیاه زراعی به عوامل اقلیمی، خاکی و زیستی توسعه روش‌های نوآورانه مدیریت زراعی و پایداری کشاورزی را تسهیل می‌کند (Martin *et al.*, 2014). مدل‌سازی گیاهی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، پیش‌بینی رشدونمو گیاه زراعی، انتخاب ژنوتیپ‌های مناسب و تاریخ کاشت بهینه برای تولید پایدار کشاورزی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی کمک می‌کند (Anwar *et al.*, 2015). البته استفاده از مدل‌ها نیازمند داده‌های با کیفیت آب‌وهوا، خاک، مدیریت و رقم می‌باشد (Boote *et al.*, 2016).

در مطالعات تولید گندم از نظر زمانی و مکانی محدودیت‌هایی موجود می‌باشد. استفاده از مدل‌های گیاهی می‌تواند این محدودیت‌ها را کاهش داده و امکان برون‌یابی از نتایج آزمایش‌ها را فراهم کند (Chen *et al.*, 2010). مدل‌های گیاهی برای مطالعه رشد گیاهی و تولید عملکرد در پاسخ به متغیرهای مدیریتی و اقلیمی توسعه یافته‌اند (Tao & Zhang, 2010). استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی برای ارزیابی آثار گزینه‌های مختلف مدیریتی در تولید گیاه زراعی گندم توسط Andarzian *et al.* (2015) گزارش شده است. اگرچه چنین مطالعات شبیه‌سازی می‌باید به میزان شناخت دقیق از توانایی‌های مدل وابسته شود (Monteith, 1996). شبیه‌ساز سیستم‌های زراعی تولید کشاورزی (APSIM)، یکی از مدل‌های مرسوم گندم می‌باشد. این مدل در مقابل بسیاری از آزمایش‌های مزرع‌های شامل تیمارهای مختلف آبیاری و نیتروژن مورد ارزیابی قرار گرفته است (Asseng *et al.*, 2010; Sun & Feng, 2005; Chen *et al.*, 2010).

مدل‌های شبیه‌سازی زراعی ابزاری کلیدی در مطالعه اثرات تغییرات اقلیمی بر گیاهان زراعی مختلف می‌باشند (Rezaei *et al.*, 2015) و همچنین این مدل‌ها توانایی مشخص نمودن گزینه‌های مختلف سازگاری تحت سناریوهای مختلف اقلیمی را دارند (Li *et al.*, 2015). Ray *et al.* (2015)، عامل ۳۶ درصد تغییرات در عملکرد گندم مربوط به سال‌های مختلف را در تغییرپذیری اقلیمی گزارش کردند. Pirttioja *et al.* (2015) کاهش ۵ الی ۷ درصدی میانگین عملکرد در برابر افزایش هر یک درجه سانتی‌گراد دما و کاهش ۳ تا ۹ درصدی میانگین عملکرد در برابر هر ۱۰ درصد کاهش بارندگی را گزارش کردند. البته Innes *et al.* (2015) کاهش ۵/۳ درصدی در عملکرد را در برابر افزایش هر درجه سانتی‌گراد مشاهده کردند. Ahmed *et al.* (2016) افزایش ۵ درجه سانتی‌گراد در میانگین دما را عامل کاهش ۶۰ درصدی عملکرد گندم یافتند. مطالعات اثر افزایش دما و غلظت دی‌اکسیدکربن بر عملکرد گندم توسط Koocheki & Nassiri (2008) نشان داد که افزایش ۳/۵ تا ۴/۴ درجه سانتی‌گراد دما همراه با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در نقاط مختلف کشور می‌تواند عملکرد را در بازه ۱۴ الی ۲۱ درصد کاهش دهد. گندم به‌عنوان یک گیاه زراعی کلیدی در محدوده وسیعی از شرایط اقلیمی در ایران از جمله مناطق مرکزی کشت می‌شود. رقم روشن زمستانه با توجه به مقاومت به سرما و برخی بیماری‌ها از اهمیت خاصی در این مناطق برخوردار می‌باشد. با توجه به روند افزایش دما و کاهش آب‌های زیرزمینی انتظار کاهش عملکرد در آینده در این مناطق وجود دارد. بررسی اثرات احتمالی تغییرات اقلیم بر عملکرد جهت برنامه‌ریزی و آمادگی در برابر شرایط آینده ضروری می‌باشد. در مدل گیاهی APSIM-Wheat توانایی شبیه‌سازی اثرات افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر رشد گندم به مدل اضافه شده و به همین دلیل می‌تواند به‌عنوان

بارندگی آن نزدیک به ۳۴۰ میلی‌متر است و زمستانی طولانی و سرد و تابستانی معتدل دارد.

طرح آزمایشی در هر دو آزمایش یکسان بود و دو عامل آبیاری و کود نیتروژن را شامل می‌شد. آبیاری دارای چهار سطح آبیاری کامل (I_1)، کم‌آبیاری در دوره قبل از گلدهی (I_2)، کم‌آبیاری در مرحله پر کردن دانه (I_3) و کم‌آبیاری در کل دوره رشد (I_4) بود. کود نیتروژن دارای سه سطح ۲۰۰ (N_1)، ۱۰۰ (N_2) و ۵۰ (N_3) کیلوگرم نیتروژن در هکتار از منبع اوره ۴۶ درصد بود. طرح آزمایشی به صورت کرت خردشده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در چهار تکرار بود. با توجه به نوع آبیاری مزارع به صورت بارانی امکان تصادفی‌نمودن کامل عامل آبیاری وجود نداشت. بنابراین، عامل آبیاری به‌عنوان کرت اصلی و عامل کود نیتروژن به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. ابعاد کرت‌ها ۵ متر در ۳ متر و فاصله ۵ متری بین کرت‌های اصلی جهت جلوگیری از نفوذ آب در نظر گرفته شد.

در منطقه کرج زمین موردنظر جهت کشت در سال قبل زیر کشت ذرت بود و پس از برداشت شخم زده شد و قبل از کاشت جهت هموارنمودن و رفع علف‌های هرز روی آن کولتیواتور زده شد. با توجه به این‌که شبیه‌سازی بر مبنای مؤلفه‌های آبیاری و نیتروژن می‌باشد، سایر پارامترهای مدیریتی می‌بایست در حد بهینه باشند و در واقع تمامی نیازهای غذایی گیاه مرتفع شد و مبارزه کاملی نسبت به آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز انجام شود. در غیر این صورت مشاهدات از دقت و کیفیت لازم برای مقایسه با مدل برخوردار نخواهند بود. با توجه به آزمایش خاک (جدول ۱)، که توسط آزمایش خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری به‌دست آمد به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع سوپرفسفات‌تریپل ۵۰ درصد و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم از منبع سولفات‌پتاسیم ۵۰ درصد با استفاده از نوار کودکار دستگاه کشت گندم

ابزاری مناسب جهت پیش‌بینی عملکرد گندم در آینده مورد استفاده قرار گیرد، ولی با توجه به عدم پارامتریابی رقم روشن زمستانه برای مدل APSIM-Wheat در پژوهش‌های گذشته در ابتدا نیاز به پارامتریابی و ارزیابی مدل می‌باشد. اهداف موردنظر در این پژوهش به صورت زیر می‌باشند:

- ۱- پارامتریابی مدل APSIM-Wheat برای گیاه زراعی گندم زمستانه رقم روشن
- ۲- ارزیابی کارایی مدل APSIM-Wheat در شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم زمستانه رقم روشن
- ۳- استفاده از مدل APSIM-Wheat جهت ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر میزان عملکرد گندم زمستانه رقم روشن.

۲. مواد و روش‌ها

به‌منظور پارامتریابی مدل APSIM-Wheat دو آزمایش مزرعه‌ای در دو منطقه اجرا شد. منطقه اول مزرعه آموزشی - تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در شهر کرج استان البرز (واقع در $57^{\circ} 50'$ شرقی و $35^{\circ} 48'$ شمالی) و منطقه دوم یک مزرعه در شهرستان خمین استان مرکزی (واقع در $56^{\circ} 49'$ شرقی و $33^{\circ} 32'$ شمالی) بود. بارندگی‌های استان البرز از ماه‌های آبان و آذر آغاز و تا اواسط اردیبهشت‌ماه ادامه می‌یابد. استان البرز از نظر اقلیمی دارای تنوع زیادی می‌باشد. به‌گونه‌ای که از اقلیم بیابانی در قسمت‌های جنوبی شروع و تا اقلیم‌های نیمه‌مرطوب و مرطوب در قسمت‌های شمالی ادامه پیدا می‌کند. شهرستان کرج با ارتفاع ۱۳۰۰ متر از سطح دریا و متوسط بارندگی حدود ۲۴۰ میلی‌متر در سال دارای آب‌وهوای نیمه‌بیابانی و خشک در تابستان و سرد در زمستان است. شهرستان خمین در قسمت جنوب استان مرکزی و تقریباً در مرکز ایران قرار دارد. ارتفاع آن از سطح دریا ۱۸۱۵ متر می‌باشد. میزان

پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم ۵۰ درصد به صورت پیش کاشت توسط کودپاش سانتیریفیوژ روی سطح مزرعه پخش شد. سپس یک مرحله دیگر کولتیواتور جهت قراردادن کود در عمق ۱۰ سانتی متری سطح خاک زده شد. برای کشت گندم از رقم روشن زمستانه به میزان ۲۶۰ کیلوگرم در هکتار استفاده شد. کاشت توسط ردیف کار زنجیری در تاریخ ۱۳۹۳/۸/۹ انجام شد. در تاریخ ۱۳۹۳/۹/۳ میزان سبز مزرعه به حدود ۵۰ درصد رسید.

ویژگی های فیزیکی خاک که شامل رطوبت خاک در ظرفیت اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و ضریب هدایت هیدرولیکی در خاک اشباع می باشند، توسط آزمایش خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری برآورد شده و در اختیار مدل قرار داده شد (جدول ۴).

در مراحل مختلف رشد فنولوژیکی از کرت های آزمایشی پس از حذف اثر حاشیه ای نمونه برداری تخریبی به اندازه ۲۰ سانتی متر در ۲۰ سانتی متر برای مشخص نمودن شاخص سطح برگ، وزن خشک ساقه، وزن خشک برگ و وزن خشک اندام زایشی صورت گرفت.

به صورت نواری در عمق ۱۰ سانتی متری زیر بذر قرار گرفت. رقم روشن زمستانه به میزان ۲۶۰ کیلوگرم در هکتار در تاریخ ۱۳۹۳/۸/۲۰ توسط ردیف کار کشت شد. در تاریخ ۹۳/۹/۱۱ میزان سبز مزرعه به حدود ۵۰ درصد رسید. ویژگی های فیزیکی خاک که شامل رطوبت خاک در ظرفیت اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و ضریب هدایت هیدرولیکی در خاک اشباع می باشند، توسط آزمایش خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری برآورد شده و در اختیار مدل قرار داده شد (جدول ۲).

در منطقه خمین روی زمین مورد نظر برای کشت گندم، در سال قبل پس از برداشت چغندر قند در آذرماه سال ۱۳۹۲ شخم عمیق انجام شد. این زمین تا زمان کشت گندم در حالت آیش باقی ماند. برای آماده سازی زمین پیش از کاشت ابتدا یک کولتیواتور جهت هموارسازی و رفع علف های هرز مزرعه زده شد. بر این اساس با توجه به ویژگی های شیمیایی خاک (جدول ۳)، که توسط آزمایش خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری به دست آمد به مقدار ۱۷۲/۵ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل ۵۰ درصد و ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار

جدول ۱. ویژگی های شیمیایی خاک منطقه کرج

شوری (dSm^{-1})	اسیدینه	کربن آلی (%)	پتاسیم (ppm)	فسفر (ppm)	نیترژن کل (%)
۱/۸	۸/۲	۰/۶۴	۱۴۴	۵	۰/۰۸

جدول ۲. ویژگی های فیزیکی خاک منطقه کرج

رس	سیلت	شن	ضریب هدایت هیدرولیکی	نقطه پژمردگی دائم	ظرفیت زراعی	ظرفیت اشباع
(%)	(%)	(%)	(mm.h)	($cm^3.cm^{-3}$)	($cm^3.cm^{-3}$)	($cm^3.cm^{-3}$)
۳۳	۳۷	۳۰	۲/۸۳	۲۰	۳۳/۹	۴۴/۱

جدول ۳. ویژگی های شیمیایی خاک منطقه خمین

شوری (dSm^{-1})	اسیدینه	کربن آلی (%)	پتاسیم (ppm)	فسفر (ppm)	نیترژن کل (%)
۰/۹	۷/۶	۰/۴	۱۸۵	۸	۰/۰۴

جدول ۴. ویژگی‌های فیزیکی خاک منطقه خمین

ظرفیت اشباع	ظرفیت زراعی	نقطه پژمردگی دائم	ضریب هدایت هیدرولیکی	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	بافت خاک
(cm ³ .cm ³)	(cm ³ .cm ³)	(cm ³ .cm ³)	(mm.h)	(%)	(%)	(%)	
۳۹	۳۱	۱۴	۶/۲۱	۵۶	۲۶	۱۸	لوم شنی

توسط آزمایش خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری برآورد شده و در اختیار مدل قرار داده شد (جدول ۴).

در مراحل مختلف رشد فنولوژیکی از کرت‌های آزمایشی پس از حذف اثر حاشیه‌ای نمونه‌برداری تخریبی به اندازه ۲۰ سانتی‌متر در ۲۰ سانتی‌متر برای مشخص‌نمودن شاخص سطح برگ، وزن خشک ساقه، وزن خشک برگ و وزن خشک اندام زایشی صورت گرفت. همچنین، زمان‌های مربوط به دوره‌های مختلف فنولوژیکی برای هر کرت به‌طور جداگانه ثبت شد. در انتها، منطقه مرکزی هر کرت به مساحت ۱۰ مترمربع جهت اندازه‌گیری مقادیر نهایی وزن خشک دانه، ساقه و برگ و اجزای عملکرد برداشت شد. تاریخ‌های نمونه‌برداری در منطقه کرج ۹۳/۱۱/۲۰، ۹۳/۱۲/۱۰، ۹۳/۱۲/۲۳، ۹۴/۱/۱۵، ۹۴/۱/۳۱، ۹۴/۲/۱۵ و ۹۴/۲/۳۱ و تاریخ‌های نمونه‌برداری در شهرستان خمین ۹۳/۱۱/۱۵، ۹۳/۱۲/۱۵، ۹۳/۱/۵، ۹۴/۱/۱۵، ۹۴/۱/۳۱، ۹۴/۲/۲۰ و ۹۴/۳/۹ بودند. پارامترهای هواشناسی شامل تابش (ساعات آفتابی در صورت عدم وجود تابش)، حداقل و حداکثر دما و بارندگی در بازه زمانی روزانه از ایستگاه‌های هواشناسی مجاور (ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی کرج و ایستگاه هواشناسی خمین) دریافت و وارد مدل شدند.

کود نیتروژن از منبع اوره ۴۶ درصد در منطقه کرج به‌صورت ۵۰ درصد در تاریخ ۹۳/۱۲/۲۰، ۲۵ درصد در تاریخ ۹۴/۱/۱۵ و ۲۵ درصد در تاریخ ۹۴/۱/۳۰ و همچنین در شهرستان خمین ۵۰ درصد در تاریخ

همچنین، زمان‌های مربوط به دوره‌های مختلف فنولوژیکی برای هر کرت به‌طور جداگانه ثبت شد. در انتها، منطقه مرکزی هر کرت به مساحت ۱۰ مترمربع جهت اندازه‌گیری مقادیر نهایی وزن خشک دانه، ساقه و برگ و اجزای عملکرد برداشت شد. در منطقه خمین روی زمین موردنظر برای کشت گندم، در سال قبل پس از برداشت چغندر قند در آذرماه سال ۱۳۹۲ شخم عمیق انجام شد. این زمین تا زمان کشت گندم در حالت آیش باقی ماند. برای آماده‌سازی زمین پیش از کاشت ابتدا یک کولتیواتور جهت هموارسازی و رفع علف‌های هرز مزرعه زده شد. بر این اساس با توجه به ویژگی‌های شیمیایی خاک (جدول ۳)، که توسط آزمایش خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری به‌دست آمد به مقدار ۱۷۲/۵ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع سوپرفسفات‌تریپل ۵۰ درصد و ۱۲۵ کیلوگرم در هکتار پتاسیم از منبع سولفات‌پتاسیم ۵۰ درصد به‌صورت پیش‌کاشت توسط کودپاش سانتیریفیوژ روی سطح مزرعه پخش شد. سپس یک مرحله دیگر کولتیواتور جهت قراردادن کود در عمق ۱۰ سانتی‌متری سطح خاک زده شد. برای کشت گندم از رقم روشن زمستانه به میزان ۲۶۰ کیلوگرم در هکتار استفاده شد. کاشت توسط ردیف‌کار زنجیری در تاریخ ۱۳۹۳/۸/۹ انجام شد. در تاریخ ۱۳۹۳/۹/۳ میزان سبز مزرعه به حدود ۵۰ درصد رسید.

ویژگی‌های فیزیکی خاک که شامل رطوبت خاک در ظرفیت اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و ضریب هدایت هیدرولیکی در خاک اشباع می‌باشند،

۹۳/۱۲/۲۵، ۲۵ درصد در تاریخ ۹۴/۱/۲۵ و ۲۵ درصد در تاریخ ۹۴/۲/۱۰ سرک پاشی شد.

روش آبیاری در هر دو منطقه به روش آبیاری بارانی بود و میزان آبیاری در هر نوبت آبیاری بر اساس میزان خروجی آب آب پاش و مساحت تحت پوشش آب پاش، محاسبه شد. در هر دور ۳۰ میلی متر آبیاری انجام شد. تعداد دفعات آبیاری در آبیاری کامل، کم آبیاری در دوره قبل از گلدهی، کم آبیاری در مرحله پرشدن دانه و کم آبیاری در کل دوره رشد به ترتیب در منطقه کرج ۹، ۷، ۸ و ۶ دور آبیاری و در منطقه خمین ۱۲، ۹، ۱۱ و ۸ دور آبیاری بودند. برای اندازه گیری رطوبت خاک توسط کورسپلر به قطر ۵/۵ سانتی متر و ارتفاع ۱۰ سانتی متر نمونه گیری از عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی متری سطح زمین انجام شده و ظرف حاوی خاک مرطوب به مدت ۲۴ ساعت داخل اجاق با دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد قرار گرفت. سپس، بر اساس وزن خاک مرطوب و خاک خشک درصد رطوبت وزنی محاسبه شد. در حالت معمول فاصله دو آبیاری بر اساس رسیدن به ۵۰ درصد رطوبت وزنی و در حالت کم آبیاری رسیدن به ۷۰ درصد رطوبت وزنی در نظر گرفته شد.

پارامتریایی مدل بر اساس مشاهدات مربوط به تیمار آبیاری کامل و کود نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در هر دو منطقه انجام شد. در مدل APSIM-Wheat فرض شده که کاربر به طور معمول نیازی به تغییر پارامترهای مدل ندارد. بنابراین، راهنمایی جهت پارامتریایی برای رقم های جدید فراهم نشده است. اگرچه کاربران در صورت لزوم می توانند پارامترهای تخمینی موجود را تغییر دهند. در این مدل پارامترها به دو قسمت تقسیم می شوند، به طوری که بخش بزرگی از پارامترها به طور معمول برای تمامی رقم ها یکسان بود و بخش کوچکی از پارامترها برای رقم های جدید تغییر می یابند. تقریباً تمامی پارامترهای مرتبط با رقم مربوط به ویژگی های فنولوژیکی (زمان

حرارتی مورد نیاز برای دوره های مختلف رشد) و تولید عملکرد (تعداد و وزن دانه و افزایش خطی شاخص برداشت) می باشند (Soltani & Sinclair, 2015). پارامترهای مورد نیاز مدل بر اساس تعریف هر پارامتر از داده های مشاهداتی آزمایشی محاسبه شدند. زمان حرارتی مورد نیاز در دوره های مختلف رشد با توجه به ثبت زمان دوره های مختلف فنولوژیکی در آزمایش و بر اساس دمای پایه و متوسط روزانه دما در دوره مورد نظر و همچنین پارامترهای مرتبط با عملکرد بر اساس طول دوره پرکردن دانه، اجزای عملکرد و میزان عملکرد نهایی تجمع یافته اندازه گیری شدند. حداکثر اندازه دانه با تقسیم عملکرد در مترمربع بر تعداد دانه در مترمربع، تعداد دانه به ازای هر گرم ساقه با تقسیم تعداد دانه در مترمربع بر وزن ساقه در مترمربع، سرعت رشد دانه از گلدهی تا پرکردن دانه از تقسیم عملکرد بر طول دوره پرکردن و تعداد دانه در مترمربع و سرعت پتانسیل روزانه پرکردن دانه از تقسیم عملکرد بر طول دوره افزایش خطی عملکرد و تعداد دانه محاسبه شدند. Mirdavardoost (2008) پاسخ دوره های فنولوژیکی به طول دوره بهاره سازی را در رقم های معمول محاسبه کرد و Ahmadi (2008) پارامترهای مرتبط با فتوپریود در همین رقم ها را مشخص کرد.

از مشاهدات سایر تیمارها که در پارامتریایی حضور نداشتند جهت ارزیابی مدل بر اساس مقایسه بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده استفاده شد. خصوصیات وزن خشک، عملکرد و شاخص سطح برگ معیار ارزیابی مدل در نظر گرفته شد. میانگین تفاوت مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده از طریق RMSE¹ (جذر میانگین مجذور خطا)، با فرمول (۱) بیانگر کارایی مدل می باشد و هرچه این مقدار کوچک تر باشد نشانگر کارایی بالاتر مدل می باشد. جذر میانگین مجذور خطای

1. Root Mean Square Error

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$

μ_1 : میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده

μ_2 : میانگین مقادیر مشاهده شده

شبیه‌ساز سیستم‌های زراعی تولید کشاورزی (APSIM) یک ابزار نرم افزاری می‌باشد، که این امکان را فراهم می‌کند که زیر مدل‌ها (ماژول‌ها) برای شبیه‌سازی سیستم زراعی به یکدیگر متصل شوند (Keating *et al.*, 2003). ماژول APSIM-Wheat رشد، نمو و عملکرد گیاه زراعی گندم را در یک بازه زمانی یک‌روزه و در یک مساحت پایه (یک مترمربع) شبیه‌سازی می‌کند. رشدونمو گندم در پاسخ به آب‌وهوا (تابش و دما)، آب خاک و نیتروژن خاک و روش‌های مدیریتی می‌باشد (Zheng *et al.*, 2014). APSIM-Wheat شامل یازده مرحله نمو می‌باشد که براساس تجمع زمان حرارتی و سایر عوامل مانند بهاره‌سازی و طول روز مشخص می‌گردند (Chen *et al.*, 2010). مدل تجمع روزانه ماده خشک را براساس میزان تابش دریافتی محاسبه می‌کند که می‌تواند توسط کمبود آب خاک دچار محدودیت شود. تجمع روزانه ماده خشک حاصل ضرب تابش دریافتی، کارایی مصرف نور، ضریب پنخس، ضریب تنش و ضریب دی‌اکسیدکربن می‌باشد.

از مدل‌ها می‌توان در تحلیل اثرات اقلیمی آینده و اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی مناسب جهت سازگاری با آن‌ها استفاده کرد. یک روش پذیرفته شده جهت بررسی اثرات تغییر پارامترهای اقلیمی بر عملکرد گیاهان زراعی افزایش تدریجی دما، رطوبت و غلظت دی‌اکسیدکربن می‌باشد (Rosenzweig *et al.*, 2014). سناریوهای اصلی در این پژوهش جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گندم شامل ۱- افزایش دما به ترتیب +۱، +۲، +۳، +۴ و +۵ درجه سانتی‌گراد در سال اجرای آزمایش و ۲- افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در جو به مقادیر ۴۷۰، ۵۷۰، ۶۷۰، ۷۷۰، ۸۷۰ و ۹۷۰ قسمت در میلیون نسبت به

نرمال شده (۲) نیز کمک بیشتری به درک تفاوت‌های موجود می‌کند. در واقع این پارامتر با تقسیم نمودن RMSE به میانگین مشاهدات حاصل شده و نتیجه را به صورت درصد بیان می‌کند. در این مورد نیز مقادیر کم‌تر نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل می‌باشد.

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

$$Normal - RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \times \frac{100}{\bar{O}} \quad (2)$$

هم‌چنین شاخص توافق ویلموت^۱ (۳) برای ارزیابی مدل به کار برده شد. این شاخص یک ویژگی توصیفی بوده و می‌تواند مقادیر بین صفر و یک را اختیار کند، به طوری که مقدار یک، تطابق بسیار عالی و ایده‌آل را نشان می‌دهد و هرچه به صفر نزدیک شود نشان‌دهنده ضعف مدل در پیش‌بینی نتایج می‌باشد (Eitzinger *et al.*, 2004).

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{P}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

که در این روابط n تعداد جفت‌های مشاهده-شبیه‌سازی، P_i مقدار شبیه‌سازی شده و O_i مقدار مشاهده شده، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده شده می‌باشد.

در انتها، از آزمون آماری t-test برای بررسی تفاوت بین تمامی جفت‌های شبیه‌سازی و مشاهده شده در متغیرهای ماده خشک، عملکرد و حداکثر شاخص سطح برگ استفاده شد. فرض صفر در این آزمون آماری برابری میانگین تفاوت‌های بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده با صفر در برابر فرض یک عدم برابری با صفر می‌باشد. میزان معنی‌داری^۲ کم‌تر از ۰/۰۵ موجب رد فرض صفر و تأیید وجود تفاوت معنی‌دار بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده با سطح اطمینان ۹۵٪ می‌شود.

1. Willmot Index of Agreement (IOA)

2. P-Value

زمستانه حاصل از پارامتریابی در جدول (۵) نمایش داده شده است. پس از مقداردهی ضرایب و اجرای مدل نتایج شبیه‌سازی شده برای تیمار آبیاری کامل و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار (مبنای پارامتریابی) نشان می‌دهد که روش مورد استفاده جهت پارامتریابی مدل نتایج قابل قبولی را ایجاد کرده است (درصد خطا کم‌تر از ۱۳/۳ درصد در تمامی موارد). مدل پیش‌بینی دقیقی از زمان گلدهی و رسیدگی، تجمع ماده خشک و تولید عملکرد در هر دو منطقه را نشان می‌دهد (جدول ۶).

مقدار پیش‌فرض مدل (۳۷۰ قسمت در میلیون) براساس مدل HadGEM2-ES^۱ تحت سناریو مسیر نماینده غلظت (RCP) ۲ ۸/۵ وات بر مترمربع و (۳) اثر تلفیقی افزایش دما و غلظت دی‌اکسیدکربن در تیمار شاهد (آبیاری کامل و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) می‌باشند.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. پارامتریابی مدل

ضرایب ژنتیکی اندازه‌گیری شده مرتبط با رقم روشن

جدول ۵. ضرایب ژنتیکی حاصل از پارامتریابی مدل APSIM-Wheat

مقدار	واحد	عنوان
۲	-	حساسیت طول روز (photop_sens)
۲	-	حساسیت بهاره‌سازی (vern_sens)
۴۰۰	(°C day)	زمان حرارتی مورد نیاز از کاشت تا پایان دوره جوانی (tt_end_of_juvenile)
۱۲۰	(°C day)	زمان حرارتی مورد نیاز در طول دوره گلدهی (tt_flowering)
۵۵۵	(°C day)	زمان حرارتی مورد نیاز از گل‌آغازی تا گلدهی (tt_floral_initiation)
۵۴۵	(°C day)	زمان حرارتی مورد نیاز از شروع پر شدن دانه تا رسیدگی (tt_start_grain_fill)
۴۱	mg	حداکثر وزن دانه (max_grain_weight)
۱	(mg/day)	سرعت رشد دانه از گلدهی تا پر شدن دانه (potential_grain_growth_rate)
۲	(mg/day)	سرعت پتانسیل روزانه پر شدن دانه (potential_grain_filling_rate)
۲۵		تعداد دانه به‌ازای هر گرم ساقه (grains_per_gram_stem)

جدول ۶. نتایج حاصل از پارامتریابی مدل APSIM-Wheat در هر دو منطقه مورد مطالعه در تیمار آبیاری کامل و نیتروژن ۲۰۰

کیلوگرم در هکتار

صفات گیاهی	کرج		خمین	
	مشاهده	شبه‌سازی	مشاهده	شبه‌سازی
گلدهی (Day After Planting)	۱۰۴	۱۰۹	۱۱۸	۱۱۱
رسیدگی (Day After Planting)	۱۸۶	۱۹۲	۲۰۷	۲۱۲
حداکثر سطح برگ	۳/۸۴	۴/۲	۳/۸۹	۳/۳۷
ماده خشک در زمان برداشت (kg/ha)	۱۲۸۷۲	۱۳۰۹۹	۱۳۵۹۳	۱۳۹۸۲
عملکرد دانه (kg/ha)	۶۹۶۳	۶۸۱۸	۶۰۹۵	۶۲۰۱

1. Hadley Global Environment Model 2-Earth System
2. Representation Concentration Pathway

۲.۳. ارزیابی مدل

۱۱/۷ درصد و هم‌چنین شاخص توافق ویلموت همواره بالاتر از ۰/۸۸ بود. نکته قابل توجه در این بخش، تخمین دقیق نحوه تجمع ماده خشک حتی تحت شرایط تنش‌های آبی و غذایی می‌باشد. در واقع این موضوع نشان‌دهنده توان بالای مدل در شبیه‌سازی پاسخ‌های گیاهی به شرایط کم‌آبی و تنش کمبود نیتروژن می‌باشد. در اکثر موارد تفاوت موجود بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده مربوط به برآورد بیش از مقدار حقیقی توسط مدل بود در واقع مدل تجمع ماده خشک را همواره کمی بیش‌تر از میزان حقیقی شبیه‌سازی نموده است و یکی از دلایل عمده این موضوع برآورد شاخص سطح برگ بیش از میزان واقعی می‌باشد که این موضوع به‌ویژه در شرایط تنش مشهودتر بود. میزان معنی‌داری ۰/۵ برای متغیر ماده خشک توسط آزمون آماری محاسبه شد که نشان از عدم وجود تفاوت عمده بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌شده دارد. نمودار پراکندگی مقادیر شبیه‌سازی‌شده در برابر مقادیر مشاهده‌شده (شکل ۱) نیز دقت بالای مدل در شبیه‌سازی متغیر ماده خشک را نشان می‌دهد.

کارایی مدل توسط داده‌های مربوط به سایر تیمارهای آزمایشی در هر دو منطقه مورد ارزیابی قرار گرفت که این داده‌ها در پارامتریابی حضور نداشتند. متغیرهای موردنظر که مورد ارزیابی قرار گرفتند شامل ماده خشک، عملکرد و شاخص سطح برگ بودند.

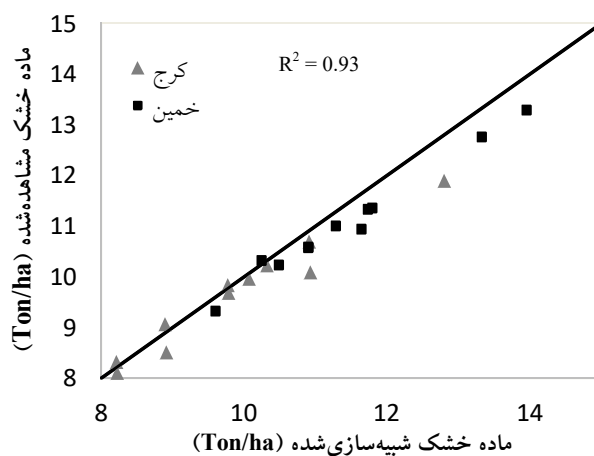
ماده خشک گندم در زمان رسیدگی در مجموع تیمارها در محدوده ۱۳۵۹۳-۸۱۰۶ کیلوگرم در هکتار قرار داشت. بالاترین مقدار مربوط به تیمار آبیاری کامل و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در منطقه خمین و کم‌ترین مقدار مربوط به تیمار کم‌آبیاری در کل دوره رشد گیاه و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار در منطقه کرج بود. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده نشان داد که مدل با دقت بالایی ($RMSE < 7.02$)، تجمع ماده خشک را شبیه‌سازی نموده است (جدول ۷).

شاخص‌های آماری نشان‌دهنده پیش‌بینی نسبتاً دقیق تجمع ماده خشک در هر دو منطقه بودند. به‌طوری‌که حداکثر جذر میانگین مجذور خطای نرمال‌شده مقدار

جدول ۷. شاخص‌های ارزیابی مدل APSIM-Wheat در پیش‌بینی تجمع ماده خشک گندم

شاخص											
I ₄ N ₃	I ₄ N ₂	I ₄ N ₁	I ₃ N ₃	I ₃ N ₂	I ₃ N ₁	I ₂ N ₃	I ₂ N ₂	I ₂ N ₁	I ₁ N ₃	I ₁ N ₂	منطقه
۴۷۴	۵۳۴	۳۶۴	۵۶۴	۷۰۲	۶۷۵	۴۹۷	۴۳۷	۴۰۷	۵۶۵	۴۷۵	کرج
۵۴۱	۴۱۹	۴۴۶	۴۱۶	۳۳۵	۴۷۴	۵۸۳	۴۹۵	۴۳۶	۵۰۵	۳۸۳	خمین (کیلوگرم در هکتار)
۹/۳	۱۰/۴	۶/۶	۹/۶	۱۱/۷	۱۰/۶	۹/۷	۸/۲	۷/۲	۹/۶	۷/۷	کرج
۹/۲	۶/۶	۶/۸	۶/۲	۴/۸	۶/۲	۹/۳	۷/۵	۶/۱	۷/۷	۵/۵	خمین
۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۹۹	کرج
۰/۸۸	۰/۹۳	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۳	۰/۹۸	خمین

I₁N₂: آبیاری کامل و نیتروژن ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₁N₃: آبیاری کامل و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار، I₂N₁: کم‌آبیاری پیش از گلدهی و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₂N₂: کم‌آبیاری پیش از گلدهی و نیتروژن ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₂N₃: کم‌آبیاری پیش از گلدهی و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار، I₃N₁: کم‌آبیاری در مرحله پرشدن دانه و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₃N₂: کم‌آبیاری در مرحله پرشدن دانه و نیتروژن ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₃N₃: کم‌آبیاری در مرحله پرشدن دانه و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار، I₄N₁: کم‌آبیاری در کل دوره رشد و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₄N₂: کم‌آبیاری در کل دوره رشد و نیتروژن ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₄N₃: کم‌آبیاری در کل دوره رشد و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار.



شکل ۱. مقادیر شبیه‌سازی شده در برابر مشاهده شده متغیر ماده خشک به همراه خط یک به یک

می‌دهند. RMSE در بازه ۰/۱۹-۰/۵۶، RMSE نرمال شده با بازه ۶/۷-۲۱/۵ درصد و شاخص توافق ویلموت با بازه ۰/۸۲-۰/۹۶ محاسبه شد (جدول ۹). در مجموع روند توسعه برگ به خوبی شبیه‌سازی شد، اما همواره مدل حداکثر شاخص سطح برگ را بیش از مقدار حقیقی نشان می‌دهد. در واقع سهم عمده تفاوت‌های موجود بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده مربوط به همین بیش‌برآورد مدل می‌باشد. دلیل این بیش‌برآورد را می‌توان به علت خطای ناچیز در تفکیک بندی ماده خشک به اندام‌های گیاهی یافت، به طوری که وزن اختصاص یافته به برگ در مدل بیش از مقدار واقعی می‌باشد. میزان معنی‌داری ۰/۱۶ برای متغیر حداکثر سطح برگ توسط آزمون آماری تفاوت معنی‌داری بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده نشان نمی‌دهد، اما مقدار کم‌تر آن نسبت به ماده خشک و عملکرد، بیان‌کننده پیش‌بینی ضعیف‌تر حداکثر سطح برگ نسبت به سایر متغیرها می‌باشد. نمودار پراکندگی مقادیر شبیه‌سازی شده در برابر مقادیر مشاهده شده (شکل ۳) نیز نشان می‌دهد که با وجود شبیه‌سازی مناسب روند سطح برگ مدل حداکثر سطح برگ را همواره بیش از مقادیر مشاهده شده برآورد کرده است.

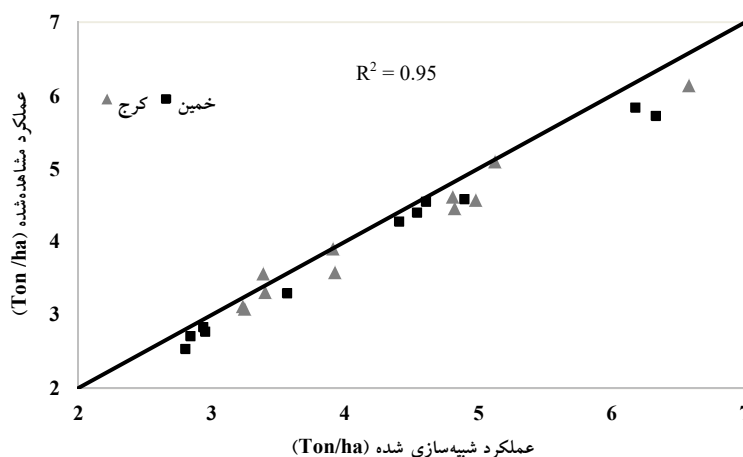
عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل در بازه ۶۸۱۸-۲۸۰۲ کیلوگرم در هکتار قرار داشتند که به عملکرد مشاهده شده نزدیک بودند (۶۹۶۳-۲۵۴۴ کیلوگرم در هکتار). بیش‌ترین عملکرد مربوط به تیمار آبیاری کامل و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در منطقه کرج و کم‌ترین مقدار مربوط به تیمار کم‌آبیاری در کل دوره رشد و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار در منطقه خمین بود. شاخص‌های آماری ارزیابی مدل شامل RMSE با بازه ۴۹-۴۵۵ کیلوگرم در هکتار و RMSE نرمال شده با بازه ۲-۱۴/۳ درصد و هم‌چنین ضریب توافق ویلموت با بازه ۰/۸۹-۰/۹۷ نشان‌دهنده توان بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد می‌باشد (جدول ۸). میزان معنی‌داری ۰/۵۴ برای متغیر عملکرد توسط آزمون آماری محاسبه شد که نشان از عدم وجود تفاوت معنی‌دار بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده دارد. نمودار پراکندگی مقادیر شبیه‌سازی شده در برابر مقادیر مشاهده شده (شکل ۲) نیز تخمین مناسب عملکرد مشاهده شده توسط مدل را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از ارزیابی مدل نشان داد با ضرایب ژنتیکی انتخاب شده، توسعه سطح برگ گیاهی به خوبی شبیه‌سازی شده است. شاخص‌های آماری نتایج قابل قبولی را در زمینه ارزیابی سطح برگ پیش‌بینی شده نشان

جدول ۸. شاخص‌های ارزیابی مدل APSIM-Wheat در پیش‌بینی عملکرد گندم

شاخص											منطقه	میانگین مجذور خطا (Kg/ha)
I ₄ N ₃	I ₄ N ₂	I ₄ N ₁	I ₃ N ₃	I ₃ N ₂	I ₃ N ₁	I ₂ N ₃	I ₂ N ₂	I ₂ N ₁	I ₁ N ₃	I ₁ N ₂	کرج	خمین
۸۳	۲۳۲	۲۰۱	۹۸	۳۷۳	۳۶۰	۵۸	۴۹	۴۹	۲۱۰	۲۴۴	کرج	خمین
۲۴۲	۲۶۷	۲۵۱	۲۱۵	۲۷۸	۳۷۱	۱۸۰	۱۹۸	۴۵۵	۱۸۸	۸۴	میانگین مجذور خطای نرمال شده (%)	
۴/۲	۱۰/۹	۸	۴/۶	۱۴/۳	۱۱	۲/۹	۲	۱/۸	۹/۲	۹	کرج	خمین
۱۰/۳	۸/۵	۶/۴	۸/۷	۷/۲	۷/۷	۷/۴	۵/۳	۱۰	۷/۵	۲	ضریب توافق	
۰/۹۶	۰/۹	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۵	۰/۹۷	کرج	خمین
۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۶		

I₁N₂: آبیاری کامل و نیتروژن ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₁N₃: آبیاری کامل و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار، I₂N₁: کم‌آبیاری پیش از گلدهی و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₂N₂: کم‌آبیاری پیش از گلدهی و نیتروژن ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₂N₃: کم‌آبیاری در مرحله پرشدن دانه و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₃N₁: کم‌آبیاری در مرحله پرشدن دانه و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار، I₃N₂: کم‌آبیاری در مرحله پرشدن دانه و نیتروژن ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₃N₃: کم‌آبیاری در مرحله پرشدن دانه و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار، I₄N₁: کم‌آبیاری در کل دوره رشد و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₄N₂: کم‌آبیاری در کل دوره رشد و نیتروژن ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₄N₃: کم‌آبیاری در کل دوره رشد و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار.



شکل ۲. مقادیر شبیه‌سازی شده در برابر مشاهده شده متغیر عملکرد به همراه خط یک‌به‌یک

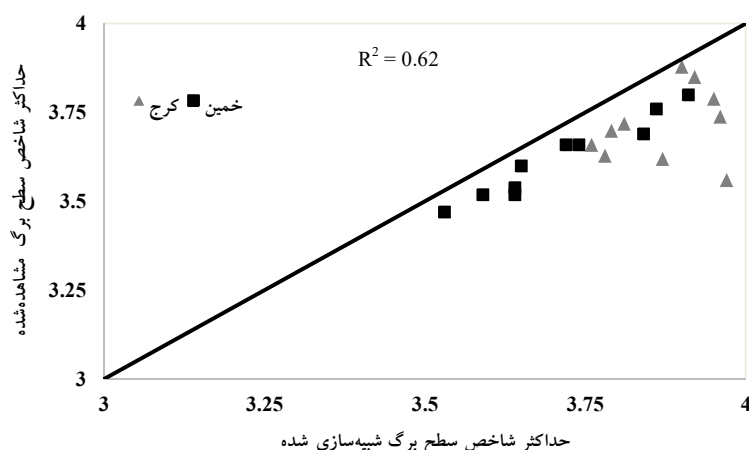
آزمایش‌ها، پارامتریابی بر پایه اطلاعات مشاهده شده مزرعه‌ای می‌باشد، در غیر این صورت امکان تولید نتایج نادرست و دور از واقعیت وجود دارد. مدل‌ها می‌باید برای شرایط مختلف محیطی و هم‌چنین ارقام جدید مورد ارزیابی قرار گیرند. در این آزمایش با استفاده از اطلاعات دو منطقه پارامتریابی یک‌بار انجام شد و نتایج مورد قبولی هم در هر دو منطقه ایجاد گردید. اما در مناطق با اقلیم‌های بسیار متفاوت ممکن است چنین روشی امکان‌پذیر نباشد.

در مجموع مدل APSIM-Wheat ویژگی‌های اصلی رشد و نمو گیاهی را با دقت بالایی شبیه‌سازی نموده و هم‌چنین با توجه به شاخص‌های آماری در تیمارهای کم‌آبیاری و تیمارهای با کمبود نیتروژن می‌توان مشاهده کرد مدل پاسخ‌های گیاهی در برابر تنش‌ها را به خوبی شبیه‌سازی نمود و مدل پس از پارامتریابی پتانسیل بالایی جهت به کارگیری در آزمایش‌های کم‌آبیاری و سطوح مختلف نیتروژن را دارد. نکته مهم در به کارگیری مدل‌ها در

جدول ۹. شاخص‌های ارزیابی مدل APSIM-Wheat در پیش‌بینی شاخص سطح برگ گندم

منطقه											شاخص	
I ₄ N ₃	I ₄ N ₂	I ₄ N ₁	I ₃ N ₃	I ₃ N ₂	I ₃ N ₁	I ₂ N ₃	I ₂ N ₂	I ₂ N ₁	I ₁ N ₃	I ₁ N ₂	کرج	میانگین مجذور خطا
۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۲۹	۰/۳۴	۰/۲۸	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳۴	۰/۲۶	۰/۲۸	کرج	
۰/۴۱	۰/۳۲	۰/۱۹	۰/۵۶	۰/۲۹	۰/۲	۰/۵۱	۰/۲۸	۰/۱۷	۰/۲۹	۰/۲۸	خمین	
۱۰/۲	۱۰/۸	۱۳/۱۲	۱۲/۳	۱۰/۳	۷/۸	۱۰/۶	۱۰/۵	۱۳/۷	۹/۵	۹/۹	کرج	میانگین مجذور خطای نرمال شده (%)
۱۷/۸	۱۳/۵	۷/۴	۲۰	۱۰/۴	۶/۸	۲۱/۵	۱۰/۹	۶/۷	۱۰/۲	۹/۵	خمین	
۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۹	۰/۹۵	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۳	کرج	ضریب توافق
۰/۸۹	۰/۹	۰/۹۳	۰/۸۵	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۸۲	۰/۹۱	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۴	خمین	

I₁N₂: آبیاری کامل و نیتروژن ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₁N₃: آبیاری کامل و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار، I₂N₁: کم آبیاری پیش از گلدهی و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₂N₂: کم آبیاری پیش از گلدهی و نیتروژن ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₂N₃: کم آبیاری پیش از گلدهی و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار، I₃N₁: کم آبیاری در مرحله پر شدن دانه و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₃N₂: کم آبیاری در مرحله پر شدن دانه و نیتروژن ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₃N₃: کم آبیاری در مرحله پر شدن دانه و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار، I₄N₁: کم آبیاری در کل دوره رشد و نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₄N₂: کم آبیاری در کل دوره رشد و نیتروژن ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، I₄N₃: کم آبیاری در کل دوره رشد و نیتروژن ۵۰ کیلوگرم در هکتار.



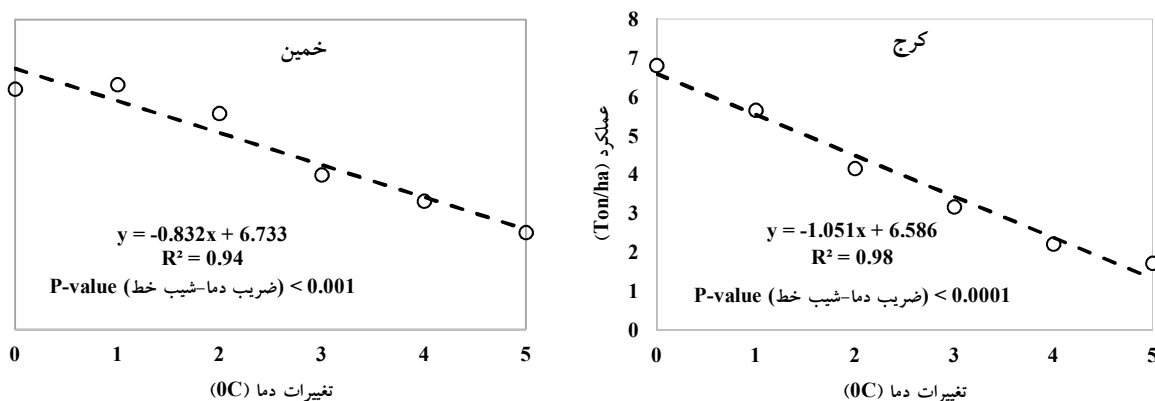
شکل ۳. مقادیر شبیه‌سازی شده در برابر مشاهده شده متغیر حداکثر شاخص سطح برگ به همراه خط یک‌ویک

عملکرد می‌شود. حداکثر کاهش عملکرد مشاهده شده در منطقه کرج و خمین به ترتیب ۷۵ و ۶۰ درصد بودند که مربوط به پنج درجه سانتی‌گراد افزایش دما می‌باشند.

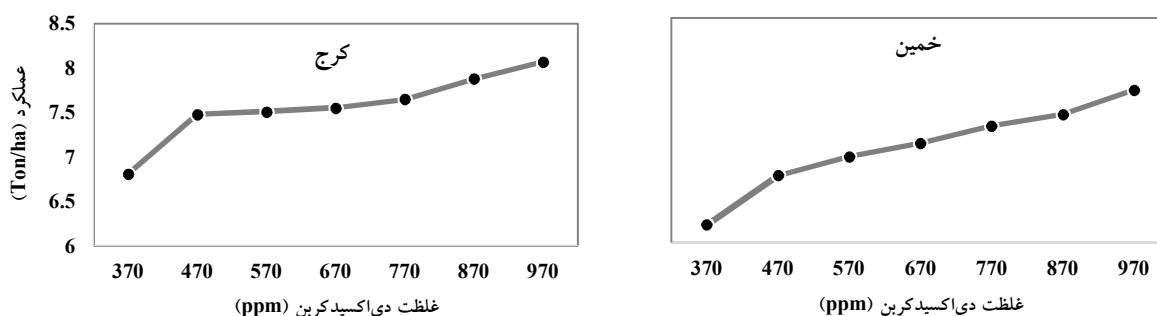
اثر شبیه‌سازی شده افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در هر دو منطقه روند مشابه افزایش عملکرد را نشان داد (شکل ۵). نسبت پاسخ عملکرد به افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن با در نظر گرفتن عملکرد در غلظت ۳۷۰ قسمت در میلیون به‌عنوان مبنا محاسبه شد.

۳.۳. کاربرد مدل: مشخص نمودن اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد دانه گندم

اثر افزایش دما بر عملکرد دانه گندم در هر دو منطقه در پنج سطح دمایی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴). در هر دو منطقه همراه با افزایش دما عملکرد کاهش یافت. در منطقه کرج عملکرد در برابر افزایش دما نسبت به خمین با شیب بیش‌تری کاهش می‌یابد. در منطقه خمین با یک درجه افزایش دما، عملکرد اندکی افزایش یافته ولی با ادامه روند افزایش دما دچار کاهش



شکل ۴. تأثیر شبیه‌سازی‌شده افزایش دما بر عملکرد دانه گندم در دو منطقه کرچ و خمین



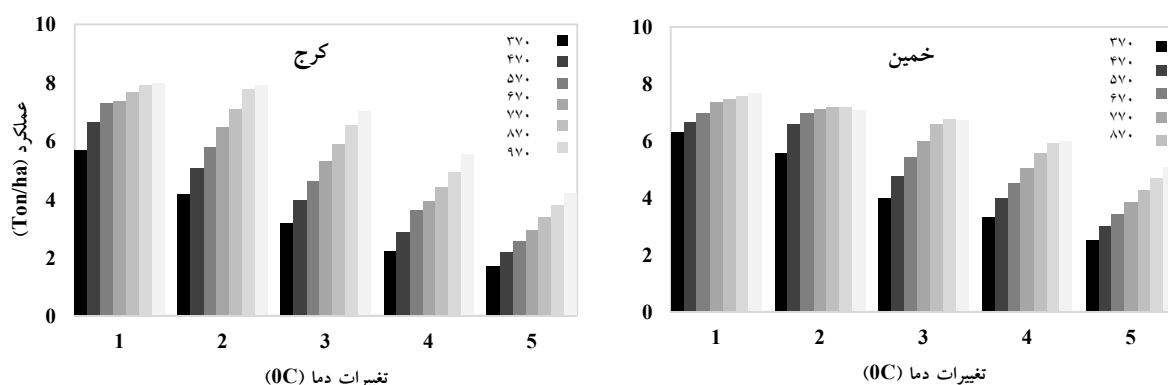
شکل ۵. تأثیر شبیه‌سازی‌شده افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر عملکرد دانه گندم در دو منطقه کرچ و خمین

مشاهده شد. اما در منطقه خمین در غلظت‌های بیش از ۶۷۰ قسمت در میلیون افزایش نسبی در عملکرد مشاهده شد. افزایش بیش‌تر دما (چهار یا پنج درجه سانتی‌گراد) همراه با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در هر دو منطقه همواره موجب کاهش عملکرد گردید (شکل ۶).

با توجه به این‌که تغییرات دما به عنوان یک عامل تعیین‌کننده عملکرد در آینده مشخص شد، مدل‌های گیاهان زراعی امکان بررسی گزینه‌های موجود جهت کاهش ریسک تولید را فراهم می‌کنند. نتایج این پژوهش با برخی دیگر از مطالعات شبیه‌سازی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی (Koocheki & Nassiri, 2008; Dettori *et al.*, 2011; Ozdogan, 2011) تطابق دارد.

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در منطقه کرچ نسبت عملکرد در بازه ۱-۱/۱۸ و در منطقه خمین در بازه ۱-۱/۲۴ قرار گرفت (شکل ۵).

اثر تلفیقی افزایش دما و غلظت دی‌اکسیدکربن نشان داد که افزایش یک یا دو درجه سانتی‌گراد دما هم‌زمان با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اثر مثبتی بر عملکرد گندم در هر دو منطقه دارد. افزایش یک درجه سانتی‌گراد دما همراه با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن موجب حداکثر ۱۷ و ۲۴ درصد افزایش عملکرد به‌ترتیب در مناطق کرچ و خمین شد. در صورت سه درجه سانتی‌گراد افزایش دما در منطقه کرچ تنها در غلظت ۹۷۰ قسمت در میلیون افزایش عملکرد و در غلظت‌های کم‌تر کاهش عملکرد



شکل ۶. تأثیر شبیه‌سازی شده تلفیقی افزایش دما و غلظت دی‌اکسیدکربن بر عملکرد گندم در دو منطقه کرج و خمین

پژوهش‌ها در تولید مدل‌های رشد گیاهان زراعی به کار گرفته شده و با استفاده از این مدل‌ها امکان اجرای پژوهش‌های تغییر اقلیم در زمان‌ها و مکان‌های مختلف فراهم می‌شود.

با توجه به این‌که در مناطق مورد بررسی معیشت کشاورزان وابستگی زیادی به تولید گندم دارد، کاهش عمده عملکرد می‌تواند تولید را غیراقتصادی نموده و موجب مهاجرت بخش کشاورزی به شهرها شود. همچنین در سطح کلان با کاهش تولید نیاز به واردات گندم افزایش می‌یابد. استفاده از نتایج مدل‌ها می‌تواند به آمادگی در برابر این بحران‌ها و برنامه‌ریزی بلندمدت کمک کند. علاوه بر این می‌توان برای کاهش اثرات نامطلوب تغییرات اقلیمی از مدل‌ها برای اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی مانند انتخاب تاریخ کاشت مناسب، انتخاب ارقام مقاوم به گرما و برنامه‌ریزی آبیاری بهینه استفاده کرد.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی مدل APSIM-Wheat نشان داد که مدل می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مناسب در مشخص نمودن اثرات تغییرات اقلیمی بر عملکرد گندم مورد استفاده قرار گیرد. در این آزمایش مدل مراحل فنولوژیکی رشد از جمله زمان گلدهی و رسیدگی را با دقت مناسبی پیش‌بینی

به‌طوری‌که آنها نیز بر کاهش عملکرد در برابر افزایش دما تأکید می‌کنند. کاهش عملکرد گندم با افزایش دو تا چهار درجه سانتی‌گراد در پژوهش‌های پیشین نیز گزارش شده بود (Wheeler et al., 2000). به‌طورکلی، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن جو با افزایش تجمع دی‌اکسیدکربن بین‌سلولی (افزایش نرخ خالص فتوسنتز) و کاهش هدایت روزنه‌ای (کاهش تنفس) موجب افزایش عملکرد می‌گردد (Asseng et al., 2004). اما یافته‌ها نشان می‌دهد که اثر منفی افزایش دما اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر عملکرد را معکوس می‌کند.

پژوهش‌های مرتبط با تغییر اقلیم جهت افزایش دما و غلظت دی‌اکسیدکربن نیازمند به اجرا در محیط کنترل‌شده می‌باشند. انجام چنین پژوهش‌هایی بدون داشتن تجهیزات موردنیاز و صرف هزینه زیاد امکان‌پذیر نمی‌باشد و علاوه بر این در محیط کنترل‌شده با توجه به عدم حضور سایر متغیرهای محیطی مانند باد نتایج ممکن است از دقت بالایی برخوردار نباشند. آزمایش‌های غنی‌سازی دی‌اکسیدکربن در فضای باز (FACE) نیز علاوه بر هزینه و پیچیدگی فراوان تنها قادر به اندازه‌گیری اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن می‌باشند. نتایج حاصل از این

1. Free Air CO₂ Enrichment

- Ramilan, T. (2015). Climate change impacts on phenology and yields of five broadacre crops at four climatologically distinct locations in Australia. *Agricultural Systems*, 132, 133-144.
- Arora, V. K., Singh, H., & Singh, B. (2007). Analyzing wheat productivity responses to climatic, irrigation and fertilizer-nitrogen regimes in a semi-arid sub-tropical environment using the CERES-Wheat model. *Agricultural water management*, 94(1-3), 22-30.
- Asseng, S., Jamieson, P. D., Kimball, B., Pinter, P., Sayre, K., Bowden, J. W., & Howden, S. M. (2004). Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Research*, 85(2-3), 85-102.
- Asseng, S., Van Keulen, H., & Stol, W. (2000). Performance and application of the APSIM Nwheat model in the Netherlands. *European journal of agronomy*, 12(1), 37-54.
- Boote, K. J., Porter, C., Jones, J. W., Thorburn, P. J., Kersebaum, K. C., Hoogenboom, G., ... & Hatfield, J. L. (2016). Sentinel site data for crop model improvement-definition and characterization. *Improving Modeling Tools to Assess Climate Change Effects on Crop Response*, 7, 125-158.
- Chen, C., Wang, E., & Yu, Q. (2010). Modelling the effects of climate variability and water management on crop water productivity and water balance in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97(8), 1175-1184.
- Dettori, M., Cesaraccio, C., Motroni, A., Spano, D., & Duce, P. (2011). Using CERES-Wheat to simulate durum wheat production and phenology in Southern Sardinia, Italy. *Field crops research*, 120(1), 179-188.
- Eitzinger, J., Trnka, M., Hösch, J., Žalud, Z., & Dubrovský, M. (2004). Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. *Ecological Modelling*, 171(3), 223-246.
- Holzworth, D. P., Huth, N. I., & deVoil, P. G. (2011). Simple software processes and tests improve the reliability and usefulness of a model. *Environmental modelling & software*, 26(4), 510-516.
- Innes, P. J., Tan, D. K. Y., Van Ogtrop, F., & Amthor, J. S. (2015). Effects of high-temperature episodes on wheat yields in New South Wales, Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 208, 95-107.
- نمود. توانایی مدل در پیش‌بینی ماده خشک تجمعی و عملکرد تولیدی در زمان رسیدگی تحت شرایط مختلف مدیریتی (آبیاری و نیتروژن)، توسط شاخص‌های آماری تأیید شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های فرایند‌گرا پتانسیل خوبی در شبیه‌سازی تولید ماده خشک دارند (Arora et al., 2007). با توجه به این که تولید ماده خشک ارتباط محکمی با عملکرد دانه دارد، مدل‌هایی که ماده خشک را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کنند می‌توانند به‌عنوان مدل قابل‌اعتماد در نظر گرفته شوند. کاربرد مدل در زمینه بررسی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گندم زمستانه نشان داد که همراه با افزایش دما روند کاهش عملکرد و با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن روند افزایش عملکرد پیش‌بینی می‌شود. تلفیق اثرات دما و غلظت دی‌اکسیدکربن نشان داد که در صورت افزایش بیش از سه درجه سانتی‌گراد دما در تمامی غلظت‌های ممکن دی‌اکسیدکربن، عملکرد دانه گندم کاهش خواهد یافت.

۵. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶. منابع

- Ahmadi, M. (2008). *Phenologic growth estimation of wheat*. M.Sc. thesis, Gorgan university, Gorgan, Iran. (In Persian)
- Ahmed, M., Akram, M. N., Asim, M., Aslam, M., Hassan, F. U., Higgins, S., ... & 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.
- Andarzian, B., Hoogenboom, G., Bannayan, M., Shirali, M., & Andarzian, B. (2015). Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. *Journal of the Saudi society of agricultural sciences*, 14(2), 189-199.
- Anwar, M. R., Li Liu, D., Farquharson, R., Macadam, I., Abadi, A., Finlayson, J., ... &

- Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., ... & McLean, G. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European journal of agronomy*, 18(3-4), 267-288.
- Koocheki, A., & Nassiri, M. (2008). Impacts of climate change and CO₂ concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies. *Iranian Journal field crops research*, 6(1), 139-154. (In Persian)
- Li, Z.T., Yang, J. Y., Drury, C. F., & Hoogenboom, G. (2015). Evaluation of the DSSAT-CSM for simulating yield and soil organic C and N of a long-term maize and wheat rotation experiment in the Loess Plateau of Northwestern China. *Agricultural Systems*, 135, 90-104.
- Martín, M., Olesen, J. E., & Porter, J. R. (2014). A genotype, environment and management (GxExM) analysis of adaptation in winter wheat to climate change in Denmark. *Agricultural and Forest Meteorology*, 187, 1-13.
- Mirdavardoost, F. (2008). *Quantifying the vernalization response in some Iranian wheat cultivars*. M.S. Thesis, Gorgan university, Gorgan, Iran. (In Persian)
- Monteith, J. L. (1996). The quest for balance in crop modeling. *Agronomy Journal*, 88(5), 695-697.
- Özdoğan, M. (2011). Modeling the impacts of climate change on wheat yields in Northwestern Turkey. *Agriculture, ecosystems & environment*, 141(1-2), 1-12.
- Pirttioja, N., Carter, T. R., Fronzek, S., Bindi, M., Hoffmann, H., Palosuo, T., ... & Asseng, S. (2015). Temperature and precipitation effects on wheat yield across a European transect: a crop model ensemble analysis using impact response surfaces. *Climate Research*, 65, 87-105.
- Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K., & West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature communications*, 6(1), 1-9.
- Rezaei, E. E., Siebert, S., & Ewert, F. (2015). Intensity of heat stress in winter wheat—phenology compensates for the adverse effect of global warming. *Environmental Research Letters*, 10(2), 024012.
- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., ... & Neumann, K. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3268-3273.
- Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2015). A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: Simulation in a temperate, sub-humid environment. *Field Crops Research*, 175, 37-46.
- Sun, N., & Feng, L. P. (2005). Assessing the climatic risk to crop yield of winter wheat using crop growth models. *Trans CSAE*, 21, 106-110.
- Tao, F., & Zhang, Z. (2010). Adaptation of maize production to climate change in North China Plain: quantify the relative contributions of adaptation options. *European Journal of Agronomy*, 33(2), 103-116.
- Wheeler, T. R., Craufurd, P. Q., Ellis, R. H., Porter, J. R., & Prasad, P.V. (2000). Temperature variability and the yield of annual crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1-3), 159-167.
- Zheng, B., Chenu, K., Doherty, A., Doherty, T., & Chapman, L. (2014). The APSIM-Wheat Module. *APSRU Toowoomba, Australia*, 1-44.