

Assessment of Climate Change Impact on Wheat Grain Yield and Biomass Under Two Levels of Salinity and Drought Stress

F. Hajiabadi, F. Hassanpour, M. Yaghoobzadeh* , and H. Hammami

Ph. D. Graduate of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran. And Educational Expert of Department of Water Engineering, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran. fhajiabadi@birjand.ac.ir

Associate Prof., Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran.
hassanpourir@uoz.ac.ir

Associate Prof., Department of Water Engineering, College of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran, Department of Research Group of Drought and Climate Change, University of Birjand, Birjand, Iran.

M.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir

Associate Prof., Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
hhammami@birjand.ac.ir

Received: March 2025 and Accepted: July 2025

Abstract

The use of crop models to estimate plant yield and determine optimal irrigation schedules is an effective strategy for sustainable agricultural water resource management. This study investigates the impact of climate change on wheat grain yield and biomass under two levels of salinity stress (1.6 and 6.0 dS/m) and five levels of water (rainfed, 50, 75, 100 and 125% of water requirement) in Birjand region. The AquaCrop model was employed to simulate crop performance during a historical baseline period (1975–2004) and a future period (2025–2054). To project future climate variables, including precipitation and maximum and minimum temperatures, five General Circulation Models (GCMs), namely, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, CSIRO-MK3.6, HADGEM2-ES, and GFDL-ESM2M were used under RCP4.5 and RCP8.5 emission scenarios. Based on a weighting method and performance metrics, the CSIRO-MK3.6 model was selected as the most suitable model for the region. The results indicated a projected decrease in precipitation and an increase in annual average maximum and minimum temperatures in the future period under both emission scenarios. Wheat grain yield simulation was zero under rainfed conditions in either period. The highest yields were observed under irrigation treatments supplying 100% and 125% of the crop's water requirements. For the RCP4.5 scenario, yields were 3.834 and 4.032 t/ha, respectively, and for RCP8.5, 3.822 and 4.170 t/ha. Finally, the grain yield reduction values were compared with the SMDI drought index, and the results showed that the greatest impact of drought was observed at high salinity and water stress levels.

Keywords: Drought, SMDI index, AOGCM models, AquaCrop

* - Corresponding Author's email: M.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir
<https://doi.org/10.22092/jwra.2025.368392.1069>

بررسی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد دانه و زیست توده گیاه گندم در دو سطح تنش شوری و آبی

فاطمه حاجی آبادی، فرزاد حسن پور، مصطفی یعقوب زاده*  و حسین حمای

دانش آموخته دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل و کارشناس ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

fhajiabadi@birjand.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل.

hassanpourir@uoz.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشگاه بیرجند.

M.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند.

hhammami@birjand.ac.ir

دریافت: اسفند ۱۴۰۳ و پذیرش: تیر ۱۴۰۴

چکیده

استفاده از مدل‌های گیاهی در تعیین عملکرد گیاهان و زمان‌بندی متناسب آبیاری از مدیریت‌های کارآمد در زمینه توسعه پایدار منابع آب در کشاورزی است. هدف از این پژوهش، بررسی اثر تغییر اقلیم بر عملکرد دانه و زیست توده گیاه گندم در دو سطح تنش شوری (۱/۶ و ۶/۰ dS/m) و پنج سطح تیمار آبی (دیم، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیازآبی) با استفاده از مدل گیاهی AquaCrop در دوره‌های پایه (۲۰۰۴-۱۹۷۵) و آبی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) در منطقه بیرجند واقع در استان خراسان جنوبی است. برای پیش‌بینی عوامل بارش و دمای حداکثر و حداقل در دوره آبی در محدوده مورد مطالعه از پنج مدل تغییر اقلیم IPSL-CM5A-LR، MIROC-ESM، CSIRO-MK3.6، HADGEM2-ES، GFDL-ESM2M تحت سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد که از این میان مدل CSIRO-MK3.6 با استفاده از روش وزن‌دهی و معیارهای عملکردی، به عنوان مدل برتر انتخاب شد. نتایج نشان داد که مقدار بارش پیش‌بینی شده برای دوره آبی نسبت به دوره پایه، در هر دو سناریو انتشار کاهش داشت ولی میانگین سالانه دمای حداکثر و حداقل در دوره آبی نسبت به دوره پایه در هر دو سناریو انتشار، افزایش یافت. بر اساس نتایج، تیمار دیم در دوره پایه و آبی، عملکرد دانه گندم نداشته است، این در حالی است که بیشترین میزان عملکرد دانه مربوط به تیمارهای ۱۰۰٪ و ۱۲۵٪ نیازآبی گیاه به ترتیب برای مقادیر سناریو RCP4.5 برابر با ۳/۸۳۴ و ۴/۰۳۲ تن در هکتار و برای سناریو RCP8.5 برابر با ۳/۸۲۲ و ۴/۱۷ تن در هکتار است. در نهایت مقادیر کاهش عملکرد دانه با شاخص خشکسالی SMDI مقایسه شد و نتایج نشان داد که در سطوح تنش شوری و آبی زیاد، بیشترین تاثیر خشکسالی مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، شاخص SMDI، مدل‌های AOGCM، مدل AquaCrop

* - آدرس ایمیل نویسنده مسئول: M.yaghoobzadeh@birjand.ac.ir



مقدمه

بخش کشاورزی در اقتصاد ملی و تأمین غذای جامعه نقش اساسی دارد و در راستای دستیابی به پایداری در این بخش، ضروری است از منابع و ابزارهای تولید در این بخش به بهترین شکل ممکن استفاده شود. تا ضمن کاهش در مصرف این منابع، سودآوری و رفاه کشاورزان نیز افزایش یابد (مهاجرانی و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک ایران، آب به عنوان یکی از مهم ترین منابع و به عنوان یک عامل اصلی محدودکننده تولید، نقش مهمی را در تعیین نوع فعالیت های زراعی ایفا می کند. از این رو، ارزیابی آب مورد نیاز سامانه های کشاورزی همواره از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است (اسامو^۱ و همکاران، ۲۰۰۵). با توجه به اینکه خشکسالی یکی از دلایل مهم کاهش عملکرد گیاه گندم است. بدیهی است همواره تقاضای آب برای محصولات کشاورزی افزایش می یابد و سؤال اساسی این است که چگونه می توان تولیدات کشاورزی را همراه با استفاده پایدار از منابع آبی و حفاظت از آن افزایش داد (دوگان و فولر، ۲۰۰۶).^۲ یک فن آوری برای مدیریت کارآمد منابع آب آبیاری استفاده از مدل های جدید در تعیین نیاز آبی و زمان بندی آبیاری در کنار فعالیت هایی در راستای اصلاح گیاهان، از مدیریت های کارآمد در زمینه توسعه پایدار منابع آب در کشاورزی است (سلیمانی، ۱۳۹۵). استفاده از مدل های شبیه سازی، محدودیت های موجود در تحقیقات میدانی را تا حد قابل ملاحظه ای کاهش داده و آن ها را تبدیل به ابزاری توانا در بررسی و تحلیل سناریوهای مختلف و انتخاب مدیریت مناسب آب کرده است (کروس و همکاران، ۲۰۰۸).

دتوری و همکاران (۲۰۱۱) از مدل CERES-Wheat برای شبیه سازی تولید فنولوژی گندم در ساردینیا^۳ جنوبی واقع در ایتالیا استفاده نمودند. مدل در برآورد عملکرد دانه و تاریخ گلدهی نتایج خوبی را نشان داد که با نتایج مطالعات دیگر که روی گندم انجام شده بود، مطابقت

داشت؛ اما نتایج برآورد وزن هزار دانه و تعداد دانه مطابقت خیلی خوبی را نشان نداد.

قوام سعیدی و همکاران (۱۳۹۹) واسنجی و صحت سنجی عملکرد و اجزای عملکرد گندم تحت شوری های مختلف و تحت شرایط تنش آبی به کمک مدل گیاهی DSSAT بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که مدل DSSAT به خوبی مراحل فنولوژیکی، عملکرد و اجزای عملکرد را برای منطقه بیرجند شبیه سازی نموده است.

اثر تنش رطوبتی بر عملکرد و صفات رشدی در سه رقم افق، روشن و نارین و واسنجی و صحت سنجی مدل گیاهی AQUACROP توسط قدیریان و همکاران (۱۳۹۹) انجام شد. با توجه به مقادیر شاخص های آماری محاسبه شده، می توان به این نتیجه رسید مدل کارایی قابل قبولی برای واسنجی ارقام مختلف گندم داشته است. این مهم به دلیل تعداد بالا و روزافزون ارقام مختلف گندم کاربرد بسیاری در منطقه دارد.

ون و همکاران (۲۰۲۳) نیز اثر تغییر اقلیم بر تاریخ کشت و نسبت کاشت را در سه مزرعه با استفاده از مدل AquaCrop و داده های گزارش پنجم تغییر اقلیم بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد استفاده از تاریخ کشت و نسبت کاشت مناسب می تواند یک راهکار برای مقابله با تغییرات آب و هوایی باشد. مقدم و همکاران (۲۰۲۳) نیز در دو مزرعه در کرج و خمین از ایران اثر تغییر اقلیم بر عملکرد گندم زمستانه تحت تیمارهای کودی با استفاده از داده های گزارش پنجم تغییر اقلیم و مدل APSIM انجام دادند. نتایج آن ها نشان داد استفاده از نیتروژن و کود در مناطق خشک می تواند در سازگاری با خشکسالی مؤثر باشد.

با توجه به اینکه در خصوص ارتباط تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی با عملکرد گیاه گندم در دوره آبی با استفاده از داده های تغییر اقلیم تحقیقات زیادی انجام نشده باشد، از این رو در این پژوهش سعی شده است، ارتباط عملکرد دانه و زیست توده گیاه گندم در تنش های شوری و

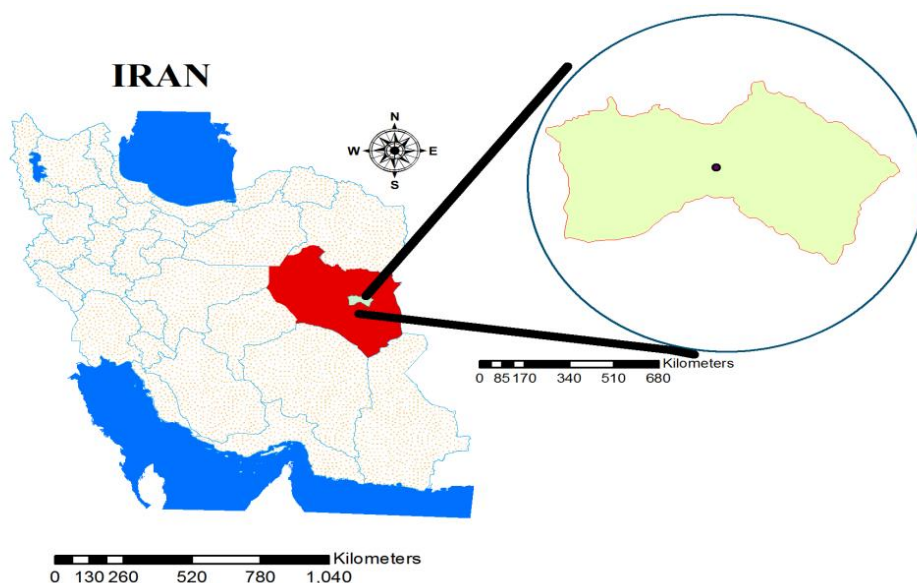
آبی مختلف در منطقه بیرجند با نتایج حاصل از خشکسالی کشاورزی تعیین شده به کمک شاخص SMDI در حال و آینده بررسی شود. در این بررسی با استفاده از مدل واسنجی و صحت سنجی شده AquaCrop، مقادیر عملکرد برای دوره آبی محاسبه شود و روند کاهش عملکرد دانه با مقادیر خشکسالی کشاورزی تعیین شده در آینده مقایسه شد. در این تحقیق سعی شد عملکرد دانه و زیست توده گندم در آینده به دست آورد و از نظر خشکسالی نیز بررسی نمود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، مزرعه گندم در دشت بیرجند واقع در استان خراسان جنوبی مورد بررسی قرار گرفته

است. منطقه مورد مطالعه دشت بیرجند در محدوده ۵۹ درجه و ۱۲ ثانیه طول جغرافیایی و ۳۲ درجه و ۵۳ ثانیه عرض جغرافیایی قرار گرفته است. وسعت این دشت ۳۴۸۹۳ کیلومتر مربع است. آب و هوای این دشت بیابانی و نیمه بیابانی بوده و دارای زمستان‌ها سرد و تابستان‌های خشک و گرم است. بارش سالانه ۱۵۲ میلی‌متر و ارتفاع از سطح دریا ۱۴۹۱ متر است. بر اساس اطلاعات ایستگاه بیرجند، میانگین حداقل و حداکثر دمای سالانه بیرجند به ترتیب ۸ و ۲۴ درجه سانتی‌گراد است و همچنین میانگین سالانه رطوبت نسبی این شهر ۳۶ درصد است. شکل (۱) نمایش شماتیکی از محدوده مطالعاتی دشت بیرجند در سطح کشور است.



شکل ۱- نمایش شماتیکی از محدوده مطالعاتی دشت بیرجند

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه سینوپتیک بیرجند

نام ایستگاه	کد ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا
بیرجند	40809	سینوپتیک	59/12	32/88	1480

روش پژوهش

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رشد و نمو گندم آبی و دیم از مدل‌های AOGCM و مدل گیاهی AquaCrop استفاده شد. برای تولید سناریوهای دما و بارش ماهانه منطقه برای دوره‌های آبی از

میان پنج مدل گردش کلی IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, CSIRO-MK3.6, HADGEM2-ES, GFDL-ESM2M مدل CSIRO-MK3.6 با استفاده از روش وزن‌دهی و معیارهای عملکردی

(R^2 , RMSE, NSE^۴) به عنوان مدل برتر در محدوده مطالعاتی انتخاب شد. خروجی مدل CSIRO-MK3.6 تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 مربوط به گزارش پنجم ارزیابی تغییر اقلیم (IPCC^۶) استفاده شد. یعقوب زاده (۲۰۲۲) مدل CSIRO-MK3.6.0 رو جزو مدل های مهم در تعیین بارش تعیین کرد. دوره آماری (۲۰۰۴-۱۹۷۵) به عنوان دوره پایه و همچنین دوره (۲۰۲۵-۲۰۵۴) به عنوان دوره آتی انتخاب و در ادامه برای تولید داده های روزانه و ریزمقیاس شده، از مدل LARS-WG استفاده شد. آزمایش های مزرعه ای در قالب بلوک های تصادفی و طرح فاکتوریل با چهار سطح تنش آبی (۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد) و دو سطح شوری (۱/۶ و ۶ dS/m) در محل مزرعه در طی دو سال انجام شد (جدول ۲). به منظور اطمینان از صحت عملکرد مدل، فرآیند واسنجی باید با هدف انطباق بین داده های مشاهده ای و شبیه سازی شده صورت گیرد. در این پژوهش، از داده های مزرعه ای اندازه گیری شده در سال زراعی ۱۳۹۵-۹۶ برای واسنجی مدل استفاده شد که در ابتدا مدل برای هر تیمار شوری و خشکی به صورت هم زمان برای داده های سال اول، واسنجی و سپس به طور هم زمان برای تیمارهای شوری و خشکی برای داده های سال دوم صحت سنجی شد. ابتدا برای تیمار شوری S_1 و سطح آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (S_1I_2) که تیمار شاهد بود،

فایل های ورودی مربوط به مدل را وارد کرده و مدل را اجرا نموده و سپس نتایج خروجی را با داده های مزرعه ای مقایسه شده و آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی انجام شد. همچنین فایل های مربوط به دیگر تیمارها را وارد مدل کرده و سپس مدل با تغییر بعضی از پارامترهای حساس که در مزرعه اندازه گیری نشده بود (پارامترهای گیاهی متغیر)، به طور هم زمان برای همه تیمارها واسنجی شد. به طوری که خطای نسبی بین عملکرد اندازه گیری و شبیه سازی شده حداقل شود. به عبارتی، مدل با استفاده از تیمارهای سال اول واسنجی و با استفاده از تیمارهای سال دوم صحت سنجی شد. همچنین واسنجی مدل برای پارامتر رطوبت خاک با استفاده از داده های اندازه گیری رطوبت خاک نیز انجام شد. پس از واسنجی و ارزیابی مدل گیاهی، برای برآورد خشکسالی کشاورزی (SMDI) و مقایسه آن با عملکرد گیاه گندم در دوره پایه، داده های رطوبت خاک با مدل AquaCrop شبیه سازی شد. سپس برای شبیه سازی رطوبت خاک در دوره آتی از سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 و مدل CSIRO-MK3.6 استفاده شد و در نهایت شاخص خشکسالی کشاورزی (SMDI) در دوره آتی تعیین شد و با شبیه سازی عملکرد گیاه گندم در دوره آتی مقایسه شد.

جدول ۲- مقادیر تنش شوری و آبی در رژیم های مختلف آبیاری

رژیم آبیاری	S_1I_4	S_1I_3	S_1I_2	S_1I_1	S_2I_4	S_2I_3	S_2I_2	S_2I_1	تنش آبی	Rainfed
توضیحات	%50	%75	%100	%125	%50	%75	%100	%125		دیم
	1.6 dS/m	1.6 dS/m	1.6 dS/m	1.6 dS/m	6 dS/m	6 dS/m	6 dS/m	6 dS/m	تنش شوری	

$$SMDI_j = \frac{\sum_{t=1}^j SD_t}{(25t + 25)} \quad (۳)$$

به دلیل اینکه اندازه‌گیری رطوبت خاک به صورت هفته به هفته برای یک دوره آماری بلندمدت برای تعیین خشکسالی سبب می‌شود که تعیین خشکسالی با داده‌های زیاد روبرو شود. بدین منظور بر اساس روش پالمر شاخص کمبود رطوبت خاک (SMDI) اصلاح شده است.

$$SMDI_j = SMDI_{j-1} + \Delta SMDI_j \quad (۴)$$

برای اینکه شدت خشکسالی برای هر ماه محاسبه شود، در معادلات فوق $i=1$ و $t=1$ قرار داده شد و معادله بعد از یک سری محاسبات به شکل زیر خلاصه شد.

$$SMDI_j = 0.5 \times SMDI_{j-1} + \frac{SD_j}{50} \quad (۵)$$

مدل و سناریوهای مورد استفاده

در حال حاضر معتبرترین ابزار برای تولید سناریوهای تغییر اقلیم، مدل‌های GCM است. هیات بین-الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم خود از سناریوهای جدید تحت عنوان RCP^۸ استفاده نموده است. سناریوهای RCP شامل یک سناریوی کاهشی سختگیرانه (RCP2.6)، دو سناریوی حد واسطه (RCP4.5 و RCP6) و یک سناریوی بدبینانه (RCP8.5) با تولید گازهای گلخانه‌ای بسیار بالا می‌باشند (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۳). خصوصیات مدل‌ها و سناریوهای مورد استفاده در این تحقیق، در جدول (۳) ارائه شده است.

شاخص خشکسالی کمبود رطوبت خاک^۷ (SMDI)

این شاخص بر مبنای مجموع رطوبت خاک به‌طور روزانه برای یک سال استوار است و تنها فاکتور اقلیمی مورد استفاده در این شاخص، داده‌های رطوبت خاک است. این داده‌ها به کمک مدل شبیه‌سازی برای دوره پایه محاسبه شده و شاخص کمبود رطوبت خاک به طریقه زیر محاسبه می‌شود. (یعقوب زاده، ۱۳۹۴)

$$SD_{i,j} = \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{MSW_j - \min SW_j} \times 100 \quad (۱)$$

$$\text{if } SW_{i,j} \leq MSW_j$$

$$SD_{i,j} = \frac{SW_{i,j} - MSW_j}{\max SW_j - MSW_j} \times 100$$

$$\text{if } SW_{i,j} > MSW_j$$

(۲)

در این روابط، $SD_{i,j}$: درصد کمبود رطوبت خاک، $SW_{i,j}$: میانگین رطوبت خاک در هفته در پروفیل خاک، MSW_j : متوسط درازمدت رطوبت قابل استفاده خاک در پروفیل خاک، $\max SW_j$: حداکثر درازمدت رطوبت قابل استفاده خاک در پروفیل خاک و $\min SW_j$: حداقل درازمدت رطوبت قابل استفاده خاک در پروفیل خاک، i : نشان‌دهنده تعداد هفته‌ها و j : نشان‌دهنده تعداد سال‌ها است.

درصد کمبود رطوبت خاک از ۱۰۰ تا ۱۰۰- متغیر است. در ۱۰۰ خاک مرطوب‌ترین و در ۱۰۰- خاک خشک‌ترین وضعیت را داراست. شاخص کمبود رطوبت خاک SMDI از رابطه زیر برای هر هفته بدست می‌آید.

جدول ۳- خصوصیات مدل و سناریوهای انتشار مورد استفاده در این تحقیق

نام مدل	مخفف مدل	کشور و گروه مؤسس	قدرت تفکیک (طول*عرض)	سناریوهای انتشار مورد استفاده
CSIRO-MK3.6.0	CSIRO-QCCCCE	استرالیا (Common wealth Scientific and Industrial Research Organization)	1.875×1.86	RCP4.5&RCP8.5
GFDL-ESM2M	NOAA-GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory USA	2.5×2	RCP4.5&RCP8.5
HADGEM2-ES	INPE	National Institute For Space Research Brazil	1.875×1.25	RCP4.5&RCP8.5
MIROC-ESM	MIROC	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Japan	1.77×2.81	RCP4.5&RCP8.5
IPSL-CM5A-LR	IPSL	Institut Pierre Simon Laplace France	1.875×3.75	RCP4.5&RCP8.5

مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG

خروجی مدل های AOGCM را نمی توان به طور مستقیم در مطالعات مختلف به منظور پیش بینی و ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم در مقیاس منطقه ای استفاده کرد، به همین علت از روش های ریزمقیاس نمایی برای رفع این مشکل استفاده می شود (یعقوب زاده و همکاران، ۱۳۹۵). برای ریزمقیاس نمایی خروجی های مدل های گردش کلی و تولید سری زمانی بارش و دما برای دوره آتی از مدل آماری LARS-WG استفاده می شود. این مدل یکی از مشهورترین مدل های مولد داده های تصادفی وضع هوا است که می تواند برای شبیه سازی داده های اقلیمی (بارش روزانه، دمای حداکثر و حداقل) در یک ایستگاه استفاده شود (Fan et al., 2021). LARS-WG برای مدل سازی متغیرهای هواشناسی، از توزیع های آماری پیچیده بهره می برد؛ بنابراین، مدل یادشده برای مدل سازی طول دوره های خشک، تر، بارش روزانه و سری های تابش دارای توزیع نیمه تجربی است. این مدل با دریافت فایل محتوای رفتار آب و هوای گذشته ایستگاه و سناریوی تغییر اقلیم، مقادیر روزانه دمای حداقل، حداکثر و بارش را در آینده پیش بینی می کند (بهلمی و مولی، ۱۹۸۰).

ارزیابی مدل

برای ارزیابی مدل، از تحلیل خطاهای باقیمانده و اختلاف بین مقادیر اندازه گیری و پیش بینی شده استفاده شد. آماره های لازم برای این منظور، از شاخص آماری ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شده است:

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{n} \right)^{1/2} \times \left(\frac{100}{\bar{O}} \right) \quad (۶)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (Pi - \bar{O})^2} \quad (۷)$$

در این معادلات O و P: به ترتیب مقدار عملکرد مشاهده شده و پیش بینی شده از هر تیمار، $\bar{O}$: متوسط عملکرد اندازه گیری شده و n: تعداد مشاهدات هست.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت سنجی مدل

مقدار RMSE رقم گندم سیروان در مرحله واسنجی و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۰/۱۸ و ۰/۲۰ به دست آمد که بر اساس این آماره، مدل سازی عملکرد محصول مطلوب است. شاخص R^2 در مرحله واسنجی و در مرحله اعتبارسنجی نزدیک به یک بود که نشان دهنده و مناسب مدل در برآورد عملکرد محصول است. فنگ و همکاران (۲۰۲۵) نیز دقت زیاد مدل

AquaCrop را در برآورد عملکرد گیاه در شرایط شوری و تنش به دست آوردند.

اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۵) در مجموع مشخص شد که مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 بین (۴) مدل موجود، دارای بیشترین وزن و کمترین خطای RMSE و همچنین بیشترین همبستگی با داده‌های بارش، دمای حداکثر و حداقل مشاهداتی ایستگاه بیرجند را دارا است و به‌عنوان مدل مناسب در این پژوهش انتخاب شد. برای تولید داده‌های اقلیمی و مشخص شدن تغییرات آن‌ها در دوره آتی، از مدل CSIRO-MK3.6.0 با دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. یعقوب زاده (۲۰۲۲) مدل CSIRO-MK3.6.0 رو جزو مدل‌های مهم در تعیین بارش مؤثر تعیین کرد. پارامترهای اقلیمی

مورد استفاده در این تحقیق شامل دمای حداقل، حداکثر و بارش بوده که یکی از مهم‌ترین موارد تأثیرگذار بر رطوبت خاک می‌باشند. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۶) مشاهده می‌شود که مقدار بارش پیش‌بینی شده برای دوره آتی نسبت به دوره پایه، تحت هر دو سناریوی انتشار کاهش یافته است. همچنین طبق پیش‌بینی مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6.0 سناریو RCP8.5 نسبت به RCP4.5 میانگین بارش کمتری را نشان می‌دهد. همچنین نتایج میانگین سالانه دمای حداکثر و حداقل در دوره پایه و آتی نشان می‌دهد که مقدار دمای حداکثر و حداقل در دوره آتی نسبت به دوره پایه تحت هر دو سناریو انتشار RCP4.5 و RCP8.5 افزایش داشته است. از طرفی به‌منظور مقایسه سناریوها، مقادیر سناریو RCP8.5 نسبت به سناریو RCP4.5، افزایش بیشتری در دما و کاهش بیشتری در بارش را نشان می‌دهد که بیانگر بحرانی بودن سناریو RCP8.5 در دوره آتی است.

جدول ۵ - مقایسه مقادیر آب‌وهوایی مدل‌های تغییر اقلیم با داده‌های ایستگاه سینوپتیک بیرجند

مدل	RMSE			R ²	
	بارش	دمای حداقل	دمای حداکثر	بارش	دمای حداقل
CSIRO-MK3.6	0.113	1.065	0.904	0.998	0.998
GFDL- ESM2M	0.132	1.045	1.044	0.997	0.998
IPSL-CM5A-LR	0.176	1.070	1.290	0.997	0.998
MIROC-ESM	0.182	1.031	0.99	0.997	0.998
HADGEM2-ES	0.201	1.070	0.965	0.997	0.998

جدول ۶- مقادیر متوسط سالانه پارامترهای اقلیمی در دوره پایه و آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5

سناریو	دمای حداکثر (C)	دمای حداقل (C)	بارش (mm)
دوره پایه	24.37	8.09	173.38
RCP4.5	26.99	10.91	171.11
RCP8.5	27.26	11.24	169.15

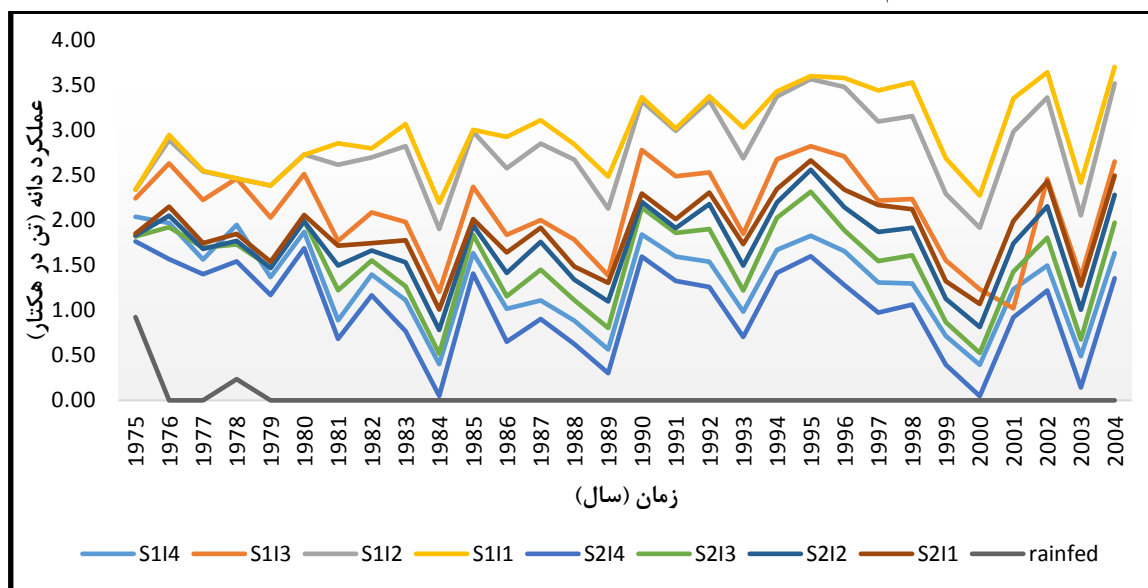
اثر تغییر اقلیم بر شاخص عملکرد دانه و زیست توده در دوره پایه

نتایج شاخص عملکرد دانه و زیست توده گیاه گندم برای تیمارهای مختلف در دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۴) در شکل (۵) و (۶) نشان می‌دهد که تیمار دیم (Rainfed)

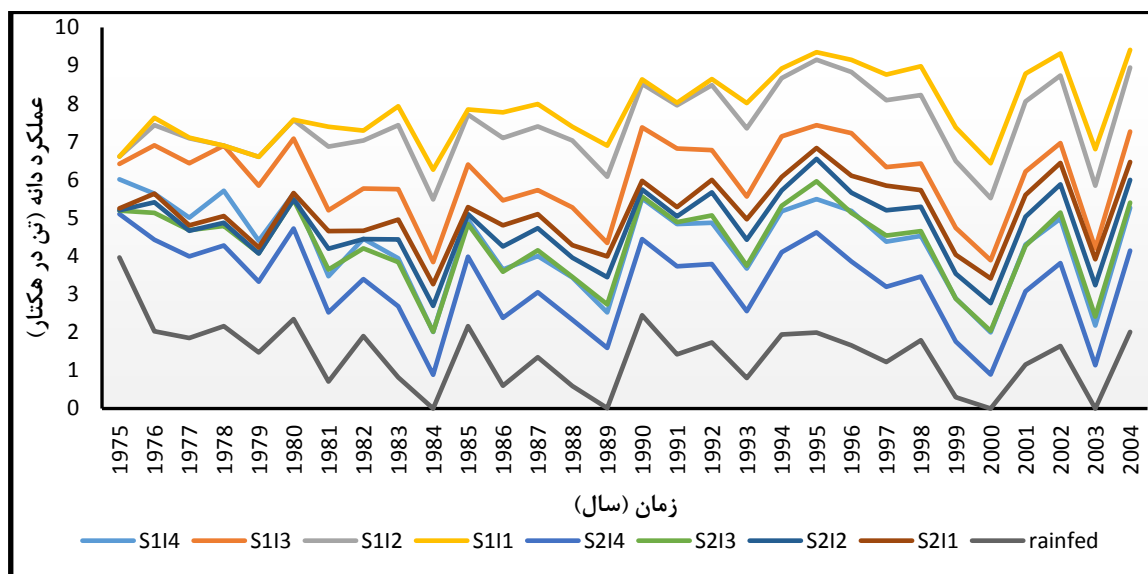
مقادیر عملکرد و زیست توده کمتری نسبت به سایر تیمارها دارد. همچنین مقدار شاخص عملکرد دانه در تیمار دیم جز در سال ۱۹۷۵ و ۱۹۷۸ در مابقی سال‌های دوره پایه صفر است. افزایش درصد آبیاری از سطح ۵۰ درصد به سطح ۱۲۵ درصد میزان نیاز گیاه، در هر دو سطح تنش شوری

عملکرد دانه و زیست توده و تیمار S1I1 با سطح تنش شوری ۱/۶ و سطح آبیاری ۱۲۵ درصد نیاز گیاه دارای بیشترین عملکرد دانه و زیست توده در بین سایر تیمارها هستند.

(۱/۶ و ۶ dS/m) تأثیر مستقیمی بر روی میزان عملکرد دانه و زیست توده دارد. همچنین افزایش سطح تنش شوری از ۱/۶ به ۶ باعث کاهش شاخص عملکرد دانه و زیست توده در تیمارهای مختلف می شود. در نهایت می توان مطرح نمود به ترتیب تیمارهای دیم (Rainfed) و S2I4 کمترین



شکل ۵- میزان عملکرد دانه تیمارهای مختلف در دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۴)



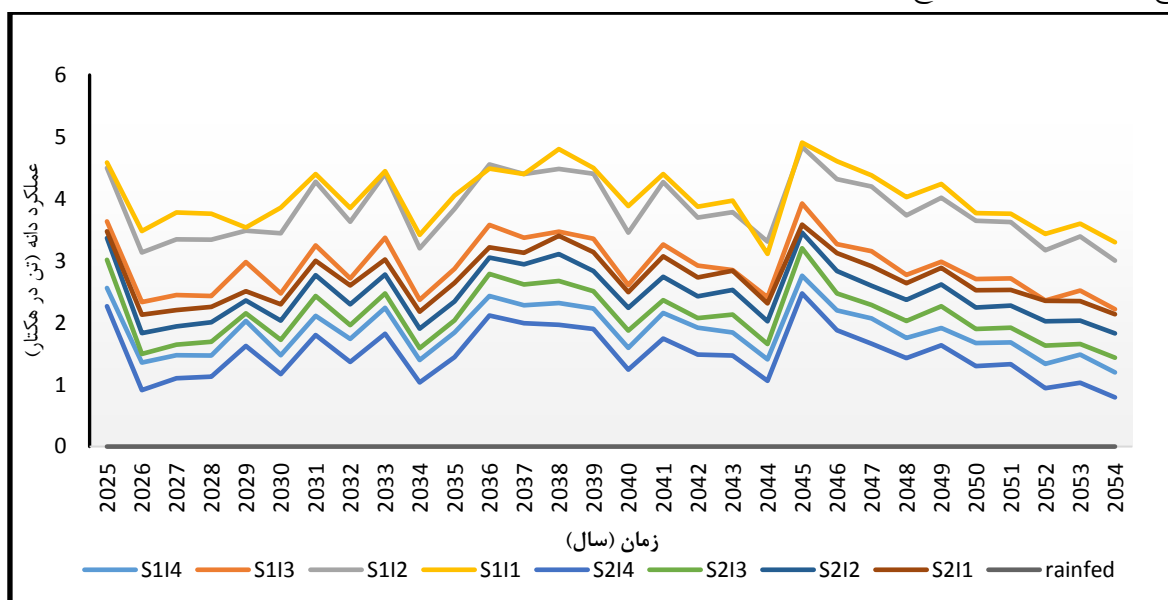
شکل ۶- میزان زیست توده تیمارهای مختلف در دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۴)

سناریو انتشار RCP4.5 برای تیمارهای مختلف در شکل های (۷) و (۸) نشان می دهد که در دوره آبی تیمار دیم (Rainfed) مقادیر عملکرد و زیست توده کمتری نسبت به سایر تیمارها دارد و مقدار شاخص عملکرد دانه در تیمار دیم در تمامی سال های دوره آبی صفر است.

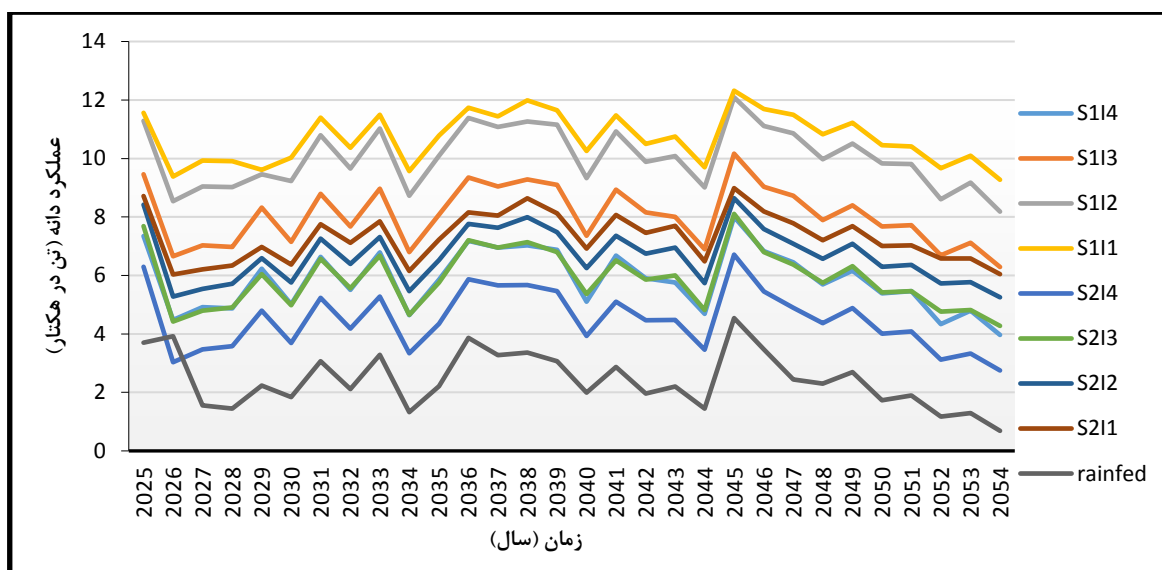
اثر تغییر اقلیم بر شاخص عملکرد دانه و زیست توده در دوره آبی تحت سناریو انتشار RCP4.5 مقادیر شاخص عملکرد دانه و زیست توده در دوره آبی با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت

دارای بیشترین عملکرد دانه و زیست‌توده در بین سایر تیمارها هستند. همچنین مقایسه نتایج مربوط به شاخص عملکرد دانه و زیست‌توده در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) تحت سناریو انتشار RCP4.5 با دوره پایه (۱۹۷۵-۲۰۰۴) نشان می‌دهد که شاخص عملکرد دانه و زیست‌توده گیاه گندم در دوره آتی تحت سناریو انتشار RCP4.5 نسبت به دوره پایه در بعضی سالها افزایش و در بعضی سالها کاهش یافته است.

افزایش درصد آبیاری از سطح ۵۰ درصد به سطح ۱۲۵ درصد میزان نیاز گیاه در هر دو سطح تنش شوری (۱/۶ و ۶) تأثیر مستقیمی بر روی میزان عملکرد دانه و زیست‌توده دارد. افزایش سطح تنش شوری از ۱/۶ به ۶ باعث کاهش شاخص عملکرد دانه و زیست‌توده در تیمارهای مختلف می‌شود. در مجموع، به ترتیب تیمارهای دیم (Rainfed) و S2I4 کمترین عملکرد دانه و زیست‌توده و تیمار S1I1 با سطح تنش شوری ۱/۶ و سطح آبیاری ۱۲۵ درصد نیاز گیاه



شکل ۷- شاخص عملکرد دانه در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP4.5 برای تیمارهای مختلف



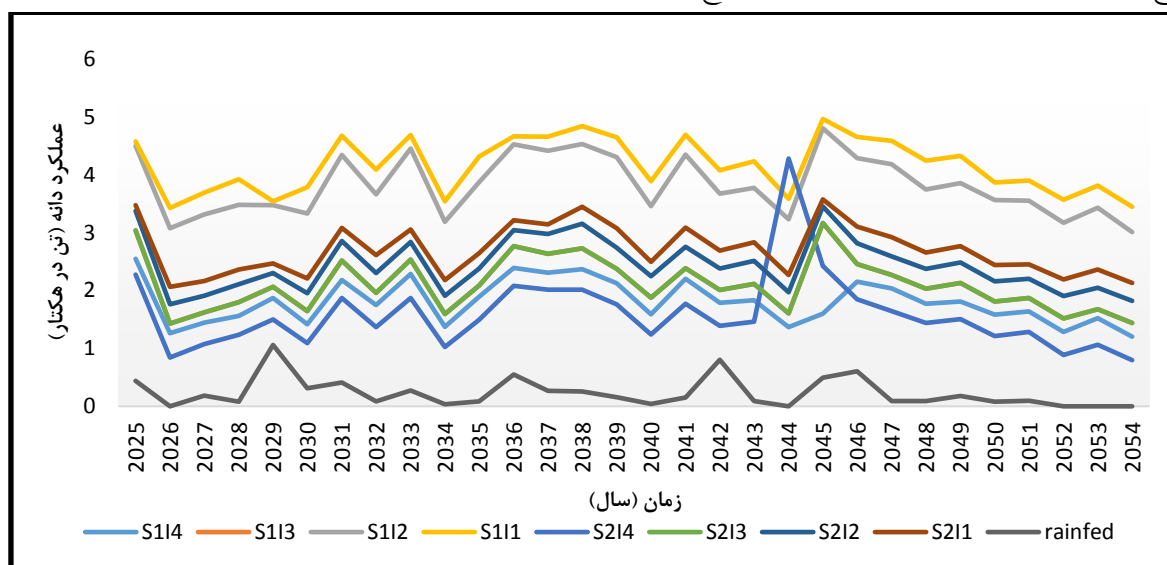
شکل ۸- شاخص زیست‌توده در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP4.5 برای تیمارهای مختلف

اثر تغییر اقلیم بر شاخص عملکرد دانه و زیست توده در

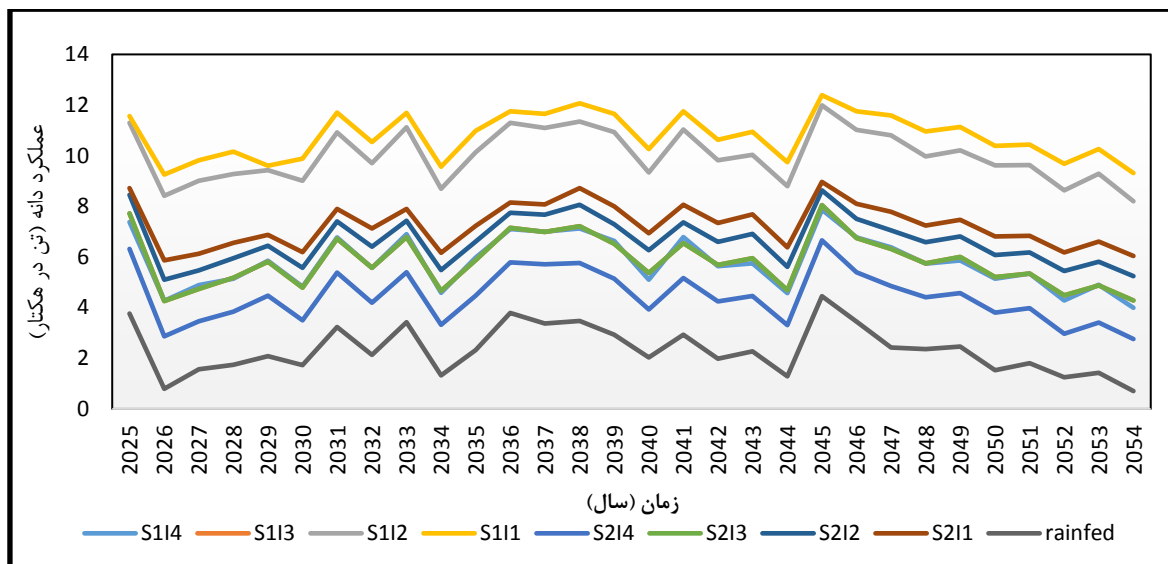
دوره آتی تحت سناریو انتشار RCP8.5

نتایج مربوط به شاخص عملکرد دانه و زیست توده در دوره آتی با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP8.5 برای تیمارهای مختلف در شکل های (۹) و (۱۰) نشان می دهد که در دوره آتی تیمار دیم (Rainfed) مقادیر عملکرد و زیست توده کمتری نسبت به سایر تیمارها دارد و مقدار شاخص عملکرد دانه در تیمار دیم تحت سناریو انتشار RCP8.5 نسبت به سناریو RCP4.5 افزایش قابل ملاحظه ای داشته است که علت آن می تواند کمتر بودن شدت خشکسالی در دوره آتی تحت سناریو RCP8.5 نسبت به RCP4.5 باشد (جدول ۶). افزایش درصد آبیاری از سطح ۵۰ درصد به سطح ۱۲۵ درصد میزان نیاز گیاه در هر دو سطح تنش

شوری (۱/۶ و ۶) تأثیر مستقیمی بر روی میزان عملکرد دانه و زیست توده دارد. همچنین، افزایش سطح تنش شوری از ۱/۶ به ۶ باعث کاهش شاخص عملکرد دانه و زیست توده در تیمارهای مختلف می شود. در مجموع می توان مطرح نمود به ترتیب تیمارهای دیم (Rainfed) و S₂I₄ کمترین عملکرد دانه و زیست توده و تیمار S₁I₁ با سطح تنش شوری ۱/۶ و سطح آبیاری ۱۲۵ درصد نیاز گیاه دارای بیشترین عملکرد دانه و زیست توده در بین سایر تیمارها هستند. همچنین مقایسه نتایج مربوط به شاخص عملکرد دانه و زیست توده در دوره آتی تحت سناریو انتشار RCP8.5 با دوره پایه نشان می دهد که شاخص عملکرد دانه و زیست توده گیاه گندم در دوره آتی تحت سناریو انتشار RCP8.5 نسبت به دوره پایه در بعضی سالها افزایش و در بعضی سالها کاهش یافته است.



شکل ۹- شاخص عملکرد دانه در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP8.5 برای تیمارهای مختلف

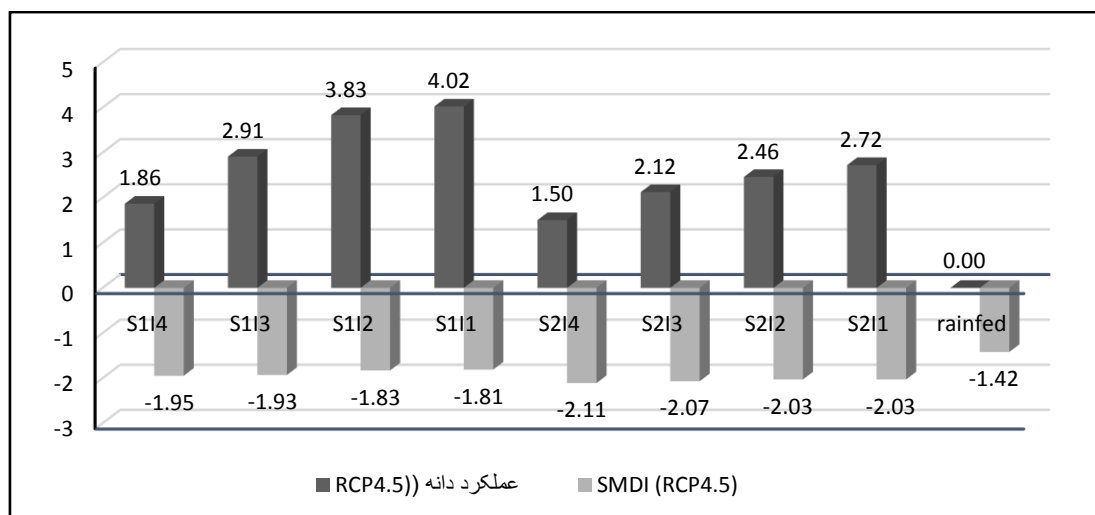


شکل ۱۰- شاخص زیست‌توده در دوره آبی (۲۰۲۵-۲۰۵۴) با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریو انتشار RCP8.5 برای تیمارهای مختلف

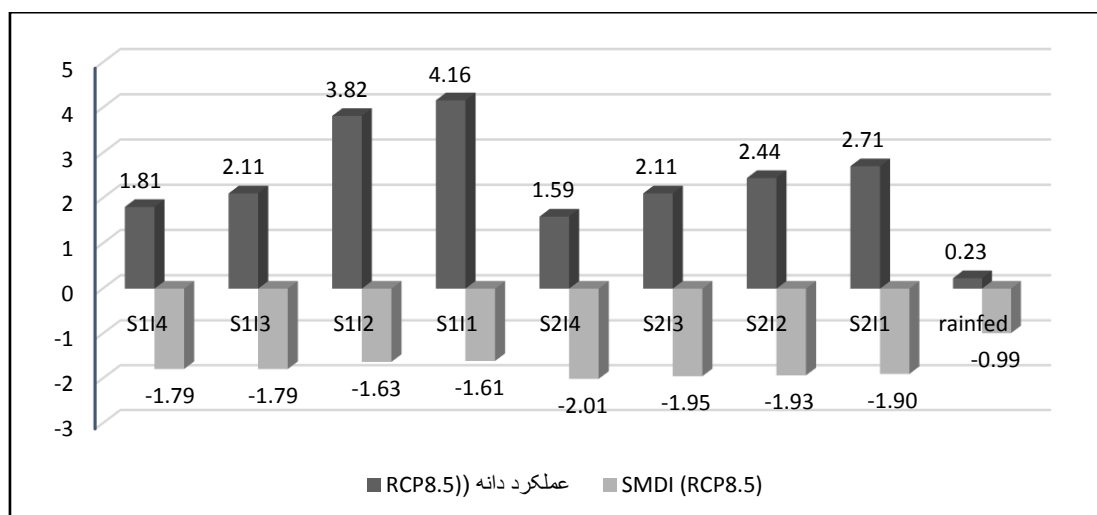
در هکتار) به ترتیب مربوط به تیمار S₁I₁ و S₁I₂ است. همچنین نتایج نشان می‌دهد شدت شاخص خشکسالی SMDI برای تیمار دیم در دوره آبی در هر دو سناریو انتشار نسبت به سایر تیمارها کمتر است و شدت خشکسالی در تیمار دیم در سناریو انتشار RCP4.5 نسبت به RCP8.5 بیشتر است. علاوه بر مطالب فوق می‌توان گفت که تغییر سطح آبیاری از ۵۰ درصد به ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه باعث افزایش مقدار شاخص عملکرد دانه و تغییر سطح تنش شوری آب از ۱/۶ به ۶ باعث کاهش مقادیر شاخص عملکرد دانه می‌شود.

مقایسه میانگین شاخص عملکرد دانه با شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI در دوره آبی

نتایج مربوط به میانگین بلندمدت سالانه شاخص عملکرد دانه و شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI در دوره آبی با استفاده از مدل اقلیمی CSIRO-MK3.6 تحت سناریوهای انتشار RCP8.5 و RCP4.5 برای تیمارهای مختلف در شکل (۱۱) و (۱۲) نشان می‌دهد که کمترین میزان عملکرد دانه (تن در هکتار) به ترتیب مربوط به تیمار دیم (Rainfed) و S₂I₄ و بیشترین میزان عملکرد دانه (تن



شکل ۱۱- مقایسه میانگین شاخص عملکرد دانه با شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI در دوره آبی تحت سناریو RCP4.5



شکل ۱۲- مقایسه میانگین شاخص عملکرد دانه با شاخص خشکسالی کشاورزی SMDI در دوره آبی تحت سناریو RCP8.5

نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده، به طور میانگین در دوره آبی در سناریو RCP8.5 نسبت به سناریو انتشار RCP4.5 از درجه خشکسالی بیشتری بخصوص در کاهش عملکرد برخوردار خواهند بود یا به عبارت دیگر بیشتر تحت تأثیر خشکسالی قرار خواهند گرفت. نتایج عملکرد دانه گیاه گندم نیز نشان داد، کمترین میزان عملکرد دانه (تن در هکتار) به ترتیب مربوط به تیمار دیم (Rainfed) و S₂I₄ و بیشترین میزان عملکرد دانه (تن در هکتار) به ترتیب مربوط به تیمار S₁I₁ و S₁I₂ است.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

نتایج تغییرات پارامترهای اقلیمی تحقیق نشان داد که مقدار بارش پیش بینی شده برای دوره آبی نسبت به دوره پایه، تحت هر دو سناریوی انتشار کاهش یافته است. همچنین نتایج میانگین سالانه دمای حداکثر و حداقل در دوره پایه و آبی نشان می دهد که مقدار دمای حداکثر و حداقل در دوره آبی نسبت به دوره پایه تحت هر دو سناریو انتشار RCP8.5 و RCP4.5 افزایش داشته است. از طرفی به منظور مقایسه سناریوها، مقادیر سناریو RCP8.5 نسبت به سناریو RCP4.5، افزایش بیشتری در دما و کاهش بیشتری در بارش را نشان می دهد که بیانگر بحرانی بودن سناریو RCP8.5 در دوره آبی است.

فهرست منابع

۱. دلقندی، مهدی، جورابلو، ساناز، و گنجی نوروبی، زهرا، ۱۴۰۲. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر شدت، مدت و مقدار خشکسالی منطقه سمنان با استفاده از دو شاخص SPI و RDI. *مجله پژوهش های خشکسالی و تغییر اقلیم*، ۱(۱)، صص ۱۸-۱۰۴. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.5909.1004>
۲. سلیمانی، علی، ۱۳۹۵. بررسی تأثیر تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم با استفاده از مدل ET-HS. *تنش های محیطی در علوم زراعی*، دوره ۹، شماره ۳۹(۳)، صص ۲۱۵-۲۰۵.
۳. قدیریان، امیرحسین، یعقوبزاده، مصطفی، زمانی، غلامرضا، و شهیدی، علی، ۱۳۹۹. واسنجی و صحت سنجی مدل گیاهی AQUACROP جهت شبیه سازی عملکرد سه رقم گندم تحت تنش رطوبتی مختلف. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۴(۶)، صص ۲۲۶۷-۲۲۵۷.

۴. قوام سعیدی نوقابی، سعید، یعقوبزاده، مصطفی، شهیدی، علی، حامی، حسین و کلانکی، مهدی، ۱۳۹۹. ارزیابی مدل DSSATv4.7 در شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی و عملکرد گندم رقم آنفارم ۴ تحت سطوح مختلف آبیاری. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۴(۲)، ۵۴۸-۵۵۸.
۵. یعقوب زاده، مصطفی، احمدی، محسن، برومند نسب، سعید، و حقایقی مقدم، سید ابوالقاسم، ۱۳۹۵. اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات تبخیر-تعرق در طی دوره رشد گیاهان مزارع آبی و دیم با استفاده از مدل‌های AOGCM. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۰(۴)، صص ۵۱۱-۵۲۳. doi: 10.22092/jwra.2017.109013.
۶. یعقوب زاده، مصطفی، امیرآبادی زاده، مهدی، رضائی، یوسف و پوررضا بیلندی، محسن، ۱۳۹۶. بررسی عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی جو در برآورد رطوبت خاک تحت تأثیر تغییر اقلیم. *تحقیقات آب‌وخاک ایران*، ۴۸(۵)، صص ۱۱۰۹-۱۱۱۹. doi: 10.22059/ijswr.2017.224039.667603.
7. Andarzian, B., M. Bannayan, P. Steduto, H. Mazraeh, M. E. Barati, M. A. Barati and A. Rahanama. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agric. Water Manag.*, 100:1-8.
8. Bhalme, H. N., and Mooley, D. A. 1980. Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, pp. 1197-1211.
9. Boulange, J., Nizamov, S., Nurbekov, A., Ziyatov, M., Kamilov, B., Nizamov, S., Abduvasikov, A., Khamdamova, G., Watanabe, H. (2025). Calibration and validation of the AquaCrop model for simulating cotton growth under a semi-arid climate in Uzbekistan, *Agricultural Water Management*, 310, 109360. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109360>.
10. Fan, G., Sarabandi, A. and Yaghoobzadeh, M., 2021. Evaluating the climate change effects on temperature, precipitation and evapotranspiration in eastern Iran using CMPI5. *Water Supply*, 218:4316-4327. DOI: 10.2166/ws.2021.179
11. Feng, Z., Miao, Q., Shi, H., Gonçalves, J.M. Li, X., Feng, W., Yan, J., Yu, D., Yan, Y., (2025). AquaCrop model-based sensitivity analysis of soil salinity dynamics and productivity under climate change in sandy-layered farmland, *Agricultural Water Management*, 307, 109244. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109244>
12. IPCC. 2013. Summary for policymakers. In: Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., and Midgley, P. (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press, 1-19.
13. Mohajerani, H., Mosaedi, A., Kholghi, M., Maftah Halghi, M. & Saad Aldin, A. (2011). Estimating crop water requirement of wheat by Cropwat model in Kordkouy-Golestan province. *National Conference on Water Scarcity*.
14. Moghaddam, H., Oveisi, M., Keshavarz Mehr, M., Bazrafshan, J., Naeimi, M. H., Pourmorad Kaleibar, B., and Müller-Schärer, H., 2023. Earlier sowing combined with nitrogen fertilization to adapt to climate change effects on yield of winter wheat in arid environments: Results from a field and modeling study, *European Journal of Agronomy*, 146, 126825. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126825>
15. Osamu, T., Yoshida, K., Hiroaki, S., Katsuhiko, H. & Hajime Tangi, H. (2005). Estimation of irrigation water using Crop wat model at KM35 project site, in Savannakhet, LAO, PDR. *Proceedings of the International Symposium on Role of Water Sciences in Transboundary River Basin Management*. 10-12 March. Ratchathani, Thailand.
16. Wen, P., Wei, Q., Zheng, L., Rui, Z., Niu, M., Gao, Ch., Guan, X., Wang, T., and Xiong, Sh., 2023. Adaptability of wheat to future climate change: Effects of sowing date and sowing rate on wheat yield in three wheat production regions in the North China Plain, *Science of The Total Environment*, 901, 165906. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165906>

17. Yaghoobzadeh, M. 2022. Selecting the best general circulation model and historical period to determine the effects of climate change on precipitation, IDŐJÁRÁS/Quarterly journal of the Hungarian meteorological service, 126(2), pp. 247-265.
DOI: 10.28974/idojaras.2022.2.5