



فصلنامه علوم محیطی، دوره بیستم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱

۶۱-۸۰

مقاله پژوهشی

## بررسی تغییرات عملکرد و موازنه آب برنج در استان گیلان تحت تأثیر تغییر اقلیم

بهنام کامکار<sup>۱\*</sup>، پویا اعلایی بازکیایی<sup>۲</sup>، پرینا علی‌زاده دهکردی<sup>۳</sup> و ابراهیم امیری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۲</sup> گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

<sup>۳</sup> گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

<sup>۴</sup> گروه مهندسی آب، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد لاهیجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

کامکار، ب.، پ. اعلایی بازکیایی، پ. علی‌زاده دهکردی و ا. امیری. ۱۴۰۱. بررسی تغییرات عملکرد و موازنه آب برنج در استان گیلان تحت تأثیر تغییر اقلیم. فصلنامه علوم محیطی. ۲۰(۲): ۶۱-۸۰.

**سابقه و هدف:** افزایش گازهای گلخانه‌ای، تأثیرهای متفاوتی بر عملکرد گیاهان زراعی خواهد داشت، به‌طوری‌که برهمکنش این اثرها ممکن است موجب افزایش یا کاهش محصول شود. مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی برای بررسی سطح‌های مختلف مدیریت زراعی و محیطی استفاده شده است این مطالعه با هدف بررسی مدل AquaCrop براساس اقلیم گذشته، حال و آینده در شهر رشت واقع در استان گیلان جهت دستیابی به حداکثر بهره‌وری آب و عملکرد دانه برنج صورت گرفت.

**مواد و روش‌ها:** به‌منظور بررسی میزان تغییرات عملکرد برنج، موازنه و بهره‌وری آب در شهر رشت واقع در استان گیلان تحت اقلیم گذشته، کنونی و آینده از مدل AquaCrop استفاده شد. بدین منظور از داده‌های بلندمدت (بالای ۳۰ سال) جهت بررسی وضعیت عملکرد و موازنه آب در کشت برنج در اقلیم گذشته و کنونی استفاده شد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار LARS-WG6 داده‌های هواشناسی ۸۳ سال آینده براساس داده‌های روزانه هواشناسی موجود تولید شد. بررسی مدل AquaCrop در اقلیم گذشته، حال و آینده براساس داده‌های روزانه دمای کمینه، بیشینه، بارش و ساعت آفتابی صورت گرفت. تیمارهای مورد بررسی شامل چهار سطح آبیاری شامل تیمار ۵۵، ۷۰، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی و تیمارهای تاریخ کاشت یک اردیبهشت، ۲۰ اردیبهشت و ۱۰ خرداد بود. با بررسی اثر سطح‌های تیماری مختلف براساس سناریوهای تغییر اقلیم RCP 4.5 و RCP 8.5، میزان تغییرات عملکرد دانه، تبخیر - تعرق و بهره‌وری آب مبتنی بر تبخیر و تعرق در اقلیم گذشته، کنونی و آینده مورد بررسی قرار گرفت. همچنین بهترین تیمار آبیاری و تاریخ کاشت جهت افزایش عملکرد برنج و کاهش میزان مصرف آب معرفی شد.

**نتایج و بحث:** نتایج ارزیابی نشان داد که مدل LARS-WG6 با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی مؤلفه‌های اقلیمی دما، بارش و تابش می‌باشد. نتایج نشان داد که دمای کمینه و بیشینه طی سناریوهای تغییر اقلیم روند افزایشی و میزان تابش و بارش روند کاهشی داشته است. بررسی

\* Corresponding Author: Email Address. kamkar@ferdowsi.um.ac.ir

<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2022.1013>

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1401.20.2.9.0>

عملکرد زیستی و دانه برنج تحت RCP 4.5 و RCP 8.5 نشان داد که بیشترین عملکرد دانه و زیست‌توده در آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی و تاریخ کاشت یکم اردیبهشت به‌دست آمد. بررسی بهره‌وری آب نشان داد که تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی و تاریخ کاشت ۱۰ خرداد نقش مؤثری در افزایش ذخیره آب خاک و کاهش تبخیر و تعرق از سطح خاک داشته است. براساس مقادیر تبخیر-تعرق به‌دست آمده تحت سناریوهای مورد بررسی، بیشترین بهره‌وری تولید دانه مبتنی بر تبخیر - تعرق در آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی و تاریخ کاشت ۱۰ خرداد به‌دست آمد.

**نتیجه‌گیری:** با توجه به نتایج به‌دست آمده، با در نظر گرفتن بهره‌وری مصرف آب و میزان عملکرد، با توجه به مشکل‌هایی که در آینده از جمله کمبود آب وجود خواهد داشت، به نظر می‌رسد کشت دیر هنگام برنج در شرایط کمبود آب راهکار مناسبی باشد، اما در شرایطی که در محیط کمبود آب وجود نداشته باشد، کشت زود هنگام برنج مانند یکم اردیبهشت می‌تواند سبب افزایش تولید شود. بررسی سطح‌های آبیاری نشان داد که تولید دانه مؤثرترین عامل در افزایش بهره‌وری مصرف آب است و استفاده از سطح‌های کم‌آبیاری نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری آب نخواهد داشت.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری، بهره‌وری آب، تاریخ کاشت، مدل AquaCrop.

## مقدمه

آب خاک و عملکرد زیستی پنبه گزارش نمودند. از آنجا که محصولات زراعی در پاسخ به عامل‌های اقلیمی و فیزیکی محدوده مشخصی دارند، با شناخت این عامل‌ها می‌توان امکانات بالقوه اقلیمی را در منطقه‌های مختلف شناسایی کرده و بیشترین بهره‌برداری را از آن نمود (Zolfagari *et al.*, 2016). بنابر نظر بسیاری از محققان تاریخ کاشت به‌دلیل تأثیر آن بر مرحله‌های مختلف رشد و نمو و در نهایت عملکرد، دارای اهمیت است (Pazoki *et al.*, 2010). Nyakudya and Stroosnijder (2014) به بررسی عمق ریشه و تراکم و تاریخ کاشت ذرت در زیمباوه با مدل Aquacrop پرداختند. نتایج نشان داد که در این آزمایش به‌کارگیری مدل در انتخاب بهترین تاریخ کاشت سبب کاهش ۴۰ درصد زهکشی آب در سال مرطوب، افزایش آب در دسترس خاک، عمق ریشه و افزایش عملکرد دانه از ۶ به ۷/۸ تن در هکتار شد.

بنابر آخرین گزارش‌ها، انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر فعالیت‌های بشر، عامل اصلی تغییرات اقلیمی در قرن اخیر بوده (IPPC, 2007) و بیشتر منطقه‌های کره زمین را با افزایش دما (بویژه دمای کمینه)، تغییرات در رژیم بارشی و افزایش غلظت دی‌اکسید کربن روبرو خواهد کرد (Mereu *et al.*, 2010). افزایش گازهای گلخانه‌ای،

براساس آمار سازمان خواربار جهانی<sup>۱</sup> (FAO)، ایران در سال ۲۰۱۹ دارای ۴۳۷ هزار هکتار سطح زیر کاشت و ۱/۹۹ میلیون تن تولید برنج بوده است. واردات برنج در ایران در سال ۲۰۱۹ حدود ۱/۴۲ میلیون تن بوده است (FAO, 2019). این آمار دلالت بر آن دارد که تولید داخلی کفایت تأمین نیاز کشور را نداشته و بخشی از نیاز برنج مصرفی از طریق واردات تأمین شده است. استان گیلان بعد از مازندران بیشترین سطح زیر کاشت برنج (۲۲۰ هزار هکتار) را در بین استان‌های کشور دارد (Agricultural statistics, 2020). بنابراین توجه به تولید برنج در این استان از اهمیت زیادی برخوردار است. از مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی برای انجام مطالعات مختلف مدیریت گیاه استفاده شده است (Soltani *et al.*, 1999). مدل AquaCrop مدلی آب‌محور است که شبیه‌سازی رشد تاج‌پوشش و ماده خشک بالای سطح خاک گیاه را با شبیه‌سازی تعرق گیاه انجام می‌دهد و در پایان کار عملکرد را براساس مقادیر تعرق روزانه گیاه شبیه‌سازی می‌کند (Jin *et al.*, 2018). (Tan *et al.*, 2018) در بررسی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی رشد پنبه تحت تیمارهای آبیاری در شرایط استفاده از مالچ، ضریب تبیین بالای ۰/۷۷ را در شبیه‌سازی پوشش تاج‌پوشش، ذخیره

هواشناسی سال‌های ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۶ استفاده شد. همچنین به منظور بررسی مؤلفه‌های بیان شده در شرایط اقلیمی آینده، اطلاعات هواشناسی روزانه ۸۳ سال آینده با استفاده از نرم‌افزار LARS-WG6 پیش‌بینی شد. تیمارهای مورد بررسی شامل چهار سطح آبیاری شامل تیمار ۵۵، ۷۰، ۸۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی و تیمارهای تاریخ کاشت یک اردیبهشت، ۲۰ اردیبهشت و ۱۰ خرداد بود. بنابر بررسی صورت گرفته تاریخ کاشت مرسوم منطقه، نیمه دوم اردیبهشت است. صفت‌های مورد بررسی شامل تغییرات متغیرهای اقلیمی دما، بارش و تابش، عملکرد دانه و زیست‌توده برنج، میزان تبخیر و تعرق در فصل رشد برنج و بهره‌وری تولید برنج مبتنی بر تبخیر و تعرق می‌باشد.

**بهره‌وری آب:** محاسبه بهره‌وری آب با استفاده از رابطه (۱) انجام شد (Singh et al., 2006):

$$WP_{ET} = \frac{Y_g}{E+T} \quad (1)$$

در رابطه بالا  $WP_{ET}$  بهره‌وری آب،  $Y_g$ : مقدار عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)،  $T$ : مقدار تعرق واقعی (مترمکعب) و  $E$ : مقدار تبخیر واقعی (مترمکعب) می‌باشند.

**تشریح مدل AquaCrop:** برای محاسبه عملکرد از زیست‌توده، مدل AquaCrop از رابطه (۲) استفاده می‌کند (Raes et al., 2012):

$$Y = fHI \times HI_0 \times B \quad (2)$$

که در آن  $HI_0$ : سنجه برداشت مرجع (در مرحله بلوغ فیزیولوژیک)؛  $Y$ : عملکرد دانه؛ و  $fHI$ : ضریبی است که سنجه برداشت مرجع را تنظیم می‌کند و به کمبود آب، دمای هوا، زمان و شدت تنش در طول چرخه رشد محصول بستگی دارد. تفکیک عملکرد نهایی محصول به ماده خشک و سنجه برداشت سبب می‌شود تا بتوان به روشنی اثر محیط را روی ماده خشک و سنجه برداشت مشخص کرد. در حقیقت با استفاده از تفکیک اثر محیط روی ماده خشک و سنجه برداشت می‌توان اثرهای

تأثیرهای متفاوتی بر عملکرد گیاهان زراعی خواهد داشت، به‌طوریکه برهمکنش این اثرها ممکن است موجب افزایش یا کاهش محصول شود (Challinor et al., 2007). اثرهای تغییر اقلیم بر کشاورزی در نقاط مختلف جهان توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج گوناگونی به‌دست آمده است. تأثیر تغییر اقلیم بر گندم زمستانه و آفتاب‌گردان در اروپا نشان از کوتاه شدن دوره رشد و افزایش فراوانی تنش دمایی در دوران گلدهی دارد که سبب کاهش تا ۱۵ درصد محصول گندم و تغییرات ۱۰ تا ۴۰ درصدی عملکرد آفتابگردان می‌شود (Mo et al., 2009). در مطالعه دیگر مشاهده شد که زمان به گل رفتن گندم دوروم در ایتالیا تحت تأثیر تغییر اقلیم تا سال ۲۰۲۵ و ۲۰۷۵ به ترتیب ۲ و ۱۵ روز سریع‌تر اتفاق خواهد افتاد و میزان کاهش محصول تا سال‌های بیان شده به ترتیب ۲ تا ۶ درصد و ۱۰ تا ۱۸ درصد خواهد بود (Mereu et al., 2010). با توجه به ضرورت افزایش بهره‌وری مصرف آب در کنار حصول تولید اقتصادی مطلوب، این تحقیق با هدف شبیه‌سازی عملکرد دانه، عملکرد زیستی و بررسی موازنه و بهره‌وری برنج رقم هاشمی با استفاده از مدل AquaCrop و تحت شرایط مدیریت آبیاری و تاریخ کاشت در شهر رشت واقع در استان گیلان، تحت اقلیم گذشته، حال و آینده انجام شد.

## مواد و روش‌ها

**کلیات طرح:** به‌منظور ارزیابی تغییرات عملکرد برنج و موازنه آب در شهر رشت واقع در استان گیلان در اثر تغییر اقلیم از مدل AquaCrop استفاده شد. اعتبارسنجی و واسنجی مدل AquaCrop بنابر نتایج Aalae Bazkiaee et al. (2020) در استان گیلان صورت گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل AquaCrop توانایی بالایی در شبیه‌سازی عملکرد برنج تحت تیمارهای آبیاری و تاریخ کاشت داشته است. به‌منظور ارزیابی تغییرات عملکرد برنج و موازنه آب در کشت برنج از داده‌های

موازنه آب خاک را محاسبه و اجزای موازنه را برای مدت‌زمان مشخص تعیین می‌کند. مقدار رطوبت نیمرخ خاک قبل از کاشت با فاصله‌های هر ۲۰ سانتی‌متر و تا عمق یک متری، به‌عنوان شرایط اولیه وارد مدل شد (Raes *et al.*, 2012). مدل AquaCrop به‌منظور بررسی و شبیه‌سازی موازنه املاح، دو فرایند انتقال توده‌ای و پخشیدگی را در یک بعد به‌کار می‌گیرد که انتقال توده‌ای املاح توسط منافذ بزرگ و فرایند پخشیدگی املاح، توسط منافذ ریز انجام می‌گیرد (Raes *et al.*, 2012). مدل برای بررسی موازنه املاح، نیمرخ خاک را به چند افق و چندین بخش (پیش‌فرض ۱۲ بخش) با ضخامت  $\Delta z$  برابر ۲۰ سانتی‌متر تقسیم می‌کند. به‌منظور شبیه‌سازی پخشیدگی و انتقال توده‌ای املاح در عمق ۳۰ سانتی‌متر (عمق ریشه برنج)، هر بخش (سطر) به چندین سلول تقسیم می‌شود. تعداد سلول‌های هر بخش (n) بین ۲ تا ۱۱ عدد است که تابعی از هدایت آبی اشباع می‌باشد (Raes *et al.*, 2012). در تخمین موازنه املاح، شرایط مرزی بالای مدل، توسط شوری آب آبیاری تعیین می‌شود (شوری آب باران صفر لحاظ می‌شود). مرز پایین نیز در شرایط حضور سطح ایستابی با شوری آب زیرزمینی مشخص می‌شود. شوری عصاره اشباع خاک نیز قبل از کاشت پیش-فرض اولیه مدل در پیش‌بینی شوری خاک است (Raes *et al.*, 2012).

**شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی توسط مدل LARS-WG6:** در این مطالعه از دو سناریوی RCP4.5 (حالت ثبات بدون افزایش گازهای گلخانه‌ای، واداشت تابشی تا ۴/۵ وات بر مترمربع تا سال ۲۱۰۰) به‌عنوان یک سناریوی خوش-بینانه و RCP8.5 (افزایش اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی تا ۸/۵ وات بر مترمربع تا سال ۲۱۰۰) به‌عنوان بدبینانه‌ترین حالت ممکن (IPCC, 2014). استفاده شد. برای اجرای مدل LARS-WG داده‌های ورودی شامل مشخصات ایستگاه مورد مطالعه و داده متغیرهای بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و تشعشع در دوره دیده‌بانی آماده شد. در این پژوهش برای مدل LARS-WG6.0 دوره

نامطلوب تنش آب را روی ماده خشک و سنجه برداشت به خوبی شناسایی کرد. در این مدل ارتباط نرخ رشد ماده خشک با تعرق از طریق معادله (۳) بیان می‌شود (Todorovic *et al.*, 2009):

$$AGB = WP \times Tc/ET_0 \quad (3)$$

که در این رابطه AGB نرخ رشد ماده خشک روی سطح زمین (گرم بر متر مربع)، WP بهره‌وری آب (گرم بر متر مربع)،  $T_c$  تعرق گیاه (میلی‌متر) و  $ET_0$  تبخیر - تعرق مرجع (میلی‌متر) هستند.

در AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی؛ آفت‌ها، بیماری‌ها و علف‌های هرز مدنظر قرار نمی‌گیرند (Steduto *et al.*, 2009). ورودی‌های مدل شامل چهار دسته اطلاعات اقلیمی (حداقل و حداکثر دما، بارش و تبخیر و تعرق مرجع)، گیاه (فنولوژی و تاج‌پوشش گیاه، تعرق گیاه، زیست‌توده و عملکرد قابل‌برداشت و تنش‌ها)، مدیریت (مدیریت آبیاری و حاصلخیزی خاک) و خاک (خصوصیات هیدرولیکی لایه‌های خاک) است (Raes *et al.*, 2009). مدل به منظور تعدیل عملکرد زیست‌توده ناشی از تنش سرما از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه برای محاسبه درجه روز رشد  $GDD^3$  استفاده می‌کند (Raes *et al.*, 2009). در مدل AquaCrop به جای سنجه سطح برگ از روند توسعه تاج‌پوشش گیاهی استفاده می‌شود. برای محاسبه روند توسعه پوشش گیاهی، ابتدا سطح برگ در تیمارهای مختلف اندازه‌گیری می‌شود. براساس سطح برگ، سنجه سطح برگ محاسبه شده و سپس با استفاده از رابطه (۴) روند توسعه پوشش گیاهی محاسبه می‌گردد (Raes *et al.*, 2009):

$$CC = 1 - \exp(-K \times LAI) \quad (4)$$

در این معادله CC تاج‌پوشش گیاهی، K ضریب خاموشی و LAI سنجه سطح برگ (سانتی‌متر مربع بر سانتی‌متر مربع) هستند. رابطه حاکم بر حرکت آب در خاک، معادله موازنه آب است که مدل آن را برای بخشی از نیمرخ خاک که ساختار ریشه در آن واقع شده است، شبیه‌سازی می‌کند. در این فرایند، مدل با استفاده از مقدار آب وارد و خارج شده،

بدین ترتیب مدلی که نتایج آن دارای کمترین اختلاف با داده‌های مشاهداتی و همچنین داده‌های نرمال نسبت به مدل‌های دیگر GCM بود به‌عنوان بهترین مدل برای منطقه اقلیمی موردنظر انتخاب شد. پس از انتخاب بهترین مدل GCM برای هر اقلیم، پیش‌بینی مؤلفه‌های هواشناسی برای دوره ۸۳ ساله آینده، تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 انجام شد. بدین منظور با انتخاب مدل موردنظر، مؤلفه‌های هواشناسی برای دوره ۲۱۰۰ - ۲۰۱۸ برای ایستگاه‌های هم-دیدنی پیش‌بینی شد. سپس مقادیر میانگین بلندمدت سالانه مربوط به دوره‌های زمانی مورد بررسی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب برابر دوره‌های ۱۹۸۸ - ۱۹۶۰، ۲۰۱۷ - ۱۹۸۹، ۲۰۴۵ - ۲۰۱۸، ۲۰۷۳ - ۲۰۴۶ و ۲۱۰۰ - ۲۰۷۴ مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. بدین ترتیب مشخص می‌شود که مقادیر مربوط به هر یک از مؤلفه‌ها چه میزان تغییر را طی دهه‌های آتی نسبت به دوره پایه از خود نشان خواهند داد.

### نتایج و بحث

**ریزنمایی داده‌های شبیه‌سازی دوره‌های آتی:** براساس بررسی صورت گرفته، مدل MIROC5 بهترین پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی را داشته است (نتایج ارائه نشده است). در این پژوهش، ارزیابی داده‌های تولید شده با استفاده از مدل LARS WG6 و داده‌های مشاهده شده موجود در دوره پایه با استفاده از محاسبه ضریب تبیین و سنجه‌های خطاسنجی RMSE و MAE انجام شد (جدول ۱).

۱۹۸۱-۲۰۱۰ میلادی به‌عنوان دوره دیدبانی در نظر گرفته شده و داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های موردنظر در این دوره به مدل داده شد. سپس مدل برای ریزمقیاس آماری پنج مدل‌های مختلف گردش عمومی جو اجرا گردید. این مدل‌ها از لحاظ قدرت تفکیک مکانی، مؤسسه طراح، متغیرهای پیش‌بینی جوی و متغیرهای پیش‌بینی اقیانوسی با یکدیگر تفاوت دارند (IPPC, 2014). پس از اجرای نرم‌افزار برای مدل‌های GCM شامل مدل‌های EC-EARTH، GFDL-CM3، HadGEM2-ES، MIROC5 و MPI-ESM-MR، میانگین‌های ماهانه داده‌های خروجی مدل با داده‌های مشاهداتی برای دوره ۲۰۱۶-۲۰۱۱ مقایسه شد تا مشخص گردد کدام مدل توانایی بهتری در شبیه‌سازی هر یک از مؤلفه‌های هواشناسی دارد. بدین منظور از آماره‌های F-test و T-test، میانگین مجذور مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) برای مقایسه میانگین و آزمون ناپارامتری کولموگروف - اسمیرنوف برای آزمودن نرمال بودن داده‌های خروجی مدل استفاده شد. نحوه محاسبه MAE و RMSE در رابطه (۵) و (۶) نشان داده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (6)$$

که در این روابط:  $P_i$  = مقدار شبیه‌سازی شده اجزای گیاهی مدل،  $O_i$  = مقدار اندازه‌گیری واقعی اجزای گیاهی؛  $n$  = تعداد اندازه‌گیری‌های واقعی انجام‌شده روی اجزای گیاهی است.

جدول ۱- سنجه‌های آماری ارزیابی مدل LARS-WG6  
Table 1. Statistical index of LARS-WG6 model test

متغیر Variable	R2	RMSE	MAE
دمای کمینه Minimum temperature	0.98**	1.02	0.90
دمای بیشینه Maximum temperature	0.98**	1.54	1.31
بارش Rainfall	0.82**	1.09	0.98
تابش Radiation	0.97**	0.79	0.65

\*\*\*: Significant difference at 5% probability level

\*\*\*: تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد.

سناریوی RCP 8.5 افزایش نشان خواهد داد که بیشترین افزایش در این دوره، به میزان ۷/۹۶ درجه سانتی‌گراد برای ماه سپتامبر و تحت سناریوی RCP 8.5 می‌باشد. همچنین دمای بیشینه شبیه‌سازی شده برای هر دو سناریو نسبت به دوره پایه افزایش نشان خواهد داد و بیشترین افزایش در این دوره نیز به میزان ۴/۸۶ درجه سانتی‌گراد، برای ماه آوریل و تحت سناریوی RCP 8.5 مشاهده شد. بیشترین اختلاف تابش نسبت به پایه در این دوره، تحت سناریوی RCP 8.5 و در ماه آگوست است که در آن تابش کاهش یافته است. در شرایط تغییر اقلیم پیش‌بینی شده، میانگین ماهانه بارش در بیشتر ماه‌های سال در دوره آتی نسبت به دوره پایه دچار تغییرات شده است. البته این تغییرها در ماه‌های آتی منظم نیست، به‌طوریکه در ماه‌های آوریل، می، ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر و اکتبر بارش کمتر از دوره پایه و برای ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر مقداری بیشتر از دوره پایه را نشان می‌دهند. (Krishnan *et al.*, 2007) در بررسی اثر افزایش دما در پدیده تغییر اقلیم گزارش نمودند که انتخاب تاریخ کاشت نامناسب می‌تواند با برخورد گیاه با دمای بالاتر از تحمل برنج (دمای ۲۸ تا ۳۴ درجه سانتی‌گراد) سبب عقیم شدن بذرها برنج گردد (Eyni Nargeseh *et al.*, 2016)؛ بنابراین مدیریت‌های زراعی از جمله انتخاب تاریخ کاشتی که بهترین شرایط رشد از جمله دما در طول فصل رشد را فراهم می‌کند، می‌تواند سبب افزایش عملکرد و تولید محصول زراعی شود.

با توجه به نتایج به‌دست آمده، بیشترین و کمترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، در طول دوره پایه در تولید داده توسط مدل، به ترتیب مربوط به بارندگی و دمای بیشینه می‌باشد. همچنین نتایج آزمون t مدل LARS-WG در شبیه‌سازی متغیرهای تابش و دمای کمینه در تمام ماه‌های آوریل و می و برای بارش به جز در ماه سپتامبر و برای دمای پیشینه در ماه نوامبر، بیانگر نبود اختلاف معنی‌دار مقادیر مشاهداتی با مقادیر شبیه‌سازی شده در سطح احتمال پنج درصد است. نتایج حاصل از آزمون t مدل به ترتیب برای متغیرهای دمای کمینه، دمای بیشینه، تابش و بارش در جدول (۲) نشان داده شده است. به‌طور کلی نتایج ارزیابی نشان داد که مدل LARS-WG6 با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی مؤلفه‌های دمای حداقل، دمای حداکثر و تابش بوده، اما در شبیه‌سازی بارش نسبت به دیگر مؤلفه‌ها خطای بیشتر ولی قابل قبول ارائه می‌دهد. شکل‌های (۱) و (۲) نتایج حاصل از اجرای مدل LARS-WG6 برای مؤلفه‌های دمای کمینه (درجه سانتی‌گراد)، دمای بیشینه (درجه سانتی‌گراد) بارش (میلی‌متر) و تابش خورشیدی را در دوره‌های پایه و آینده را نشان می‌دهد.

نتایج مندرج در شکل‌های (۱) و (۲) نشان می‌دهد که مقادیر دمای کمینه شبیه‌سازی شده برای هر دو سناریو نسبت به دوره پایه برای تمام ماه‌ها به‌جز ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می و دسامبر مربوط به سناریوی RCP 4.5 و در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن و دسامبر در

جدول ۲- مقادیر دمای کمینه و بیشینه، تابش و بارش ماهانه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل LARS-WG  
Table 2. Minimum and maximum temperature, radiation and monthly precipitation values of the observed data simulated by LARS-WG model

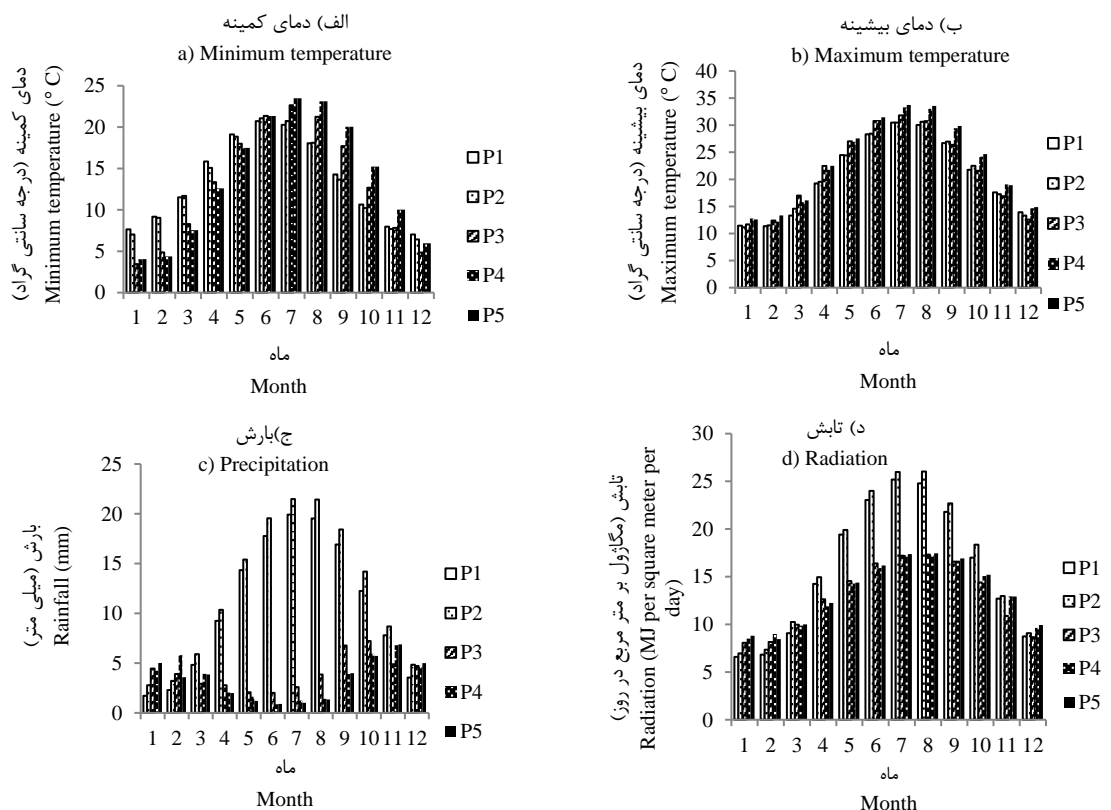
ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
Month	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
مشاهداتی (Observed)	3.26	3.84	6.22	10.51	16.83	20.35	21.88	21.61	19.31	14.15	8.45	4.78
دمای												

ادامه جدول ۲- مقادیر دمای کمینه و بیشینه، تابش و بارش ماهانه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل LARS-WG  
 Table 2. Cont. Minimum and maximum temperature, radiation and monthly precipitation values of the observed data simulated by LARS-WG model

ماه	Month	شبیه‌سازی د	(Simulate d)	ت آزمون	(T-test)	احتمال temperatu re	(Probabili ty)	مشاهداتی دمای	(Observe d)	شبیه‌سازی بیشینه	(Simulate d)	ت آزمون	(T-test)	احتمال temperatu re	(Probabili ty)	مشاهداتی بارش	(Simulate d)	ت آزمون	(T-test)	احتمال Rainfall	(Probabili ty)	مشاهداتی تابش	(Observe d)
دسامبر	December	5.78	0.16	0.72	12.77	13.78	0.14	0.37	3.97	5.77	0.79	0.41	8.37										
نوامبر	November	10.48	0.12	0.04	15.57	19.06	0.04	0.01	7.6	6.75	0.91	0.06	11.58										
اکتبر	October	15.48	0.34	0.02	21.59	23.44	0.21	0.04	9.17	7.53	0.47	0.45	15.38										
سپتامبر	September	19.93	0.84	0.04	27.27	28.35	0.27	0.64	5.26	4.87	0.44	0.92	16.26										
اگوست	August	22.42	0.73	0.47	31.23	32.25	0.85	0.01	0.8	1.85	0.11	0.07	17.02										
جولای	July	22.72	0.23	0.02	30.7	32.42	0.2	0.06	2.26	0.93	0.06	0.02	16.48										
ژوئن	June	20.1	0.38	0.92	29.34	29.06	0.1	0.92	0.63	1.62	0.59	0.73	14.99										
می	May	16.19	0.14	0.03	25.57	25.91	0.28	0.06	0.48	1.98	0.01	0.01	13.03										
آوریل	April	11.86	0.06	0.26	19.73	21.13	0.36	0.86	1.48	2.07	0.04	0.15	10.61										
مارس	March	7.36	0.72	0.03	14.26	15.32	0.91	0.01	3.71	4.6	0.7	0.01	8.99										
فوریه	February	4.11	0.65	0.01	10.73	12.43	0.33	0.09	4.49	3.98	0.97	0.98	7.61										
ژانویه	January	3.76	0.21	0.18	12.68	11.94	0.92	0.54	4.25	3.93	0.75	0.56	8.46										

ادامه جدول ۲- مقادیر دمای کمینه و بیشینه، تابش و بارش ماهانه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل LARS-WG  
 Table 2. Cont. Minimum and maximum temperature, radiation and monthly precipitation values of the observed data simulated by LARS-WG model

دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	اگوست	جولای	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	ماه	Month
9.77	12.3	15.49	16.61	17.05	16.67	15.34	13.94	11.6	9.96	8.21	7.94	شبیه‌سازی	(Simulated)
0.25	0.26	0.74	0.82	0.07	0.29	0.37	0.17	0.15	0.73	0.49	0.51	آزمون t	(T-test)
0.86	0.02	0.85	0.62	0.23	0.58	0.59	0.97	0.42	0.42	0.61	0.49	احتمال	(Probability)



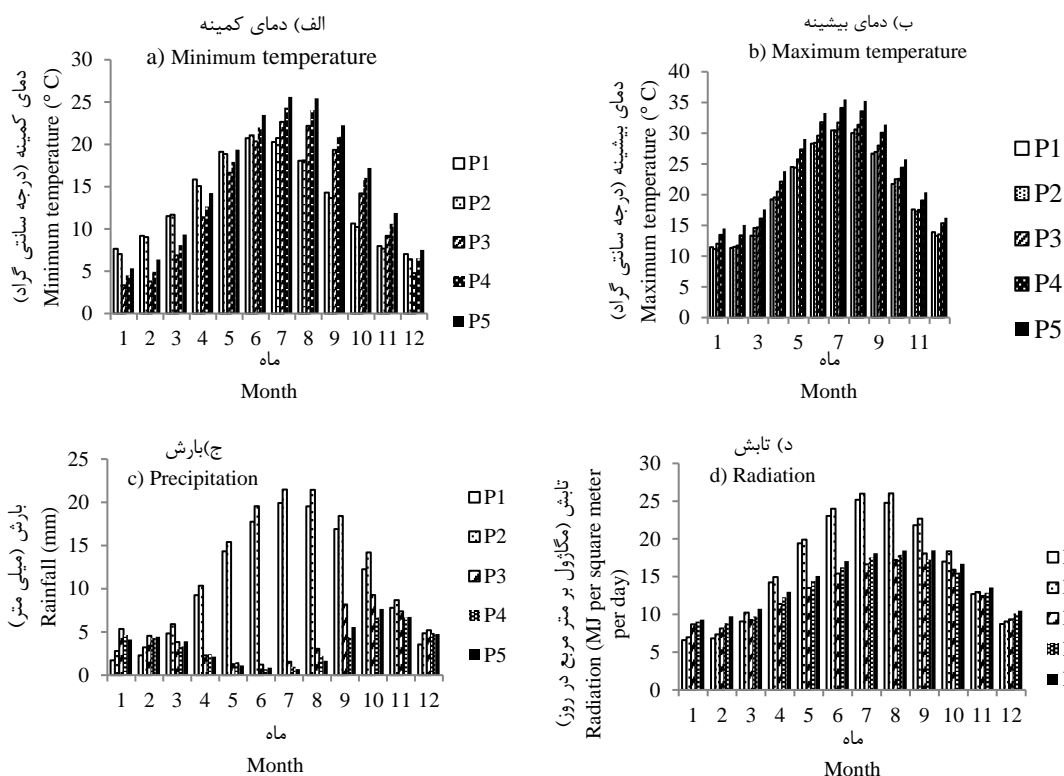
شکل ۱- میانگین ماهانه متغیرهای مختلف در دوره‌های مختلف زمانی مورد بررسی تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 4.5

\*دوره‌های زمانی مورد بررسی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵: به ترتیب برابر دوره‌های ۱۹۸۸-۱۹۶۰، ۲۰۱۷-۱۹۸۹، ۲۰۴۵-۲۰۱۸، ۲۰۷۳-۲۰۴۶ و ۲۱۰۰-۲۰۷۴. ماه‌های میلادی ۱ تا ۱۲: به ترتیب برابر ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای، اگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر، دسامبر

Fig. 1- Monthly average of different variables in different time periods under climate change scenario RCP 4.5

\*Periods of study 1, 2, 3, 4 and 5: equal to the periods 1960-1988, 1989-2017, 2018-2045, 2046-2073 and 2074-2100, respectively. Months 1 to 12: January, February, March, April, May, June, July, August, September, October, November, December, respectively.





شکل ۲- میانگین ماهانه متغیرهای مختلف در دوره‌های مختلف زمانی مورد بررسی تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 8.5

\* دوره‌های زمانی مورد بررسی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵: به ترتیب برابر دوره‌های ۱۹۸۸-۱۹۶۰، ۲۰۱۷-۱۹۸۹، ۲۰۴۵-۲۰۱۸، ۲۰۷۳-۲۰۴۶ و ۲۱۰۰-۲۰۷۴ ماه‌های میلادی ۱ تا ۱۲: به ترتیب برابر ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن، جولای، اگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر، دسامبر.

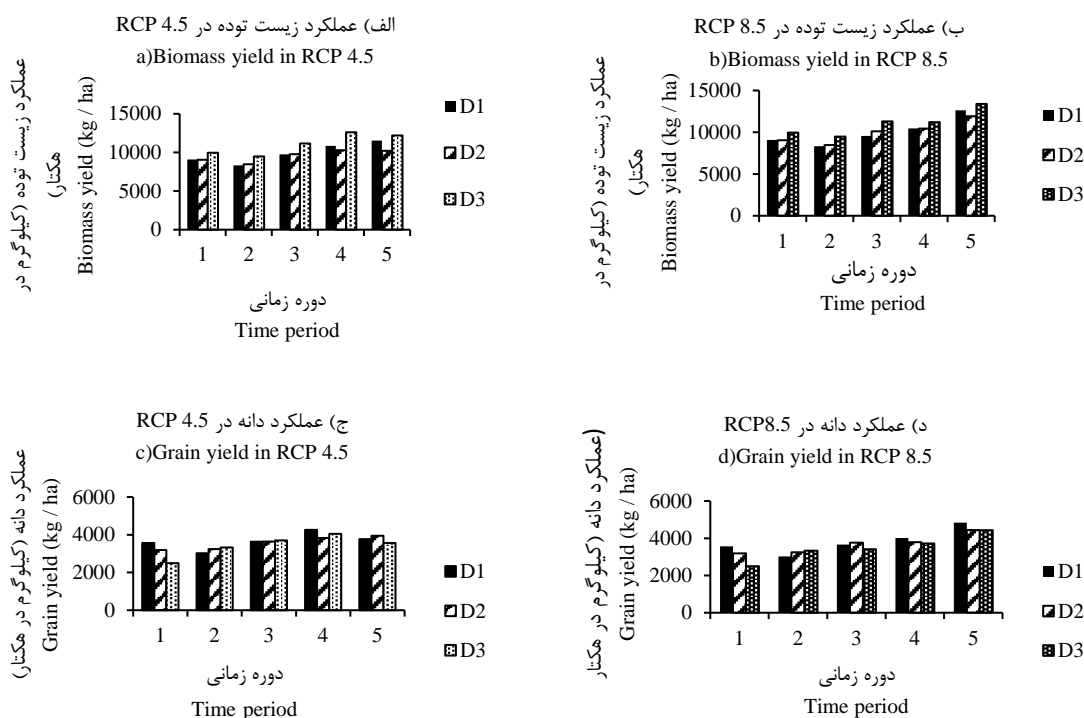
Fig. 2- Monthly average of different variables in different time periods under climate change scenario RCP 8.5

\*Periods of study 1, 2, 3, 4 and 5: equal to the periods 1960-1988, 1989-2017, 2018-2045, 2046-2073 and 2074-2100, respectively.

Months 1 to 12: January, February, March, April, May, June, July, August, September, October, November, December, respectively.

مقادیر زیست‌توده و عملکرد دانه برنج در دوره ۲۱۰۰ - ۲۰۷۴ تحت سناریوی RCP 8.5 و برای تیمار تاریخ کاشت یک اردیبهشت (به ترتیب ۱۳۳۸۳ و ۴۸۳۵ کیلوگرم بر هکتار)، بیشترین اختلاف را با شرایط کنونی (به ترتیب ۹۴۷۲ و ۳۰۲۲ کیلوگرم بر هکتار) نشان داد (شکل ۳)؛ به‌طوریکه میزان افزایش زیست‌توده و عملکرد دانه در این دوره به ترتیب حدود ۴۱ و ۶۰ درصد خواهد بود. (Droogers and Aerts (2005) افزایش عملکرد برنج در شرایط تغییر اقلیم را تحت کاربرد مدل SWAP و سناریوی تغییر اقلیم HadCM3 گزارش نمودند. مقادیر شبیه‌سازی شده زیست‌توده و عملکرد دانه تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 برای تیمارهای آبیاری ۸۵، ۷۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی نسبت به تأمین کامل آب موردنیاز در اقلیم رشت کاهش نشان داد (شکل ۴).

شبیه‌سازی رشد برنج در دوره‌های آبی مقدار زیست‌توده و عملکرد دانه شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop برای دوره‌های ۲۰۴۵ - ۲۰۱۸، ۲۰۷۳ - ۲۰۴۶ و ۲۱۰۰ - ۲۰۷۴ تحت سناریوهای RCP 8.5 و تیمارهای تاریخ کاشت و آبیاری در شکل‌های (۳) و (۴) آورده شده است. اطلاعات مندرج در شکل (۳) نشان می‌دهد که کمترین مقدار عملکرد دانه و زیست‌توده (۳۶۳۲ و ۹۷۴۱ کیلوگرم بر هکتار) دوره ۲۰۴۵-۲۰۱۸ تحت سناریوی RCP 4.5 و برای تیمار تاریخ کاشت یک اردیبهشت، اتفاق افتاد، با این حال مقادیر عملکرد دانه و زیست‌توده بیشتری نسبت به دوره‌های پایه ۱۹۸۸ - ۱۹۶۰ و ۲۰۱۷ - ۱۹۸۹ داشتند؛ به‌طوریکه میزان افزایش زیست‌توده و عملکرد دانه در این دوره به ترتیب حدود ۱۷ و ۲۰ درصد خواهد بود.

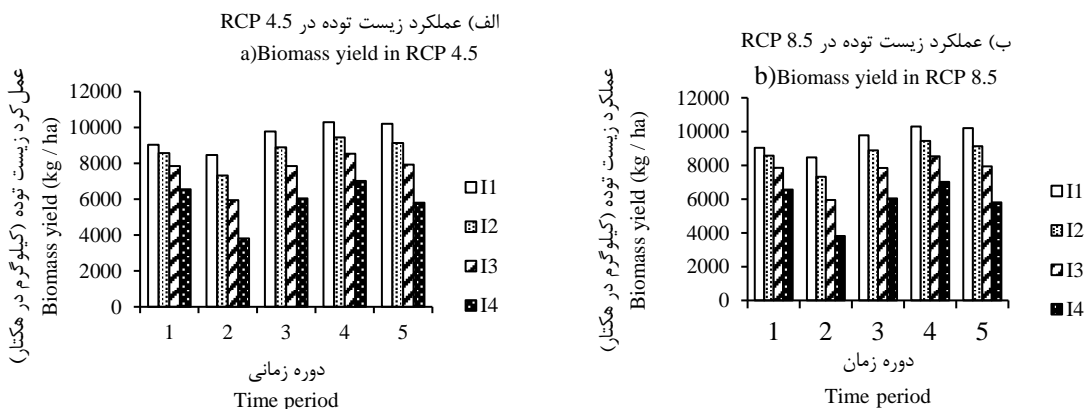


شکل ۳- میانگین عملکرد دانه و زیست توده برنج در تیمارهای تاریخ کاشت در دوره‌های مختلف زمانی مورد بررسی تحت سناریوهای تغییر اقلیم RCP 8.5 و RCP 4.5

\*دوره‌های زمانی مورد بررسی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵: به ترتیب برابر دوره‌های ۱۹۸۸-۱۹۶۰، ۲۰۱۷-۱۹۸۹، ۲۰۴۵-۲۰۱۸، ۲۰۷۳-۲۰۴۶ و ۲۱۰۰-۲۰۷۴. تیمارهای D1، D2 و D3: به ترتیب برابر تاریخ کاشت یکم اردیبهشت، ۲۰ اردیبهشت و ۱۰ خرداد

Fig. 3- Average of grain and biomass yield of rice planting date treatments in different time periods studied under climate change scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5

\*Periods of study 1, 2, 3, 4 and 5: equal to the periods 1960-1988, 1989-2017, 2018-2045, 2046-2073 and 2074-2100, respectively. Treatments D1, D2 and D3: April 21st, May 11st and May 31st, respectively.

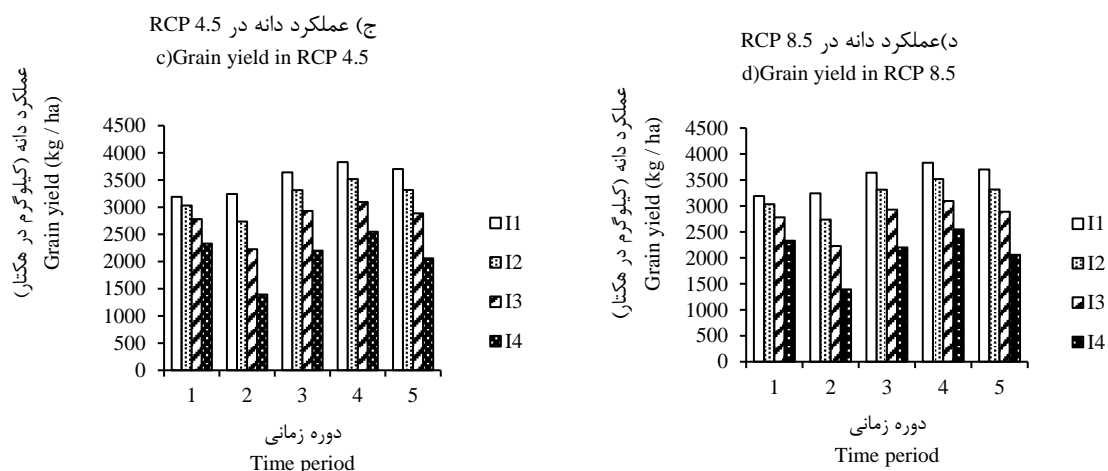


شکل ۴- میانگین عملکرد دانه و زیست توده برنج در تیمارهای آبیاری در دوره‌های مختلف زمانی مورد بررسی تحت سناریوهای تغییر اقلیم RCP 8.5 و RCP 4.5

\*دوره‌های زمانی مورد بررسی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵: به ترتیب برابر دوره‌های ۱۹۸۸-۱۹۶۰، ۲۰۱۷-۱۹۸۹، ۲۰۴۵-۲۰۱۸، ۲۰۷۳-۲۰۴۶ و ۲۱۰۰-۲۰۷۴. تیمارهای I1، I2، I3 و I4: به ترتیب برابر ۱۰۰، ۸۵، ۷۰ و ۵۵ درصد نیاز آبی

Fig. 4- Average of grain and biomass yield of irrigation treatments in different time periods studied under climate change scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5.

\*Periods of study 1, 2, 3, 4 and 5: equal to the periods 1960-1988, 1989-2017, 2018-2045, 2046-2073 and 2074-2100, respectively. Treatments I1, I2, I3 and I4: 100, 85, 70 and 55% of water requirement, respectively.



ادامه شکل ۴- میانگین عملکرد دانه و زیست‌توده برنج در تیمارهای آبیاری در دوره‌های مختلف زمانی مورد بررسی تحت سناریوهای تغییر اقلیم RCP 8.5 و RCP 4.5

\*دوره‌های زمانی مورد بررسی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵: به ترتیب برابر دوره‌های ۱۹۸۸-۱۹۶۰، ۲۰۱۷-۱۹۸۹، ۲۰۴۵-۲۰۱۸، ۲۰۷۳-۲۰۴۶ و ۲۱۰۰-۲۰۷۴. تیمارهای I1، I2، I3 و I4: به ترتیب برابر ۱۰۰، ۸۵، ۷۰ و ۵۵ درصد نیاز آبی

Fig. 4 Cont.- Average of grain and biomass yield of irrigation treatments in different time periods studied under climate change scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5.

•Periods of study 1, 2, 3, 4 and 5: equal to the periods 1960-1988, 1989-2017, 2018-2045, 2046-2073 and 2074-2100, respectively.

Treatments I1, I2, I3 and I4: 100, 85, 70 and 55% of water requirement, respectively.

کمینه و بیشینه در طول دوره رشد گیاه برنج در دوره ۲۱۰۰ - ۲۰۷۴ تحت سناریوهای RCP 4.5 (به ترتیب برابر ۱۴/۱۶ و ۲۳/۲۶ درجه سانتی‌گراد) و در RCP 8.5 (به ترتیب ۱۵/۶۷ و ۲۴/۸۲ درجه سانتی‌گراد) برآورد شد. بنابراین تمهیدات مناسبی جهت بیشترین بهره‌برداری از عامل‌های محیطی باید در نظر گرفته شود. بنابر نتایج مشاهده می‌شود تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 با تغییر تاریخ کاشت از ۲۰ اردیبهشت به ۱۰ خرداد، مقدار دمای میانگین، برای تمام دوره‌های شبیه‌سازی بین ۶ تا ۷ درصد افزایش و میزان بارندگی ۱۹ درصد (در سناریو RCP 4.5) و ۱۷ درصد (در سناریو RCP 8.5) افزایش نشان خواهد داد که هر دو عامل (افزایش دما و بارش در انتهای فصل رشد) اثر مثبتی روی عملکرد زیست‌توده محصول خواهند داشت. نتایج مربوط به شبیه‌سازی زیست‌توده و عملکرد دانه تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 برای تاریخ‌های کشت یکم اردیبهشت، ۲۰ اردیبهشت و ۱۰ خرداد، در دوره‌های زمانی ۲۰۴۵ - ۲۰۱۸، ۲۰۷۳ - ۲۰۴۶ و ۲۱۰۰ - ۲۰۷۴ در شکل (۳) نشان داده شده است. با

## ارزیابی تغییر تاریخ کاشت و آبیاری به‌عنوان راهکار

### سازگاری برای بهبود عملکرد محصول برنج

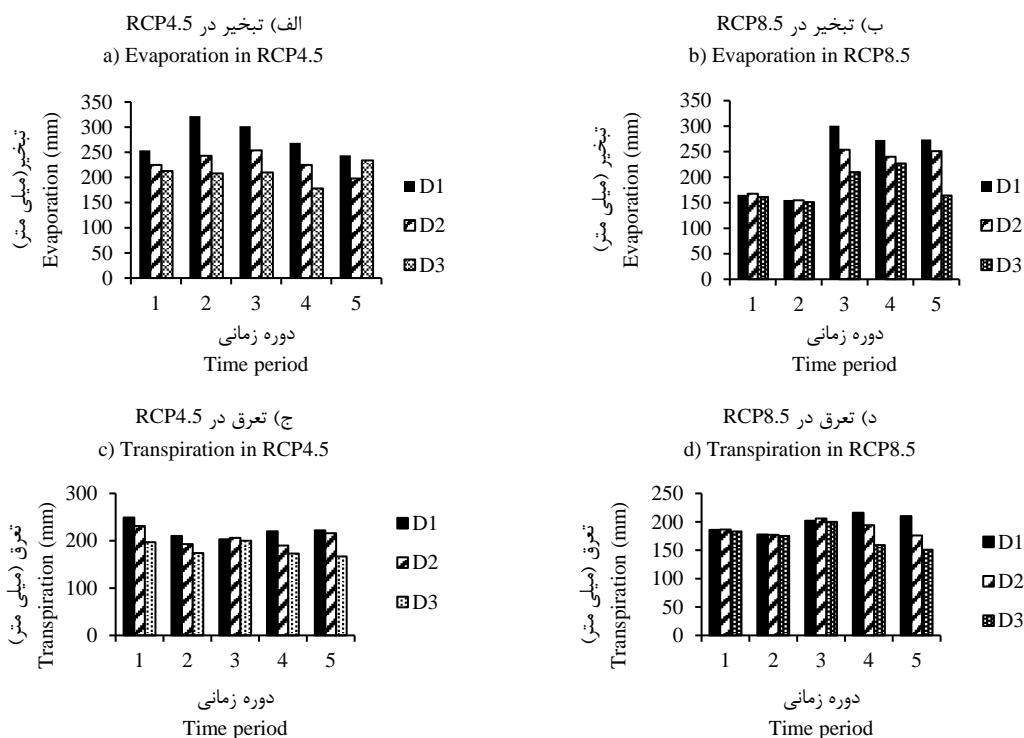
انتخاب تاریخ کاشت مناسب در دوره‌های ۲۰۴۵ - ۲۰۱۸، ۲۰۷۳ - ۲۰۴۶ و ۲۱۰۰ - ۲۰۷۴ موجب بهره‌گیری بهینه از عامل‌های اقلیمی نظیر درجه حرارت، رطوبت و طول روز می‌شود. بررسی روند تغییرات دمای فصلی طی دوره‌های پیش‌بینی شده در شهر رشت نشان داد که تحت هر دو سناریو تغییر اقلیم دمای کمینه و بیشینه فصل‌های بهار تابستان نسبت به دوره ابتدایی (۱۹۸۸ - ۱۹۶۰) به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است که این افزایش دما در سناریو RCP 8.5 شدیدتر بوده است. مقدار دمای کمینه و بیشینه در طول فصل رشد در دوره کنونی به ترتیب برابر ۱۳/۲۹ و ۲۹/۸۹ درجه سانتی‌گراد برآورد شد؛ در حالیکه مقدار دمای کمینه و بیشینه در همچنین بررسی مجموع بارش سالانه در دوره کنونی (۱۵۸ میلی‌متر در سال) نشان داد که تحت پدیده تغییر اقلیم میزان بارش سالانه شهر رشت کمابیش به میان یک‌سوم در سناریوهای RCP 4.5 (۴۴ میلی‌متر) و RCP 8.5 (۴۷ میلی‌متر) تقلیل می‌یابد. دمای

عملکرد دانه شبیه‌سازی شده در شرایط تغییر اقلیم آینده تحت سطوح آبیاری مختلف در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی - سناریوهای تغییر اقلیم RCP 4.5 و RCP 8.5 به میزان ۲۰ درصد بود. بررسی روند کلی تغییرات عملکرد دانه و زیست‌توده تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم پیش‌بینی شده در آینده نشان داد که همواره بیشترین عملکرد در تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی به‌دست خواهد آمد (شکل ۴).

بررسی تغییرات تبخیر و تعرق تحت شرایط اقلیمی پیش‌بینی شده در دو سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5 نشان داد که در سناریوی RCP 8.5 مقدار تبخیر و تعرق در شرایط آینده نسبت به دوره‌های پایه افزایش خواهد یافت؛ در حالیکه تحت سناریوی RCP 4.5 مقدار تبخیر و تعرق در آینده تغییر چندانی نخواهد کرد (شکل ۵). نتایج نشان داد بیشترین مقدار تبخیر و تعرق در تیمار تاریخ کاشت یکم اردیبهشت - سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5 مشاهده خواهد شد (شکل ۵). بیشترین افزایش تبخیر مشاهده شده نسبت به دوره پایه در دوره ۲۰۱۸-۲۰۴۵ در تیمار تاریخ کاشت یکم اردیبهشت - سناریوی RCP 8.5 و به میزان ۹۴ درصد مشاهده شد و بیشترین افزایش مقدار تعرق در تیمار تاریخ کاشت یکم اردیبهشت - سناریوی RCP 8.5 در دوره ۲۰۷۳-۲۰۴۶ به میزان ۲۲ درصد به‌دست خواهد آمد (شکل ۵). Chung *et al.* (2010) در بررسی و شبیه‌سازی تبخیر-تعرق و عملکرد برنج تحت تأثیر تغییر اقلیم با مدل AquaCrop مشاهده نمودند که میزان تخیر - تعرق بعد از نشاکاری به میزان ۴ درصد (در سال ۲۰۲۰)، ۸ درصد (سال ۲۰۵۰) و ۱۴ درصد (در سال ۲۰۸۰) افزایش خواهد یافت. همچنین در این مطالعه مشاهده شد که پتانسیل تولید در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ به ترتیب ۲۳، ۵۵ و ۹۸ درصد افزایش و بهره‌وری آب در تولید برنج نیز در همین سال‌ها به ترتیب به میزان ۱۹، ۴۴ و ۷۵ درصد افزایش خواهد یافت.

توجه به نتایج، بیشترین افزایش زیست‌توده شبیه‌سازی شده در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به سال پایه به میزان ۳۴ درصد و مربوط به تاریخ کشت ۱۰ خرداد، تحت سناریوی RCP 8.5 در دوره ۲۱۰۰ - ۲۰۷۴ و برابر ۳۳ درصد و مربوط به تاریخ کشت ۱۰ خرداد، تحت سناریوی RCP 4.5 برای دوره ۲۰۷۳ - ۲۰۴۶ بود. بررسی کلی عملکرد دانه و زیست‌توده برنج نشان داد که روند عملکرد تحت هر دو سناریوی تغییر اقلیم افزایشی بوده و در دوره ۲۱۰۰ - ۲۰۷۴ به بیشترین مقدار خود خواهد رسید (شکل ۳). همچنین بیشترین افزایش عملکرد دانه شبیه‌سازی شده در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به دوره‌های پایه در تیمار یکم اردیبهشت به ترتیب برابر ۶۰ درصد تحت سناریوی RCP 8.5 در دوره ۲۰۹۹ - ۲۰۷۴ و ۴۴ درصد تحت سناریوی RCP 4.5 در دوره ۲۰۷۳ - ۲۰۴۶ شبیه‌سازی شد (شکل ۳). Raoufi and Soufizadeh (2020) با استفاده از مدل AquaCrop به بررسی و شبیه‌سازی فشار تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد برنج تحت سناریوهای تغییر اقلیم (2.6, 4.5, 8.5) پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش دی‌اکسید کربن و دما اثر مثبتی روی عملکرد برنج داشته است. در این مطالعه، سناریوی تغییر اقلیم RCP 8.5 با یک درجه سانتی‌گراد افزایش دما سبب دستیابی به بیشترین میزان عملکرد دانه و زیست‌توده برنج گردید.

نتایج مربوط به شبیه‌سازی زیست‌توده و عملکرد دانه تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 برای تیمارهای آبیاری، در دوره‌های زمانی ۲۰۴۵ - ۲۰۱۸، ۲۰۷۳ - ۲۰۴۶ و ۲۱۰۰ - ۲۰۷۴ در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به نتایج، بیشترین افزایش زیست‌توده شبیه‌سازی شده در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به دوره پایه در تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی - سناریوی RCP 4.5 در دوره ۲۰۷۳ - ۲۰۴۶ معادل ۲۰ درصد و در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی - سناریوی RCP 8.5 و معادل ۲۲ درصد بود. همچنین بیشترین افزایش



شکل ۵- میانگین متغیرهای تبخیر و تعرق در تیمارهای تاریخ کاشت در دوره‌های مختلف زمانی مورد بررسی تحت سناریوهای تغییر اقلیم RCP 4.5 و RCP 8.5

\* دوره‌های زمانی مورد بررسی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵: به ترتیب برابر دوره‌های ۱۹۸۸-۱۹۶۰، ۲۰۱۷-۱۹۸۹، ۲۰۴۵-۲۰۱۸، ۲۰۷۳-۲۰۴۶ و ۲۱۰۰-۲۰۷۴. تیمارهای D1، D2 و D3: به ترتیب برابر تاریخ کاشت یکم اردیبهشت، ۲۰ اردیبهشت و ۱۰ خرداد

Fig. 5- Average of evaporation and transpiration of rice planting date treatments in different time periods studied under climate change scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5.

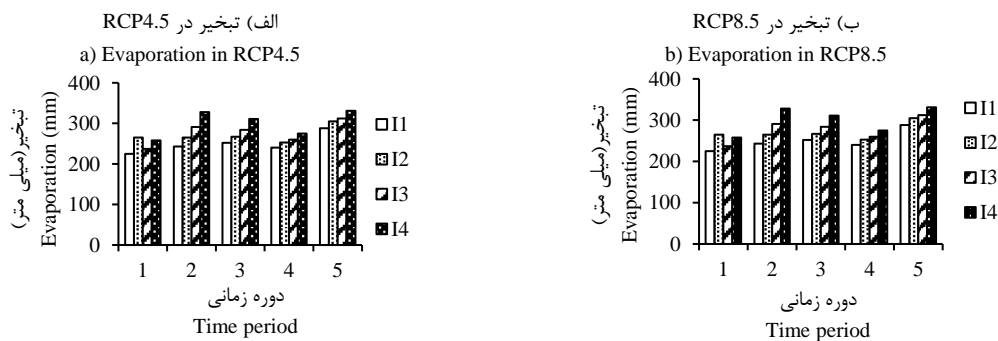
\*Periods of study 1, 2, 3, 4 and 5: equal to the periods 1960-1988, 1989-2017, 2018-2045, 2046-2073 and 2074-2100, respectively. Treatments D1, D2 and D3: April 21st, May 11st and May 31st, respectively.

بر اساس نیاز آبی پیش‌بینی شده توسط مدل AquaCrop، تاریخ کاشت ۱۰ خرداد- سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5 بیشترین بهره‌وری مصرف آب را داشته است (شکل ۷). بیشترین افزایش بهره‌وری مصرف آب نسبت به دوره پایه در تاریخ کاشت ۱۰ خرداد- سناریوی RCP 4.5 در دوره ۲۰۴۶-۲۰۷۳ (۸۸ درصد) و در تاریخ کاشت ۱۰ خرداد- سناریوی RCP 8.5 (۹۴ درصد) در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۴ به دست آمد (شکل ۷). Kang et al. (2009) در مطالعه خود به بررسی اثرهای تغییر اقلیم روی امنیت غذایی و بهره‌وری آب در تولید محصول‌های زراعی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که عملکرد محصول‌های زراعی تحت تأثیر تأمین آب کافی در نظام کشاورزی فشرده افزایش خواهد یافت؛ اما این نوع مدیریت می‌تواند سبب سرعت

همچنین در سطح‌های آبیاری مختلف بیشترین مقدار تعرق در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و بیشترین مقدار تبخیر در تیمار تأمین ۵۵ درصد نیاز آبی به دست آمد (شکل ۶). بررسی مقدار بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر تبخیر و تعرق در تولید دانه برنج نشان داد که تیمار تاریخ کاشت ۱۰ خرداد - سناریوی RCP 4.5 و RCP 8.5 بیشترین بهره‌وری را داشته است (شکل ۷). بررسی بهره‌وری مصرف آب تیمارهای مختلف آبیاری و تاریخ کاشت می‌تواند در انتخاب مناسب‌ترین تیمار در شرایط تغییر اقلیم آینده مؤثر واقع شود. بنابر نتایج مشاهده شده در تاریخ‌های کاشت مختلف در اقلیم آینده، تاریخ کاشت یکم اردیبهشت عملکرد به نسبت بیشتری نسبت به سایر تاریخ‌های کاشت دارد (شکل ۷). این در حالی است که

درصد نیاز آبی با عدم تأمین مطلوب نیاز آبی گیاه سبب وارد شدن خسارت به گیاه و کاهش عملکرد خواهند شد (شکل ۷). بررسی‌ها نشان داد با توجه به این که در طول فصل رشد میزان تبخیر - تعرق متغیر است، انتخاب تاریخ کاشت مناسب می‌تواند در افزایش بهره‌وری تولید مبتنی بر تبخیر - تعرق مؤثر باشد (Luo *et al.*, 2003)؛ این در حالی است که بهره‌وری آب مبتنی بر آبیاری با توجه به تحت کنترل بودن میزان آبیاری، در شرایط تغییر اقلیم تغییر چندانی نخواهد نمود (Luo *et al.*, 2003).

بخشیدن به تخریب محیط زیست گردد. بررسی بهره‌وری مصرف آب مبتنی بر تبخیر و تعرق در تیمارهای مختلف آبیاری نشان داد که تیمار تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی در دوره‌های مختلف بررسی شده بیشترین عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب را داشته است. بنابر نتایج، تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی با وجود این که بیشترین مقدار تعرق را در بین سطح‌های آبیاری داشته است؛ اما داشتن عملکرد دانه بیشتر سبب گردید تا بهره‌وری بیشتری نسبت به سایر سطح‌های آبیاری داشته باشد و تیمارهای ۵۵، ۷۰ و ۸۵

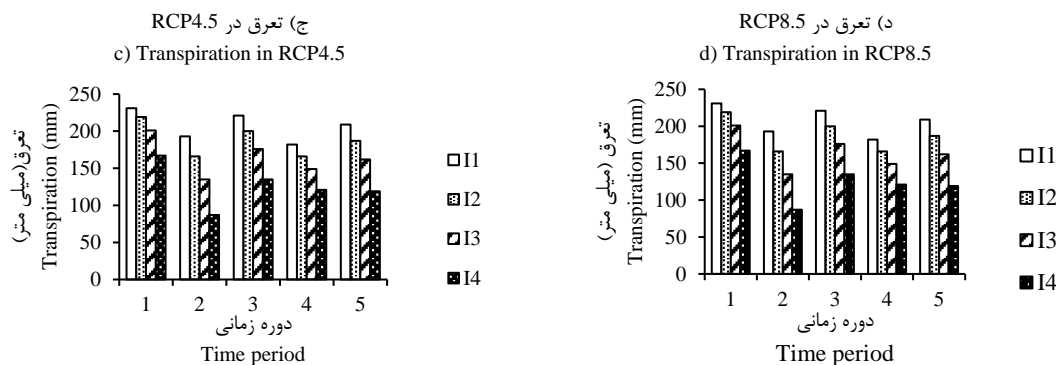


شکل ۶- میانگین متغیرهای تبخیر و تعرق در تیمارهای آبیاری در دوره‌های مختلف زمانی مورد بررسی تحت سناریوهای تغییر اقلیم RCP 4.5 و RCP 8.5

\*دوره‌های زمانی مورد بررسی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵: به ترتیب برابر دوره‌های ۱۹۸۸-۱۹۶۰، ۲۰۱۷-۱۹۸۹، ۲۰۴۵-۲۰۱۸، ۲۰۷۳-۲۰۴۶ و ۲۱۰۰-۲۰۷۴. تیمارهای I1، I2، I3 و I4: به ترتیب برابر ۱۰۰، ۸۵، ۷۰ و ۵۵ درصد نیاز آبی

Fig. 6- Average of evaporation and transpiration of irrigation treatments in different time periods studied under climate change scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5.

\*Periods of study 1, 2, 3, 4 and 5: equal to the periods 1960-1988, 1989-2017, 2018-2045, 2046-2073 and 2074-2100, respectively. Treatments I1, I2, I3 and I4: 100, 85, 70 and 55% of water requirement, respectively.

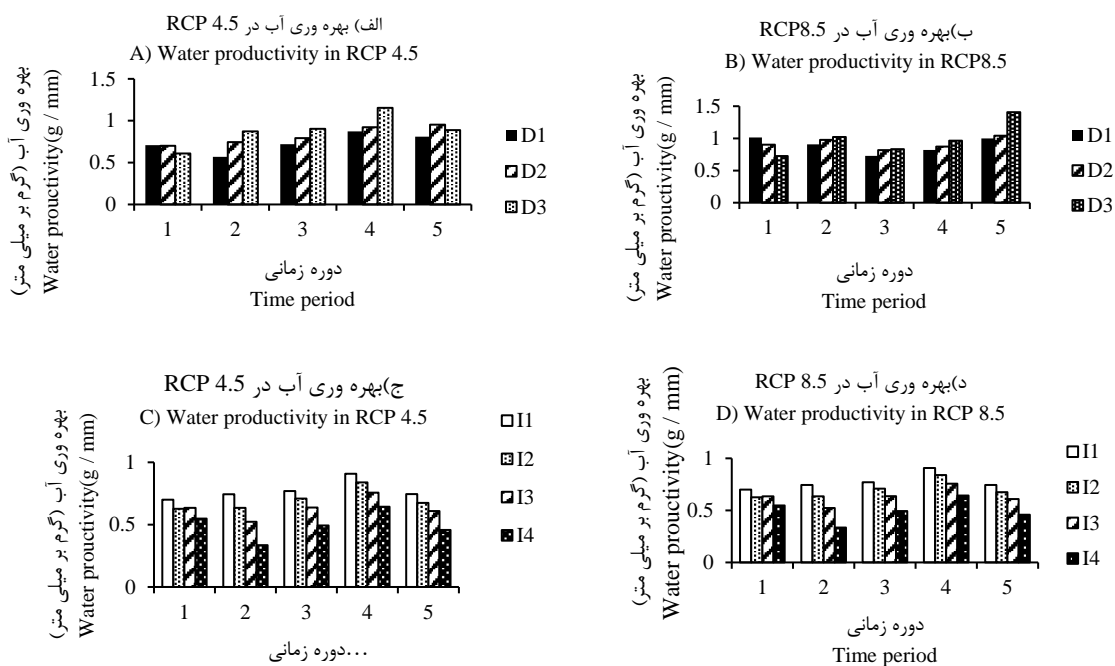


ادامه شکل ۶- میانگین متغیرهای تبخیر و تعرق در تیمارهای آبیاری در دوره‌های مختلف زمانی مورد بررسی تحت سناریوهای تغییر اقلیم RCP 4.5 و RCP 8.5

\*دوره‌های زمانی مورد بررسی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵: به ترتیب برابر دوره‌های ۱۹۸۸-۱۹۶۰، ۲۰۱۷-۱۹۸۹، ۲۰۴۵-۲۰۱۸، ۲۰۷۳-۲۰۴۶ و ۲۱۰۰-۲۰۷۴. تیمارهای I1، I2، I3 و I4: به ترتیب برابر ۱۰۰، ۸۵، ۷۰ و ۵۵ درصد نیاز آبی

Fig. 6- Cont. Average of evaporation and transpiration of irrigation treatments in different time periods studied under climate change scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5.

\*Periods of study 1, 2, 3, 4 and 5: equal to the periods 1960-1988, 1989-2017, 2018-2045, 2046-2073 and 2074-2100, respectively. Treatments I1, I2, I3 and I4: 100, 85, 70 and 55% of water requirement, respectively.



شکل ۷- میانگین بهره‌وری مبتنی تبخیر و تعرق در تیمارهای تاریخ کاشت و آبیاری در دوره‌های مختلف زمانی مورد بررسی تحت سناریوی تغییر اقلیم RCP 8.5 و RCP 4.5

\*دوره‌های زمانی مورد بررسی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵: به ترتیب برابر دوره‌های ۱۹۸۸-۱۹۶۰، ۲۰۱۷-۱۹۸۹، ۲۰۴۵-۲۰۱۸، ۲۰۷۳-۲۰۴۶ و ۲۱۰۰-۲۰۷۴. تیمارهای D1، D2 و D3: به ترتیب برابر تاریخ کاشت یکم اردیبهشت، ۲۰ اردیبهشت و ۱۰ خرداد. تیمارهای I1، I2، I3 و I4: به ترتیب برابر ۷۰، ۸۵، ۱۰۰ و ۵۵ درصد نیاز آبی

Fig. 7- Average of water productivity based on evaporation and transpiration of irrigation and planting date treatments in different time periods studied under climate change scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5

\*Periods of study 1, 2, 3, 4 and 5: equal to the periods 1960-1988, 1989-2017, 2018-2045, 2046-2073 and 2074-2100, respectively.

Treatments I1, I2, I3 and I4: 100, 85, 70 and 55% of water requirement, respectively. Treatments D1, D2 and D3: April 21st, May 11st and May 31th, respectively.

### نتیجه‌گیری

کمیته و بیشینه فصل رشد و کاهش میزان بارش سالانه تحت سناریوهای تغییر اقلیم RCP 4.5 و RCP 8.5 نسبت به دوره کنونی بوده است. پدیده تغییر اقلیم می‌تواند مشکل‌هایی از جمله هجوم آفت‌ها را در پی داشته باشد. در سال‌های اخیر در استان گیلان، مدیریت آفت‌ها همیشه به روش‌های درست انجام شده است تا از آسیب زدن به گیاه خودداری شود. بررسی‌ها در استان گیلان نشان داده است که تولید برنج را به شدت تهدید می‌کند تنش آبی است. نتایج این مطالعه نشان داد که با تغییر تاریخ کاشت می‌توان از شدت تنش آبی جلوگیری کرد. با توجه به نتایج به‌دست آمده، با در نظر گرفتن بهره‌وری مصرف آب و میزان عملکرد، با توجه به مشکل‌هایی که در آینده از جمله کمبود آب وجود خواهد داشت، به نظر می‌رسد کشت دیر هنگام برنج در

نتایج این مطالعه نشان داد که پدیده تغییر اقلیم امری اجتناب‌ناپذیر در شهر بوده و بررسی مدیریت‌های زراعی می‌تواند نقش مؤثری در حفظ و افزایش میزان عملکرد برنج داشته باشد. در این پژوهش اثرهای احتمالی تغییر اقلیم بر عملکرد دانه و زیست‌توده برنج در دوره‌های ۲۰۱۸-۲۰۴۵، ۲۰۴۶-۲۰۷۳ و ۲۱۰۰-۲۰۷۴ تحت سناریوهای تغییر اقلیم RCP 4.5 و RCP 8.5 مورد بررسی قرار گرفت و اثر تغییر تاریخ کاشت و دور آبیاری به‌عنوان یک سازگاری برای بهبود عملکرد دانه برنج و بهره‌وری مصرف آب در تولید محصول برنج مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل LARS-WG6 با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی مؤلفه‌های اقلیمی دما، بارش و تابش می‌باشد. مهمترین نتایج به‌دست آمده افزایش دمای

مانند کشت هوازی برنج با استفاده از رقم‌های خاصی از برنج به نام «برنج‌های هوازی» را مدنظر قرار داد تا در شرایط کمبود آب عملکرد مناسبی تولید نمایند.

### پی‌نوشت‌ها

<sup>1</sup> FAO: Food and Agriculture Organization

<sup>2</sup> Root Mean Square Error

<sup>3</sup> Growing Degree Days

Aalaee Bazkiaee, P., Kamkar, B., Amiri, E., Kazemi, H., Rezaei, M. and Akbarzadeh, S., 2020. Simulation of growth and yield and evaluation of rice production productivity under irrigation management and planting date using Aquacrop model. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*. 9, 17-34. (In Persian with English abstract).

Agricultural Statistics., 2020. Volume I: Crop products., 2018-19. Office of Statistics and Information Technology, Deputy Director of Planning and Economic Affairs. Ministry of Agricultural Jihad Report. Iran.

Challinor, A., Wheeler, T.R., Craufurd, P.Q., Ferro, C.A.T. and Stephenson, D.B., 2007. Adaptation of crops to climate change through genotypic responses to mean and extreme temperatures. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 119, 190-204.

Chung, S.O., 2010. Simulating evapotranspiration and yield responses of rice to climate change using FAO-AquaCrop. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 52, 57-64.

Droogers, P. and Aerts, J., 2005. Adaptation strategies to climate change and climate variability: a comparative study between seven contrasting river basins. *Physics and Chemistry of the Earth*. 30, 339-346.

شرایط کمبود آب راهکار مناسبی باشد، اما در شرایطی که در محیط، کمبود آب وجود نداشته باشد، کشت زود هنگام برنج مانند یکم اردیبهشت می‌تواند سبب افزایش تولید شود. بررسی سطح‌های آبیاری نشان داد که تولید دانه مؤثرترین عامل در افزایش بهره‌وری مصرف آب است و استفاده از سطح‌های کم آبیاری نقش مؤثری در افزایش بهره‌وری آب نخواهد داشت. با توجه به نتایج به-دست آمده در شرایط کمبود آب می‌توان راهکارهایی

### منابع

Eyni Nargeseh, H., Deihimfard, R., Soufizadeh, S., Haghghat, M. and Nouri, O., 2016. Predicting the impacts of climate change on irrigated wheat yield in Fars province using APSIM model. *Electronic Journal of Crop Production*. 8, 203-224. (In Persian with English abstract).

FAO, 2019. Agriculture organization of the United Nations. Available Online at: <http://faostat.fao.org/site/573/default.aspx#ancor>.

IPPC, CC., 2007. A report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Summary for Policymakers. International Plant Protection Convention report. Cambridge, United Kingdom, and Cambridge University Press.

IPPC, I., 2014. Climate Change 2014 Synthesis Report. Fifth Assessment Report. International Plant Protection Convention report. Cambridge, United Kingdom, and Cambridge University Press.

Jin, X., Li, Z., Nie, C., Xu, X., Feng, H., Guo, W. and Wang, J., 2018. Parameter sensitivity analysis of the AquaCrop model based on extended fourier amplitude sensitivity under different agro-meteorological conditions and application. *Field Crops Research*. 226, 1-15.

Kang, Y., Khan, S. and Ma, X., 2009. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security—A review. *Progress*



- in *Natural Science*. 19, 1665-1674.
- Krishnan, P., Swain, D.K., Bhaskar, B.C., Nayak, S.K. and Dash, R.N., 2007. Impact of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 122, 233-242.
- Luo, Y., Jiang, Y., Peng, S., Cui, Y., Khan, S., Li, Y. and Wang, W., 2015. Hindcasting the effects of climate change on rice yields, irrigation requirements, and water productivity. *Paddy and Water Environment*. 13, 81-89.
- Mereu, V., Cesaraccio, C., Dubrovsky, M., Spano, D., Carboni, G. and Duce, P., 2010. Climate change impacts on durum wheat in Sardinia. In *Proceedings 29<sup>th</sup> Conference on Agricultural and Forest Meteorology*, 1-6 August, Crestone Peak, U.S. p. 587.
- Mo, X., Liu, S., Lin, Z. and Guo, R., 2009. Regional crop yield, water consumption and water use efficiency and their responses to climate change in the North China Plain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 134, 67-78.
- Nyakudya, I.W. and Stroosnijder, L., 2014. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop. *Agricultural Water Management*. 146, 280-296.
- Pazoki, A.R., Karimi Nejad, M. and Foladi Toroghi, A.R., 2010. Effect of planting dates on yield of ecotypes of saffron (*Crocus sativus* L.) in Natanz region. *Crop Physiology*. 2, 3-12. (In Persian with English abstract).
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E., 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy*. 101, 438-447.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E., 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
- Raoufi, R.S. and Soufizadeh, S., 2020. Simulation of the impacts of climate change on phenology, growth, and yield of various rice genotypes in humid sub-tropical environments using AquaCrop-Rice. *International Journal of Biometeorology*. 64, 1657-1673.
- Singh, R., Van Dam, J.C. and Feddes, R.A., 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. *Agricultural Water Management*. 82, 253-278.
- Soltani, A., Rahimzadeh Khoei, F., Ghassemi-Golezani, K. and Moghaddam, M., 1999. Cicer: A computerized model for simulating chickpea growth and yield. *Agricultural Science*. 9, 89-106. (In Persian with English abstract). Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., and Fereres, E., 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy*. 101, 426-437.
- Tan, S., Wang, Q., Zhang, J., Chen, Y., Shan, Y., and Xu, D., 2018. Performance of AquaCrop model for cotton growth simulation under film-mulched drip irrigation in southern Xinjiang, China. *Agricultural Water Management*. 196, 99-113.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M., Stockle, C. and Steduto, P., 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*. 101, 509-521.
- Zolfagari, H., Farhadi, B. and Rahimi, H., 2016. Climatic potentials in Iran for soybean cultivation. *Journal of Geography and Planning*. 20, 89-105. (In Persian with English abstract).



Environmental Sciences Vol.20 / No.2 / Summer 2022

61-80

Original Article

## Studying the changes in rice yield and water balance in Guilan Province affected by climate change

Behnam Kamkar,<sup>1\*</sup> Pooya Aalae Bazkiaee,<sup>2</sup> Parisa Alizadeh Dehkordi<sup>3</sup> and Ebrahim Amiri<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>2</sup> Department of Agriculture, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

<sup>3</sup> Department of Agriculture, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

<sup>4</sup> Department of Water Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Lahijan Branch, Iran

Received: 2021.02.03 Accepted: 2022.01.01

**Kamkar, B., Aalae Bazkiaee, P., Alizadeh Dehkordi, P. and Amiri, E., 2022.** Studying the changes in rice yield and water balance in Guilan Province affected by climate change. *Environmental Sciences*. 20(2): 61-80.

**Introduction:** Increasing greenhouse gases will have different effects on crop yields, so that the interaction of these effects may increase or decrease yields. Crop simulation models have been used to investigate different levels of crop and environmental managements. The aim of this study was to investigate the AquaCrop model based on the past, present and future climate in Rasht city located in Guilan Province to achieve maximum water productivity and rice grain yield.

**Material and methods:** In order to study the changes in rice yield, water balance and productivity in Rasht city under the past, present and future climate, the AquaCrop model was used. For this purpose, long-term data (over 30 years) were used to evaluate the yield and water balance in rice cultivation in the past and present climate. Also, using LARS-WG6 software, meteorological data for the next 83 years were generated based on the available daily meteorological data. The AquaCrop model was evaluated in the past, present and future climates based on daily data of minimum and maximum temperatures, precipitation and sun hours. The studied treatments included four levels of irrigation including 55, 70, 85 and 100% of water requirement and the planting dates were April 21st, May 11th and May 31st. By examining the effect of different treatment levels based on RCP 4.5 and RCP 8.5 climate change scenarios, the rate of changes in grain yield, evapotranspiration and water productivity based on evapotranspiration in the past, present and future climates were investigated.

---

\* Corresponding Author: *Email Address.* kamkar@ferdowsi.um.ac.ir  
<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2022.1013>  
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1401.20.2.9.0>

Also, the best irrigation treatment and planting date were introduced to increase rice yield and reduce water consumption.

**Results and discussion:** The results showed that the LARS-WG6 model is able to simulate the climatic components including temperature, precipitation and radiation with high accuracy. The results showed that the minimum and maximum temperatures increased during the climate change scenarios and the amount of radiation and precipitation decreased. The result of rice biomass and grain yield under RCP 4.5 and RCP 8.5 showed that the highest grain and biomass yield was obtained in irrigation of 100% of water requirement and planting date on April 21st. The study of water productivity showed that irrigation treatment of 100% of water requirement and planting date of May 31st had an effective role in increasing soil water storage and reducing evapotranspiration from the soil surface. The highest water productivity in grain production based on evapotranspiration was obtained in irrigation of 100% of water requirement and planting date was May 31st.

**Conclusion:** According to the obtained results, considering the water consumption productivity and yield and problems that will exist in the future including water shortage, it seems that late cultivation of rice in conditions of water shortage is a good solution, but under conditions where there is no water shortage, early cultivation of rice, such as April 21th, can increase the production. The study of irrigation levels showed that grain production is the most effective factor in increasing water use productivity and the use of low irrigation levels will not play an effective role in increasing water productivity.

**Keywords:** AquaCrop model, Irrigation, Planting date, Water productivity.

