

مدل سازی اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبیاری و کارایی مصرف آب در گندمزارهای استان خوزستان

رضا دیهیم فرد^{۱*} - حامد عینی نرگسه^۲ - شبنم فرشادی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۱۵

چکیده

یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم آینده، تأثیر آن بر مصرف آب در بخش کشاورزی است که می‌تواند مدیریت منابع آب را با چالش‌های جدی روبرو سازد. در این مطالعه به منظور پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر رشد و نمو گندم در شش شهرستان استان خوزستان شامل اهواز، بهبهان، دزفول، ایذه، رامهرمز و امیدیه از مدل گردش عمومی HadCM3 تحت سه سناریوی A1B1، A2 و دوره ۶۵-۲۰۴۶ استفاده شد. برای ریزمقیاس کردن پارامترهای اقلیمی مولد آب و هوایی LARS-WG مورد استفاده قرار گرفت. پس از شبیه‌سازی اقلیم آینده و تولید پارامترهای مورد نیاز، شبیه‌سازی رشد و نمو گندم با استفاده از مدل APSIM-Wheat انجام شد. نتایج ارزیابی مدل LARS-WG با استفاده از شاخص NRMSE حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی تابش (از ۰/۶۳ درصد تا ۱/۶۷ درصد)، دمای کمینه (از ۰/۶۳ درصد تا ۱/۹۸ درصد) و بیشینه (از ۰/۶۳ درصد تا ۱/۰۵ درصد) بود در حالی که مقدار این شاخص برای بارندگی (از ۱۱/۴۲ درصد تا ۲۵/۴۷ درصد) در مقایسه با دیگر متغیرها بالاتر بود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در استان خوزستان عملکرد دانه گندم در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه به‌طور میانگین ۱۶ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش عملکرد دانه و همچنین کاهش تبخیر-تعرق (کاهش ۵ درصدی در مقایسه با دوره پایه) در شرایط تغییر اقلیم، کارایی مصرف آب ۲۳ درصد افزایش می‌یابد. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که با توجه به افزایش دما (۷ درصد)، افزایش غلظت CO₂ (از ۳۳۴ پی‌پی‌ام به ۵۲۶ پی‌پی‌ام در سال ۲۰۵۰)، کاهش طول فصل رشد (۷/۷۴ روز) و کاهش تبخیر-تعرق نیاز آبیاری گندم در شرایط تغییر اقلیم آینده ۹ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: سناریوی اقلیمی، شبیه‌سازی، APSIM، مدل گردش عمومی

مقدمه

مستقیم رشد و عملکرد گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۷). اثرات اولیه افزایش غلظت CO₂ بر گیاهان شامل کاهش هدایت روزنه‌ای و تعرق، افزایش کارایی مصرف آب، سرعت فتوسنتز و کارایی مصرف نور بالاتر است (۱۲). لازم به ذکر است که تأثیر نهایی افزایش غلظت CO₂ و تغییرات اقلیمی همراه با آن بر گیاهان زراعی به شرایط محیطی محل مورد نظر بستگی داشته و می‌تواند بسته به منطقه، متفاوت باشد. یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم آینده، تأثیر آن بر مصرف آب کشاورزی است که می‌تواند مدیریت منابع آب را با چالش‌های جدی روبرو سازد. عوامل مختلفی نیاز آبی گیاهان یا تبخیر و تعرق را تحت تأثیر قرار می‌دهد که از جمله می‌توان به پارامترهای اقلیمی نظیر دمای هوا، بارش و ساعات آفتابی اشاره کرد. هرگونه تغییر در این پارامترهای اقلیمی در اثر تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق گیاه نیز اثرگذار خواهد بود (۲).

تغییر اقلیم می‌تواند بر آب قابل دسترس برای کشاورزی تأثیر

طبق آخرین گزارش هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم^۴ افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای باعث افزایش قابل توجهی در دمای کره زمین از اواسط قرن بیستم شده است (۱۹). همچنین گزارش شده است که متوسط دمای جهانی در پایان قرن جاری ۱/۱ تا ۶ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت (۳۲). فرآیندهای تغییر اقلیم شامل افزایش غلظت CO₂ اتمسفری، دما و نیز نوسان بارندگی است، که به‌طور

۱ و ۳- استادیار و دانش‌آموخته‌ا کولوژیک، گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: deihim@sbu.ac.ir)
۲- دانشجوی دکتری زراعت، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تبخیر-تعرق و بهبود عملکرد گندم در نواحی شمالی چین کمک می‌کند. در یک مطالعه دیگر یانگ و همکاران (۴۴) کارایی مصرف آب را در گندم دیم مناطق نیمه‌خشک بررسی کردند. به‌طور کلی نتایج آن‌ها نشان داد که کارایی مصرف آب در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه $1.7-1.3 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ افزایش می‌یابد.

استان خوزستان یکی از مهم‌ترین مناطق تولیدی محصولات کشاورزی و به‌طور خاص گندم در کشور است به‌طوری‌که ۱۵/۷۳ درصد از کل تولید گندم آبی را داشته و ۸/۸۵ درصد از کل زمین‌های قابل کشت کشور در این استان قرار دارد (۴). بنابراین می‌توان بیان کرد که بخش عمده‌ای از آب مصرفی کشاورزی در این استان مصرف می‌شود. همچنین با توجه به رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای مواد غذایی و همچنین وضعیت کشور در منابع آب، اهمیت آب به‌عنوان مهم‌ترین عنصر در کشاورزی از دیدگاه تعیین الگوی کشت و افزایش بهره‌وری در استفاده از آب بیش‌ازپیش نمایان می‌شود (۳۰). لذا بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تولید گندم در استان خوزستان به‌عنوان قطب تولید این محصول و نیاز آبی این گیاه در آینده ضروری خواهد بود. در همین راستا این تحقیق به‌منظور شبیه‌سازی رشد و نمو گندم آبی در شرایط تغییر اقلیم و محاسبه کارایی مصرف آب و نیاز آبیاری آن در این استان به انجام رسید.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در شش شهرستان استان خوزستان شامل اهواز، بهبهان، دزفول، ایذه، امیدیه و رامهرمز به انجام رسید. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. استان خوزستان با مساحت ۶۴۰۵۷ کیلومتر مربع چهار درصد از مساحت ایران را به خود اختصاص داده است و در محدوده 29° و $58'$ تا 32° و $58'$ شمالی از خط استوا و 47° و $42'$ تا 50° و $39'$ از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد (شکل ۱). بیشترین سطح برداشت‌شده محصولات زراعی آبی متعلق به این استان می‌باشد به‌طوری‌که ۱۳/۵۸ درصد از سطح اراضی کشت آبی کشور در این استان قرار دارد. همچنین بیشترین میزان تولید محصولات زراعی آبی در کشور متعلق به استان خوزستان با تولید ۱۸/۳۷ درصد می‌باشد. گندم آبی یکی از محصولات رایج این استان است و میانگین عملکرد دانه در این استان ۳۰۳۸۸ کیلوگرم در هکتار است (۴).

در تحقیق حاضر به‌منظور شبیه‌سازی اقلیم آینده تحت سناریوهای مختلف، داده‌های بلندمدت روزانه شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، تعداد ساعات آفتابی و بارش از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شد.

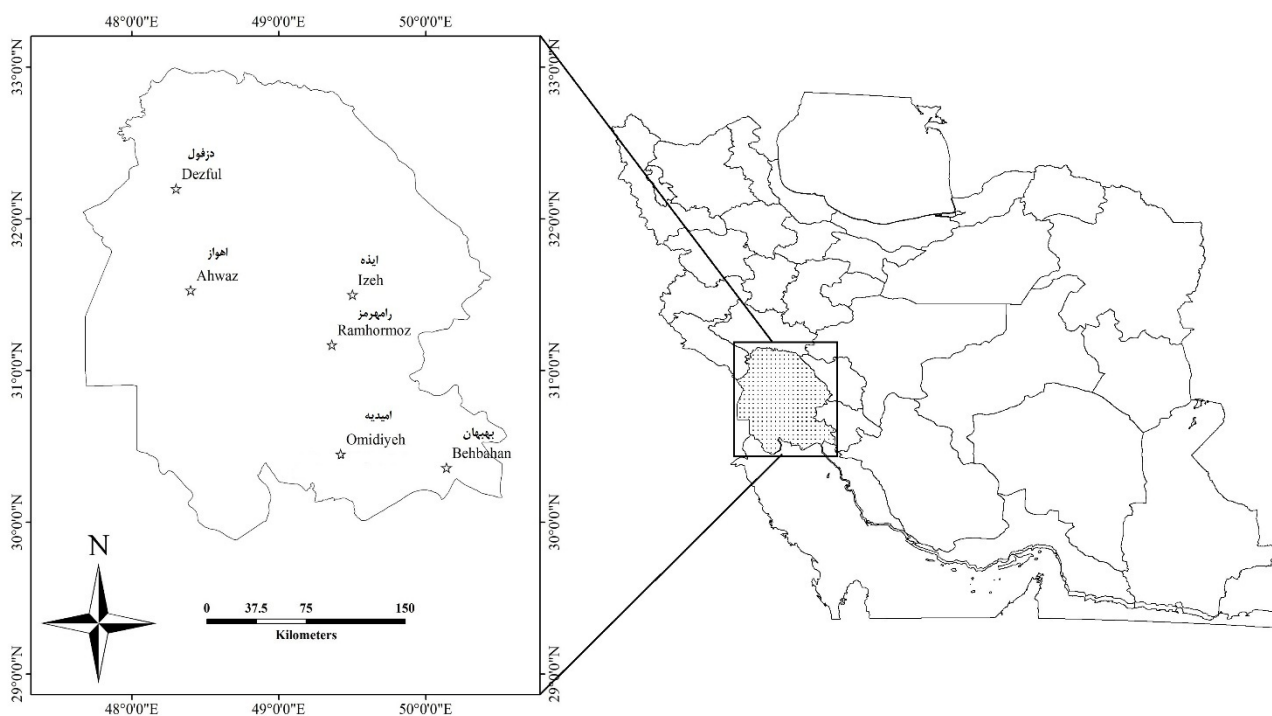
گذاشته و منجر به خشک شدن محیط در مناطق نیمه‌خشک ایران گردد (۲۱). از طرفی مطالعات انجام شده در خصوص تأثیر تغییر اقلیم بر تولیدات کشاورزی در کشورهای درحال توسعه کم می‌باشد. از سوی دیگر این کشورها در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا واقع شده‌اند که به دلیل ساختار اکولوژیک خود حساسیت شدیدتری به تغییرات اقلیمی دارند. در یک بررسی نه‌بندانی و سلطانی (۲۷) اثر تغییر اقلیم را بر نمو، نیاز آبیاری و عملکرد سویا در گرگان شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در دمای ثابت با دو برابر شدن غلظت CO_2 نیاز آبیاری سویا بین ۳۰ تا ۴۰ میلی‌متر کاهش خواهد یافت. در یک پژوهش دیگر در دشت بیرجند بر گندم و جو، نتایج نشان داد که تحت شرایط تغییر اقلیم آبی به دلیل کاشت زودتر گندم و جو و کوتاه شدن طول دوره رشد آن‌ها، نیاز آبی این گیاهان بین ۱۹/۵ درصد (گندم) تا ۲۲/۵ درصد (جو) کمتر خواهد شد (۳۱). قربانی و همکاران (۱۵) نیز اثرات تغییر اقلیم را بر نیاز آبی سویا (دیم و آبی) در منطقه گرگان مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها اظهار کردند که با توجه به رایج نبودن کشت دیم سویا در منطقه گرگان می‌توان بیان کرد که تغییر اقلیم تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نیاز آبی سویا نخواهد داشت. در یک بررسی دیگر در دشت‌های منتخب استان خراسان رضوی نتایج اشرف و همکاران (۵) نشان داد که نیاز آبی گندم و چغندر قند در دوره ۱۳۹۰ تا ۱۴۰۹ تغییر محسوسی نسبت به دوره پایه نخواهد داشت. در حقیقت در این دشت‌ها، افزایش بارندگی آبی با افزایش دمای کمینه و بیشینه و در نتیجه دمای متوسط هوا که منجر به تبخیر-تعرق بیشتر گیاه می‌شود، جبران خواهد شد. استثنائاً در تربت جام با افزایش ساعت آفتابی و در نتیجه کاهش بارش در ۲۰ سال آبی، نیاز آبی هر دو گیاه تحت هر سه سناریوی A2، A1B و B1 افزایش خواهد یافت و میزان این افزایش در دوره رشد گندم به‌ترتیب برابر ۱۷، ۱۴ و ۱۸ درصد و در دوره رشد چغندر قند به‌ترتیب برابر ۱۹، ۱۸ و ۱۸ درصد بود.

در مناطق مختلف دنیا نیز مطالعاتی در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز آبی گیاهان انجام شده است. برای مثال وانگ و همکاران (۴۰) گزارش کردند که تحت شرایط تغییر اقلیم در جنوب شرقی استرالیا در شرایط اقلیمی مرطوب، کارایی مصرف آب گندم ۲۰-۷ درصد افزایش می‌یابد اما در مناطق خشک جنوب شرقی استرالیا ۱۴-۶ درصد کاهش خواهد یافت. در پژوهشی دیگر در چین ال‌وی و همکاران (۲۴) اثرات تغییر اقلیم را بر تولید گندم زمستانه در مناطق تولید عمده گندم این کشور بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که در شرایط دیم عملکرد گندم در مناطق شمالی چین در آینده (۲۰۳۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰) کاهش می‌یابد در حالی که در مناطق جنوبی افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین بیان کردند که عملکرد گندم در شرایط آبیاری کامل تقریباً در همه نواحی مورد بررسی افزایش می‌یابد. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش در آبیاری مؤثر در آینده به افزایش

جدول ۱- خصوصیات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در استان خوزستان.

Table 1- Geographical characteristics of selected weather stations for the different regions in Khuzestan province

| منطقه location | عرض جغرافیایی Latitude | طول جغرافیایی Longitude | ارتفاع Elevation (m) | دوره شبیه سازی Simulation period |
|----------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| اهواز Ahwaz | 31.53 | 48.40 | 18 | 1961-2009 |
| بهبهان Behbahan | 30.36 | 50.14 | 313 | 1994-2009 |
| دزفول Dezful | 32.20 | 48.30 | 140 | 1961-2009 |
| ایذه Izeh | 31.50 | 49.50 | 835 | 1993-2009 |
| امیدیه Omidiyeh | 30.45 | 49.42 | 21 | 1983-2009 |
| رامهرمز Ramhormoz | 31.17 | 49.36 | 179 | 1988-2009 |



شکل ۱- مختصات جغرافیایی مناطق مورد مطالعه.

Figure 1-The geographical area of the study locations

ایستگاه‌های هواشناسی کشور مقدار تابش روزانه ثبت نمی‌شود، لذا با توجه به ثبت تعداد ساعات آفتابی در ایستگاه‌های هواشناسی، تابش روزانه با استفاده از رابطه آنگستروم تخمین زده شد (۳). در پایان و بعد از بازسازی داده‌های هواشناسی، برای کسب اطمینان از کامل بودن و صحت داده‌ها از نرم‌افزار Tamet (۳۷) استفاده شد. در این نرم‌افزار، ابتدا مقادیر کمینه و بیشینه برای هر متغیر به نرم‌افزار معرفی می‌شود. سپس از داده‌های اقلیمی موجود به عنوان ورودی استفاده

پس از جمع‌آوری این داده‌ها، به‌دلیل این‌که در ایستگاه‌های هواشناسی در بعضی از ماه‌های سال داده هواشناسی ثبت نشده و در برخی موارد داده‌های پرت وجود داشت از این‌رو با استفاده از برنامه WeatherMan^۱ (۱۸) داده‌های پرت و گم‌شده با توجه به اقلیم گذشته هر منطقه محاسبه و اصلاح شدند. همچنین در بسیاری از

1- Weather Data Manager

می‌شود. در صورتی که داده‌های پرت و خارج از محدوده تعریف شده موجود باشد، این داده‌ها توسط برنامه با رنگ قرمز مشخص می‌شوند.

شبیه‌سازی اقلیم آینده استان با مدل‌های گردش عمومی اتمسفر

در مطالعه حاضر پس از اصلاح و آماده‌سازی داده‌های اقلیمی به‌منظور شبیه‌سازی اقلیم آینده استان خوزستان از مدل اقلیمی HadCM3 استفاده شد. نقطه ضعف خروجی مدل‌های گردش عمومی، ماهیانه بودن دما و بارش در مقیاس وسیع است، درحالی‌که برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم به‌ویژه در مطالعات مربوط به کشاورزی داده‌های اقلیمی در مقیاس روزانه نیاز است. به همین منظور از تکنیک ریزمقیاسی استفاده شد (۴۲). یکی از معروف‌ترین مولدهای آب و هوایی که در آن از تکنیک ریزمقیاس کردن استفاده می‌شود LARS-WG¹ (۳۴) است که در مطالعه حاضر از این مولد استفاده شد.

از آنجا که روند آینده انتشار گازهای گلخانه‌ای از قطعیت کافی برخوردار نیست، به همین دلیل برای مطالعات تغییر اقلیم از سناریوهای مختلف، معمولاً با طول دوره‌های مختلف استفاده می‌شود (۱). در این تحقیق از سه سناریوی انتشار A2، B1 و A1B برای پیش‌بینی اقلیم آینده (دوره ۲۰۴۶-۶۵) مناطق مورد مطالعه استفاده شد. سناریوی SRES-A2 شرایط ناهمگون جهان را با نرخ بالای رشد جمعیت، توسعه اقتصادی اندک و تغییر تکنولوژیکی آهسته نشان می‌دهد (۲۹). سناریوی SRES-B1 جهان همگرایی را که پیک جمعیت جهان در اواسط قرن و تغییرات سریع در ساختارهای اقتصادی خدمات و اطلاعات اقتصادی است تعریف می‌کند (۴۱) و سناریوی SRES-A1B جهان را با رشد اقتصادی سریع، پیک جمعیت جهانی در اواسط قرن و تکنولوژی‌های کارآمدتر بر اساس یک ترکیب انرژی متوازن توصیف می‌کند (۲۸). لازم به ذکر است که غلظت CO₂ در شرایط تغییر اقلیم آینده در مقایسه با دوره پایه افزایش می‌یابد. بر همین اساس در این تحقیق غلظت CO₂ در دوره ۲۰۴۶-۶۵ تحت سناریوهای B1، A1B و A2 به ترتیب ۴۹۲، ۵۴۱ و ۵۴۵ قسمت در میلیون در نظر گرفته شد (۲۶).

خروجی LARS-WG شامل تابش، بارش، دمای کمینه و بیشینه در مقیاس روزانه در هر ایستگاه هواشناسی بود که این پارامترها در ادامه به‌عنوان ورودی در مدل شبیه‌سازی رشد گندم مورد استفاده قرار گرفتند.

اعتبار سنجی مدل اقلیمی

به‌طور کلی در مطالعات اقلیمی با استفاده از LARS-WG مقایسه

بین مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده (واقعی) ضروری است. شاخص‌های متفاوتی برای ارزیابی تفاوت داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق از شاخص جذر میانگین مربعات (NRMSE²) (۳۸) استفاده شد که اختلاف نسبی بین مشاهدات و داده‌های شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد:

$$NRMSE = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (1)$$

در این رابطه، S_i و O_i : به ترتیب داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده شده، \bar{O} : میانگین داده‌های مشاهده شده و n : تعداد مشاهده‌ها می‌باشد. هرچقدر مقدار این شاخص کمتر و نزدیک به صفر درصد باشد، نشان دهنده دقت بالا در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی است.

مدل شبیه‌سازی رشد گندم در شرایط تغییر اقلیم آینده

در این تحقیق پس از ارزیابی داده‌های آب و هوایی تولید شده توسط مولد LARS-WG، به‌منظور شبیه‌سازی رشد و نمو گندم در شرایط تغییر اقلیم و بررسی اثرات بالقوه‌ی آن از مدل APSIM-Wheat در شرایط پتانسیل استفاده شد. مدل APSIM³ توسط محققین استرالیایی طراحی شده و از قدرت بالایی برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی برخوردار است. ماژول گندم در این مدل رشد و نمو گندم را به‌صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند و به عوامل مختلف از جمله آب و هوا (دما، بارندگی، تابش)، خاک (آب خاک و نیتروژن خاک)، ضرایب ژنتیکی و اطلاعات مدیریتی محصول زراعی پاسخ نشان می‌دهد. جزئیات بیشتر این مدل توسط کیتینگ و همکاران (۲۰) و وانگ و همکاران (۳۹) توصیف و شرح داده شده است. این مدل پیش‌تر برای رقم چمران که یکی از ارقام رایج استان خوزستان می‌باشد واسنجی و اعتبارسنجی شده است (۱۱ و ۱۳). خروجی برنامه LARS-WG که شامل پارامترهای اقلیمی روزانه تحت سناریوهای مختلف انتشار بود پس از آماده‌سازی به‌عنوان ورودی در مدل APSIM مورد استفاده قرار گرفت. افزون بر این، ورودی‌های دیگر مورد نیاز برای اجرای مدل مانند اطلاعات گیاهی و مدیریتی، نیز استفاده شد. این ورودی‌ها شامل ضرایب ژنتیکی رقم چمران (جدول ۲)، تراکم ۳۵۰ بوته در مترمربع، فاصله ردیف ۲۵ سانتی‌متر و تاریخ کشت ۱۵ آبان بود.

پس از اجرای مدل، خروجی‌های مورد نظر شامل عملکرد دانه، تبخیر و تعرق، میانگین دما در طول فصل رشد، روز پس از کاشت و آبیاری تجمعی در طول فصل رشد در دوره پایه و شرایط اقلیمی آینده در مناطق مورد بررسی در استان خوزستان تجزیه تحلیل شدند.

2- Normalized Root Mean Square Error

3- Agriculture Production Systems sIMulator

1- Long Ashton Research Station Weather Generator

جدول ۲- ضرایب ژنتیکی رقم گندم چمران (۱۱).
Table 2- Genetic coefficients of wheat cultivar 'Chamran' (11)

| Abbreviation | Value | Unit |
|--|-------|-----------------------|
| حساسیت به بهاره‌سازی vern_sens | 2.5 | - |
| حساسیت به طول روز photop_sens | 3.5 | - |
| تعداد دانه در هر گرم از ساقه grains_per_gram_stem | 22 | Kernel/g stem |
| زمان حرارتی در پایان مرحله جوانی tt_end_of_juvenile | 380 | °Cd |
| زمان حرارتی در مرحله شروع گلدهی tt_floral_initiation | 500 | °Cd |
| زمان حرارتی در مرحله شروع پر شدن دانه tt_start_grain_fill | 545 | °Cd |
| بیشینه اندازه دانه max_grain_size | 0.044 | g |
| وزن ساقه در بوته stem_wt | 3.5 | g plant ⁻¹ |

متغیرها بیشتر بود. در خصوص دلیل دقت کمتر مدل در شبیه‌سازی بارش می‌توان به نوسانات بالای این متغیر در مناطق خشک و نیمه‌خشک اشاره کرد. نتایج مطالعات مختلف نیز نشان‌دهنده همین موضوع است که مولد آب و هوایی LARS-WG در شبیه‌سازی بارش در مقایسه با دیگر متغیرهای اقلیمی از دقت کمتری برخوردار است (۱۳، ۱۴ و ۳۱).

در داخل کشور مطالعات مختلفی با استفاده از مدل‌های اقلیمی و مولد آب و هوایی LARS-WG انجام شده است. نتایج این مطالعات حاکی از مناسب بودن این مدل‌ها برای مطالعات تغییر اقلیم در ایران است (۱۰، ۱۳ و ۱۴).

عملکرد دانه، تبخیر-تعرق و کارایی مصرف آب در دوره پایه و آینده

در مطالعه حاضر پس از شبیه‌سازی اقلیم آینده مناطق مورد بررسی، رشد و نمو گندم در طول فصل رشد با استفاده از مدل APSIM-Wheat شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی مدل APSIM-Wheat در دوره پایه و آینده در جدول ۴ نشان داده شده است.

نتایج شبیه‌سازی مدل APSIM-Wheat در دوره پایه نشان داد که بیشترین عملکرد دانه در شهرستان‌های مورد بررسی در ایذه (۶۷۶۷/۲) کیلوگرم در هکتار) و کمترین مقدار عملکرد دانه در امیدیه (۵۲۳۰/۲) کیلوگرم در هکتار) به‌دست آمد. با توجه به جدول ۴ دلیل بالا بودن عملکرد دانه گندم در شهرستان ایذه در دوره پایه مناسب

لازم به ذکر است که رشد و نمو گندم در دوره پایه و شرایط تغییر اقلیم، با در نظر گرفتن افزایش غلظت CO₂ و دما و اثرات متقابل این دو متغیر شبیه‌سازی شد. همچنین برای محاسبه کارایی مصرف آب از رابطه زیر استفاده شد (۸):

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (2)$$

در این رابطه Y: عملکرد دانه شبیه‌سازی شده (کیلوگرم در هکتار) و ET: تبخیر-تعرق شبیه‌سازی شده (میلی‌متر) در طول فصل رشد (از کاشت تا برداشت) می‌باشد. در پایان تمامی صفات شبیه‌سازی شده با مدل APSIM-Wheat، با استفاده از نرم‌افزارهای SAS (۳۳) و SigmaPlot (۳۵) تجزیه و تحلیل شدند.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل اقلیمی

به طور کلی نتایج ارزیابی داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل اقلیمی و مقادیر واقعی نشان داد که مدل مقادیر تابش، دمای کمینه و بیشینه در همه مناطق مورد بررسی را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند اما دقت آن در شبیه‌سازی بارش در مقایسه با دیگر متغیرهای اقلیمی نسبتاً کمتر بود (جدول ۳). نتایج ارزیابی مدل با استفاده از رابطه ۲ حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی تابش (از ۰/۶۳ درصد تا ۱/۶۷ درصد)، دمای کمینه (از ۰/۶۳ درصد تا ۱/۹۸ درصد) و بیشینه (از ۰/۶۳ درصد تا ۱/۰۵ درصد) بود در حالی که مقدار این شاخص برای بارندگی (از ۱۱/۴۲ درصد تا ۲۵/۴۷ درصد) در مقایسه با دیگر

دانه گندم افزایش یافت. عملکرد دانه گندم در دوره مورد مطالعه (۶۵-۲۰۴۶) و تحت سناریوهای مختلف انتشار CO₂ نسبت به دوره پایه در تمامی شهرستان‌ها به میزان ۱۶ درصد افزایش یافت (جدول ۴) که به‌طور کلی می‌توان دلیل این افزایش عملکرد را افزایش غلظت CO₂ و مناسب شدن شرایط اقلیمی برای رشد و نمو گندم دانست. در شرایط تغییر اقلیم آینده نیز به‌طور میانگین در همه سناریوها بیشترین عملکرد همانند دوره پایه در شهرستان ایذه (۷۷۵۵/۳) کیلوگرم در هکتار) و کمترین عملکرد دانه در شهرستان امیدیه (۶۲۹۰/۷۶) کیلوگرم در هکتار) مشاهده شد.

بودن دما در طول فصل رشد (۱۳/۱۷ درجه سانتی‌گراد)، طول فصل رشد بیشتر (۱۶۸/۱ روز) و تبخیر-تعرق بیشتر در مقایسه با دیگر شهرستان‌های مورد بررسی است. دلیل عملکرد دانه کمتر در شهرستان امیدیه در دوره پایه بالا بودن دمای طول فصل رشد (۱۶/۱) درجه سانتی‌گراد) طول فصل رشد کم (۱۴۵/۴ روز) و تبخیر-تعرق کم (۴۱۱/۸ میلی‌متر) در طول فصل رشد در مقایسه با دیگر شهرستان‌ها است. نتایج تجزیه همبستگی (جدول ۵) نیز نشان‌داد که بین صفات مذکور رابطه معکوس و معنی‌داری وجود دارد به این‌صورت که با افزایش دما و گرم شدن هوا عملکرد دانه کاهش‌یافت (ضریب همبستگی ۰/۳۱-). از طرفی با افزایش طول فصل رشد (ضریب همبستگی ۰/۳۴) و تبخیر-تعرق (ضریب همبستگی ۰/۸۴)، عملکرد

جدول ۳- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده تابش، بارش، دمای کمینه و بیشینه توسط مدل اقلیمی با استفاده از شاخص NRMSE

در دوره پایه در استان خوزستان

Table 3- Comparison of observed and simulated radiation, precipitation, minimum and maximum temperatures by Normalized Root Mean-Squared Error (NRMSE) in the baseline in Khuzestan province

| ایستگاه Station | متغیر Parameter | NRMSE (%) |
|--------------------|--------------------|-----------|
| Ahwaz اهواز | T min دمای کمینه | 1.08 |
| | T max دمای بیشینه | 0.69 |
| | Radiation تابش | 1.41 |
| | Precipitation بارش | 21.67 |
| Behbahan بهبهان | T min دمای کمینه | 1.12 |
| | T max دمای بیشینه | 0.76 |
| | Radiation تابش | 1.18 |
| | Precipitation بارش | 19.18 |
| Dezful دزفول | T min دمای کمینه | 1.28 |
| | T max دمای بیشینه | 1.05 |
| | Radiation تابش | 0.63 |
| | Precipitation بارش | 11.42 |
| Izeh ایذه | T min دمای کمینه | 1.98 |
| | T max دمای بیشینه | 0.77 |
| | Radiation تابش | 1.45 |
| | Precipitation بارش | 15.47 |
| Omidyeh امیدیه | T min دمای کمینه | 0.63 |
| | T max دمای بیشینه | 0.66 |
| | Radiation تابش | 1.67 |
| | Precipitation بارش | 21.9 |
| Ramhormoz رامهرمز | T min دمای کمینه | 1.04 |
| | T max دمای بیشینه | 0.63 |
| | Radiation تابش | 0.76 |
| | Precipitation بارش | 25.47 |

جدول ۴- تبخیر-تعرق، روز پس از کاشت، عملکرد دانه، میانگین دما (کاشت تا برداشت) و کارایی مصرف آب در دوره پایه و سناریوهای آینده در مناطق مورد مطالعه

Table 4- Seasonal evapotranspiration, days after sowing, grain yield, average temperature (sowing to harvest) and water use efficiency in the baseline and future scenarios throughout all study locations

| صفت Trait | سناریو Scenario | منطقه Location | | | | | |
|---|--------------------|-------------------|--------------------|-----------------|--------------|--------------------|----------------------|
| | | اهواز Ahwaz | بهبهان Behbahan | دزفول Dezful | ایذه Izeh | امیدیه Omidiyeh | رامهرمز Ramhormoz |
| میانگین دما از کاشت تا برداشت (درجه سانتی‌گراد) Average temperature from sowing to harvest(°c) | Baseline | 15.85 | 15.42 | 15.05 | 13.17 | 16.1 | 16.1 |
| | B1 | 16.97 | 16.19 | 16.14 | 13.85 | 16.94 | 17.04 |
| | A1B | 17.38 | 16.52 | 16.57 | 14.14 | 17.29 | 17.39 |
| | A2 | 17.25 | 16.49 | 16.39 | 14 | 17.22 | 17.28 |
| روز پس از کاشت DAP* | Baseline | 145.9 | 149.3 | 151.9 | 168.1 | 145.4 | 145.1 |
| | B1 | 138.5 | 143.3 | 143.8 | 161.1 | 139.7 | 139.3 |
| | A1B | 136.73 | 141.5 | 141.7 | 158.9 | 138.2 | 137.8 |
| | A2 | 137.15 | 141.6 | 142.3 | 159.7 | 138.4 | 138.1 |
| عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Grain yield(Kg.ha ⁻¹) | Baseline | 5628.6 | 5385.1 | 5659.9 | 6767.2 | 5230.2 | 5800 |
| | B1 | 6524.1 | 6392 | 6580.1 | 7699 | 6212.5 | 6594.7 |
| | A1B | 6526.5 | 6451.6 | 6504.1 | 7775.3 | 6313.3 | 6631 |
| | A2 | 6574.6 | 6438.9 | 6566.3 | 7791.6 | 6346.5 | 6661.3 |
| تبخیر-تعرق (میلی‌متر) ET*(mm) | Baseline | 419.31 | 418.13 | 430.73 | 441.7 | 411.8 | 401.5 |
| | B1 | 398.01 | 400.75 | 409.83 | 414.39 | 402.11 | 379.59 |
| | A1B | 390.3 | 394.9 | 400.99 | 406.22 | 397.56 | 373.34 |
| | A2 | 390.84 | 394.66 | 401.54 | 408.07 | 397.46 | 373.23 |
| کارایی مصرف آب(کیلوگرم درهکتار بر میلی‌متر) WUE*(Kg.ha ⁻¹ .mm ⁻¹) | Baseline | 13.42 | 12.87 | 13.14 | 15.32 | 12.7 | 14.44 |
| | B1 | 16.39 | 15.95 | 16.05 | 18.57 | 15.44 | 17.37 |
| | A1B | 16.72 | 16.33 | 16.22 | 19.14 | 15.88 | 17.76 |
| | A2 | 16.82 | 16.31 | 16.35 | 19.09 | 15.96 | 17.84 |

* DAP: روز پس از کاشت ET: تبخیر-تعرق WUE: کارایی مصرف آب

* DAP: Days after sowing, ET: Evapotranspiration, WUE: Water Use Efficiency

نتایج ال‌وی و همکاران (۲۴) در چین نشان داد که عملکرد گندم در شرایط آبیاری کامل از شمال به سمت جنوب منطقه مورد بررسی کاهش یافت. دلیل این روند کاهش، تابش کمتر و فصل رشد کوتاه‌تر به دلیل دمای بالا در جنوب ذکر شد. در یک بررسی دیگر عینی نرگسه و همکاران (۱۳) در استان فارس با استفاده از مدل APSIM-Wheat نشان دادند که در شرایط تغییر اقلیم عملکرد دانه گندم در شرایط آبی در مقایسه با دوره پایه روند افزایشی خواهد داشت. نه‌بندانی و سلطانی (۲۷) در یک بررسی اثر تغییر اقلیم را بر نمو، نیاز آبیاری و عملکرد سویا در گرگان بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش سه درجه‌ای دما باعث افزایش حدود ۳۰ گرم در مترمربع عملکرد دانه سویا خواهد شد.

نتایج شبیه‌سازی‌ها در این تحقیق همچنین نشان داد بیشترین و کمترین مقدار تبخیر-تعرق در دوره پایه به ترتیب در ایذه (۴۴۱/۷ میلی‌متر) و رامهرمز (۴۰۱/۵ میلی‌متر) بوده است. دلیل اصلی بیشتر بودن مقدار تبخیر-تعرق در طول فصل رشد گندم در شهرستان ایذه طول فصل رشد بیشتر (۱۶۸/۱ روز) در مقایسه با دیگر مناطق است.

در شرایط تغییر اقلیم نیز مقدار این متغیرها (میانگین دما، طول فصل رشد و تبخیر-تعرق) نشان‌دهنده مناسب بودن شرایط برای رشد و نمو گندم در ایذه نسبت به دیگر مناطق است. به‌طور میانگین در همه سناریوها در شهرستان ایذه دمای طول فصل رشد ۱۳/۹۹ درجه سانتی‌گراد، طول فصل رشد ۱۵۹/۹ روز و تبخیر-تعرق ۴۰۹/۵۶ میلی‌متر به‌دست آمد. همچنین نتایج شبیه‌سازی حاکی از نامناسب بودن شرایط برای رشد و نمو گندم در امیدیه نسبت به دیگر مناطق است. به‌طور میانگین در همه سناریوها در شهرستان امیدیه دمای طول فصل رشد ۱۷/۱۵ درجه سانتی‌گراد، طول فصل رشد ۱۳۸/۷۶ روز و تبخیر-تعرق ۳۹۹/۰۴ میلی‌متر به‌دست آمد. نتایج تجزیه همبستگی در شرایط تغییر اقلیم نیز (جدول ۶) نشان‌داد که بین صفات مذکور رابطه معنی‌داری وجود دارد به این‌صورت که با افزایش دما و گرم شدن هوا عملکرد دانه کاهش یافت (ضریب همبستگی -۰/۷۷). از سوی دیگر، با افزایش طول فصل رشد و تبخیر-تعرق، عملکرد دانه گندم افزایش یافت (به ترتیب ضریب همبستگی برابر با +۰/۷۹ و +۰/۵۰).

در مورد شهرستان رامهرمز نیز همین موضوع صدق می‌کند، به این صورت که به دلیل طول فصل رشد کم (۱۴۵/۱ روز) مقدار تبخیر-تعرق در مقایسه با دیگر مناطق کمتر است. نتایج جدول همبستگی (جدول ۵) نیز نشان دهنده معنی‌دار بودن رابطه این دو صفت در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد (ضریب همبستگی ۰/۱۷+). نتایج نشان داد که تبخیر-تعرق تجمعی در آینده تحت سناریوهای مختلف انتشار در مقایسه با دوره پایه کاهش می‌یابد (۵ درصد). دلایل مختلفی برای این کاهش وجود دارد که می‌توان به کاهش هدایت روزنه‌ای به دلیل افزایش غلظت CO₂ و کاهش طول فصل رشد در اثر افزایش دما اشاره کرد. در شرایط تغییر اقلیم، به‌طور میانگین در همه سناریوهای مورد بررسی بیشترین و کمترین مقدار تبخیر-تعرق تجمعی در طول فصل رشد مربوط به ایزده (۴۰۹/۵۶ میلی‌متر) و رامهرمز (۳۷۵/۳۸ میلی‌متر) بود. نتایج تجزیه همبستگی (جدول ۶) نیز موید رابطه مثبت و معنی‌دار بین این دو صفت در سطح احتمال یک درصد است (ضریب همبستگی ۰/۴۲+).

هر دو متغیر دما و CO₂ از عوامل کلیدی مؤثر بر رشد و نمو گیاهان هستند. دمای بالا به‌تنهایی و یا همراه با افزایش CO₂ قادر است صفات فیزیولوژیک و مورفولوژیک متعددی را تحت تأثیر قرار دهد که آن‌ها نیز به‌نوبه خود رشد و عملکرد نهایی گیاه را متأثر می‌سازند (۶). غلظت CO₂ و دما در همه نقاط دنیا تقریباً به‌طور همزمان افزایش می‌یابند، بنابراین اثرات متقابل بین دما و CO₂ در بررسی‌های تغییر اقلیم و اثرات این پدیده بر تولید کشاورزی حائز اهمیت هستند (۲۳). گرم شدن هوا به‌تنهایی تبخیر-تعرق را افزایش می‌دهد، درحالی‌که هدایت روزنه‌ای کمتر ناشی از افزایش غلظت CO₂ و کاهش طول فصل رشد ناشی از افزایش دما، از افزایش تبخیر-تعرق تجمعی در طول فصل رشد گیاه جلوگیری خواهد کرد (۲۵). کوچکی و همکاران (۲۱) در یک پژوهش در ایران نشان دادند که تبخیر-تعرق نخود در شرایط تغییر اقلیم در مقایسه با دوره پایه کاهش‌یافت اما مقدار این متغیر در آفتابگردان افزایشی بود. نتایج ال‌وی و همکاران (۲۴) در یک مطالعه در چین بر روی گندم آبی و دیم نشان داد که تبخیر-تعرق تجمعی در طول فصل رشد در بیشتر مناطق مورد بررسی تحت شرایط تغییر اقلیم آینده افزایش خواهد یافت. آن‌ها بیان کردند که الگوی مکانی تغییرات تبخیر-تعرق تجمعی کاملاً با الگوی مکانی تغییر عملکرد دانه گندم آبی و دیم مشابه است.

نتایج این تحقیق نشان داد که در دوره پایه کمترین کارایی مصرف آب در مناطق مورد بررسی در امیدیه (۱۲/۷) کیلوگرم در هکتار به ازای هر میلی‌متر آب) و بیشترین مقدار در ایزده (۱۵/۳۲) کیلوگرم در هکتار به ازای هر میلی‌متر آب) مشاهده شد. در شرایط تغییر اقلیم

آینده نیز شرایط به همین شکل بود و به‌طور میانگین در همه سناریوها بیشترین مقدار کارایی مصرف آب در شهرستان ایزده (۱۸/۹۳) کیلوگرم در هکتار به ازای هر میلی‌متر آب) و کمترین مقدار در امیدیه (۱۵/۷۶) کیلوگرم در هکتار به ازای هر میلی‌متر آب) به دست آمد. گندم گیاهی C₃ بوده و در شرایط تغییر اقلیم و افزایش غلظت CO₂ در صورت مناسب بودن دمای منطقه، عملکرد آن افزایش می‌یابد (۱۳). نتایج بررسی حاضر نیز نشان داد که عملکرد دانه گندم در شرایط تغییر اقلیم افزایش خواهد یافت. همچنین با توجه به نتایج شبیه‌سازی نشان داده شد که تبخیر-تعرق در طول فصل رشد در مناطق مورد بررسی نیز روند کاهشی داشت. بر این اساس، با توجه به معادله کارایی مصرف آب (معادله ۲)، به نظر می‌رسد افزایش عملکرد دانه از یک سو (۹۵۳/۹ کیلوگرم در هکتار) و کاهش تبخیر-تعرق از سوی دیگر (۲۴/۲ میلی‌متر)، باعث افزایش ۳/۲۴ کیلوگرم در هکتار به ازای هر میلی‌متر کارایی مصرف آب در آینده شده است. در مطالعه حاضر غلظت CO₂ در سناریوهای مختلف نسبت به دوره پایه افزایش یافته و این افزایش غلظت در طول فصل، رشد و نمو گندم را تحت تأثیر قرار داده است. در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم، غلظت CO₂ تحت سناریوهای B1، A1B و A2 به ترتیب به ۴۹۲، ۵۴۵ و ۵۴۱ قسمت در میلیون در نظر گرفته شده است. این افزایش CO₂ باعث کاهش هدایت روزنه‌ای و تعرق شده (۹) و در نتیجه فتوسنتز و کارایی مصرف آب را افزایش می‌دهد (۱۲). نتایج تجزیه همبستگی (جدول ۵) در دوره پایه نشان داد که رابطه معنی‌داری بین کارایی مصرف آب با تبخیر-تعرق (ضریب همبستگی ۰/۴۰+) و عملکرد دانه (ضریب همبستگی ۰/۸۱+) در سطح احتمال یک درصد وجود دارد. در شرایط تغییر اقلیم آینده نیز بین کارایی مصرف آب و عملکرد دانه (ضریب همبستگی ۰/۸۶+) در سطح احتمال یک درصد رابطه مثبت و معنی‌داری مشاهده شد (جدول ۶). نتایج یک بررسی نشان داد که تأثیر منفی افزایش دما در گندم توسط افزایش غلظت CO₂ و بارش جبران‌پذیر است (۴۳). آن‌ها بیان کردند که افزایش غلظت CO₂ از طریق افزایش میزان فتوسنتز و کارایی مصرف آب باعث افزایش عملکرد می‌شود. مو و همکاران (۲۵) در شمال چین به این نتیجه رسیدند که کارایی مصرف آب گندم ممکن است به ترتیب ۱۰ و ۷ درصد تحت سناریوهای A2 و B1 در شرایط تغییر اقلیم آینده (۲۰۲۰ تا ۲۰۸۰) در مقایسه با دوره پایه (۱۹۹۰) افزایشیافت. در یک مطالعه دیگر یانگ و همکاران (۴۴) کارایی مصرف آب را در گندم دیم مناطق نیمه‌خشک بررسی کردند. به‌طور کلی نتایج آن‌ها نشان داد که کارایی مصرف آب در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه ۱/۳-۰/۷ کیلوگرم در هکتار به ازای هر میلی‌متر آب افزایش می‌یابد.

جدول ۵- همبستگی بین صفات مختلف در دوره پایه در استان خوزستان
Table 5- Correlation between different traits in the baseline in Khuzestan province

| | عملکرد دانه Grain yield | دما Temperature | نیاز آبیاری Irrigation requirement | تبخیر-تعرق ET | کارایی مصرف آب WUE | روز پس از کاشت DAP |
|---------------------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|
| عملکرد دانه Grain yield | 1 | | | | | |
| دما Temperature | -0.31** | 1 | | | | |
| نیاز آبیاری Irrigation requirement | 0.43** | 0.19* | 1 | | | |
| تبخیر-تعرق ET | 0.84** | -0.15* | 0.73** | 1 | | |
| کارایی مصرف آب WUE | 0.81** | -0.36** | -0.01 ^{ns} | 0.40** | 1 | |
| روز پس از کاشت DAP | 0.34** | -0.92** | -0.19* | 0.17* | 0.39** | 1 |

ns: عدم تفاوت معنی دار *تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد **تفاوت معنی دار در سطح احتمال یک درصد
ns: No significant difference; *significant difference at 0.05 probability level; **significant difference at 0.01 probability level.

جدول ۶- همبستگی بین صفات مختلف تحت شرایط تغییر اقلیم در استان خوزستان
Table 6- Correlation between different traits under climate change in Khuzestan province

| | عملکرد دانه Grain yield | دما Temperature | نیاز آبیاری Irrigation requirement | تبخیر-تعرق ET | کارایی مصرف آب WUE | روز پس از کاشت DAP |
|---------------------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------|
| عملکرد دانه Grain yield | 1 | | | | | |
| دما Temperature | -0.77** | 1 | | | | |
| نیاز آبیاری Irrigation requirement | -0.14** | 0.34** | 1 | | | |
| تبخیر-تعرق ET | 0.50** | -0.44** | 0.36** | 1 | | |
| کارایی مصرف آب WUE | 0.86** | -0.63** | -0.37** | -0.01 ^{ns} | 1 | |
| روز پس از کاشت DAP | 0.79** | -0.98** | -0.37** | 0.42** | 0.67** | 1 |

ns: عدم تفاوت معنی دار *تفاوت معنی دار در سطح احتمال پنج درصد **تفاوت معنی دار در سطح احتمال یک درصد
ns: No significant difference; *significant difference at 0.05 probability level; **significant difference at 0.01 probability level.

تعرق و نیاز آبیاری گندم در دوره پایه و آینده

نیاز آبی گیاه نشان دهنده مقدار آب مورد نیاز است که گیاه مورد نظر در کل فصل رشد برای رشد کامل و محصول دهی به آن نیاز دارد. با توجه به مقدار تعرق گیاه در طول فصل رشد، نتایج شبیه سازی ها نشان داد که در شرایط تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه نیاز آبیاری گندم کاهش می یابد (جدول ۷). نتایج شبیه سازی ها نشان داد که در دوره پایه بیشترین مقدار تعرق در شهرستان ایذه (۳۰۹/۹۶ میلی متر) و کمترین مقدار در شهرستان رامهرمز (۲۷۳/۸۱ میلی متر) مشاهده شد. به طور کلی در شرایط تغییر اقلیم مقدار تعرق در همه مناطق مورد

بررسی نسبت به دوره پایه ۱۴/۲۸ میلی متر کاهش یافت. دلایل اصلی این کاهش را همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، می توان به کاهش هدایت روزنه ای ناشی از افزایش غلظت CO₂، و نیز کاهش طول فصل رشد ناشی از افزایش دمانسبت داد. برای مثال کوچکی و همکاران (۲۲) نشان دادند که در شرایط تغییر اقلیم در مشهد با متوسط افزایش دمای ۳/۳ درجه سانتی گراد، تبخیر و تعرق گندم کاهش خواهد یافت. آن ها بیان کردند که با وجود افزایش دما و نیاز به تبخیر بیشتر، به دلیل افزایش غلظت CO₂ و در نتیجه افزایش مقاومت روزنه ای مقدار تعرق کاهش می یابد. به طور متوسط کمترین و بیشترین مقدار تعرق

تجمعی در آینده استان خوزستان در شهرستان رامهرمز (۲۵۵/۵ میلی‌متر) و دزفول (۲۸۸/۶۲ میلی‌متر) مشاهده شد.

جدول ۷- نیاز آبیاری و تعرق طول فصل در دوره پایه و سناریوهای آینده در مناطق مورد مطالعه

Table 7- Seasonal irrigation requirement and transpiration during growing season in the baseline and future scenarios throughout all study locations

| صفت Trait | سناریو Scenario | منطقه Location | | | | | |
|---|--------------------|-------------------|--------------------|-----------------|--------------|--------------------|----------------------|
| | | اهواز Ahwaz | بهبهان Behbahan | دزفول Dezful | ایذه Izeh | امیدیه Omidiyeh | رامهرمز Ramhormoz |
| تعرق (میلی‌متر) Transpiration (mm) | Baseline | 289.45 | 290.58 | 303.05 | 309.96 | 282.32 | 273.81 |
| | B1 | 277.85 | 283.14 | 292.94 | 291.11 | 279.42 | 258.34 |
| | A1B | 272.06 | 278.78 | 286.11 | 285.45 | 276.24 | 253.94 |
| | A2 | 272.57 | 278.29 | 286.83 | 287.02 | 276.14 | 254.23 |
| نیاز آبیاری (میلی‌متر) Irrigation requirement (mm) | Baseline | 337.28 | 317.24 | 301.02 | 281.99 | 318.49 | 296.6 |
| | B1 | 320.52 | 304.82 | 280.71 | 233.75 | 306.49 | 268.67 |
| | A1B | 313.17 | 297.82 | 271.22 | 222.38 | 299.67 | 259.62 |
| | A2 | 312.48 | 295.63 | 267.84 | 221.77 | 298.88 | 256.58 |

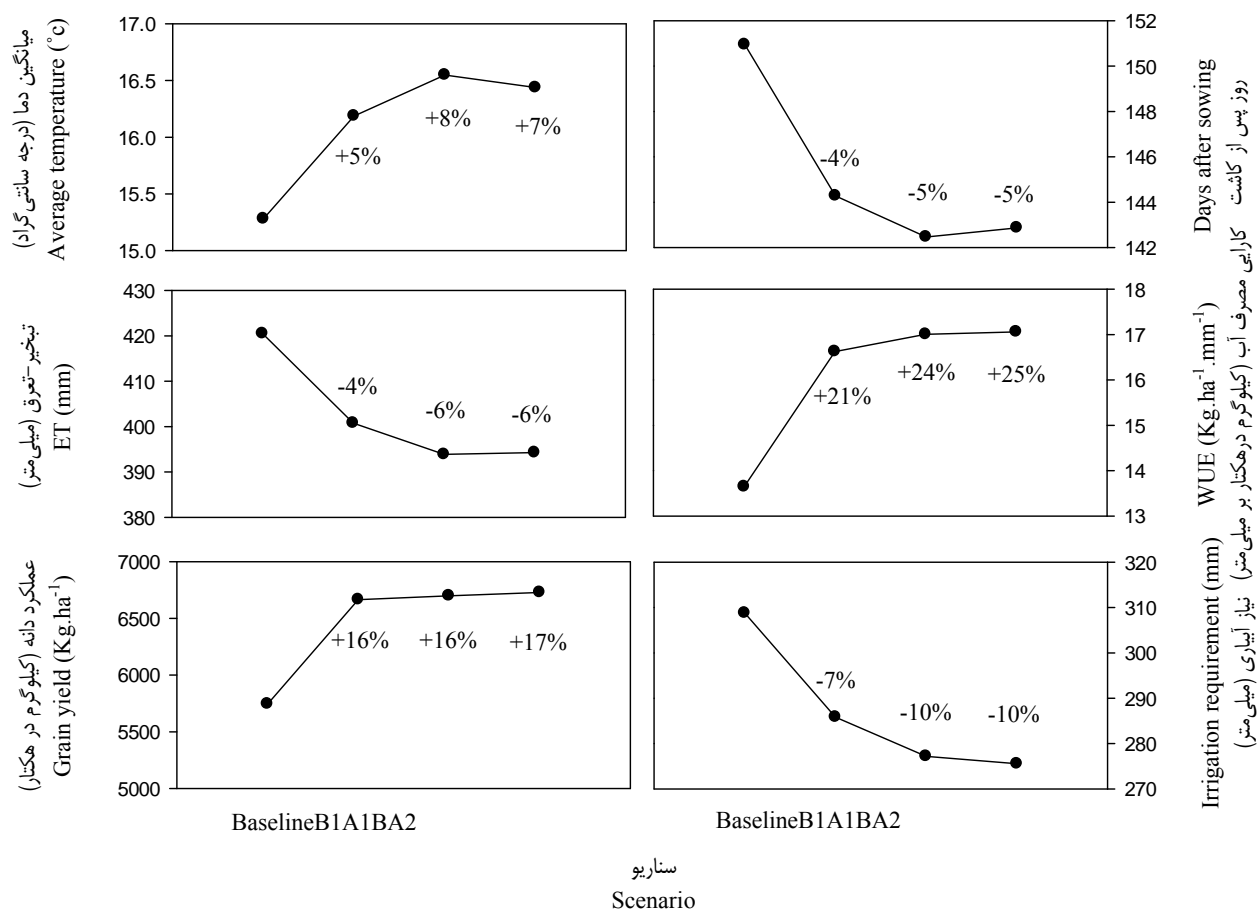
فصل رشد، تبخیر-تعرق و نیاز آبیاری عملکرد نخود در شرایط آبی کاهش خواهد یافت. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد که در همین شرایط، طول فصل رشد آفتاب‌گردان کاهش یافته اما تبخیر-تعرق، نیاز آبیاری و عملکرد دانه افزایش خواهد یافت. نه‌بندانی و سلطانی (۲۷) بیان کردند که تحت شرایط سناریوهای مختلف اقلیمی (کاهش دما، افزایش دما و افزایش CO₂) در گیاه سویا، افزایش یک تا سه درجه سانتی‌گراد دما منجر به افزایش نیاز آبیاری به میزان ۳۰ میلی‌متر خواهد شد. افزایش دما منجر به افزایش در ارتفاع بوته و تعداد شاخه و سطح برگ در سویا شده و بنابراین تعرق در این شرایط افزایش یافته و نیاز آبیاری افزایش می‌یابد. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد که افزایش دما از سه تا هشت درجه سانتی‌گراد نسبت به شرایط کنونی سبب کاهش نیاز آبیاری به میزان ۹۰ میلی‌متر خواهد شد. دلیل این کاهش نیاز آبیاری نیز افزایش دما و کاهش طول دوره رشد گیاه بود که باعث شد تعداد دفعات آبیاری و نیاز آبیاری سویا کاهش یابد. نتایج آن‌ها همچنین نشان داد که در دمای ثابت با افزایش غلظت CO₂ از ۳۵۰ به ۷۰۰ پی‌پی‌ام، کاهش بین ۳۰ تا ۴۰ میلی‌متر نیاز آبیاری قابل انتظار می‌باشد. گوهری و همکاران (۱۶) در اصفهان نشان دادند که نیاز آب آبیاری گندم، جو، ذرت و برنج در شرایط تغییر اقلیم آینده نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. آن‌ها بیان کردند که این افزایش نیاز آبیاری به دلیل افزایش دما در آینده بوده است.

به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که در استان خوزستان میانگین دما در طول فصل رشد گندم در شرایط تغییر اقلیم تحت سناریوهای B1، A1B و A2 نسبت به دوره پایه به ترتیب ۰/۹، ۱/۲۶ و ۱/۱۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد (شکل ۲). با افزایش دما در آینده به دلیل افزایش سرعت رشد، طول فصل رشد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است

در این مطالعه به‌طور کلی بیشترین و کمترین نیاز آبیاری در دوره پایه به‌ترتیب در شهرستان‌های اهواز (۳۳۷/۲۸ میلی‌متر) و ایذه (۲۸۱/۹۹ میلی‌متر) مشاهده شد. در شرایط تغییر اقلیم نیز مناطق مذکور بیشترین و کمترین نیاز آبیاری را در استان خوزستان به خود اختصاص دادند (جدول ۷). به‌طور میانگین (همه سناریوهای مورد بررسی) نیاز آبیاری در شهرستان اهواز ۳۱۵/۳۹ میلی‌متر و در ایذه ۲۲۵/۹۶ میلی‌متر برای دوره ۲۰۴۶-۶۵ شبیه‌سازی شد. یکی از دلایلی که باعث کاهش نیاز آبیاری گندم در شرایط تغییر اقلیم آینده می‌شود، کاهش طول فصل رشد این گیاه در مناطق مورد بررسی است (جدول ۴). برای مثال رحمانی و همکاران (۳۱) در یک بررسی در بیرجند تحت شرایط تغییر اقلیم (تنها افزایش دما) نتیجه گرفتند که با کوتاه‌تر شدن طول دوره رشد گندم و جو به‌موازات افزایش بارش‌ها در آینده، میزان نیاز آبی این دو گیاه در کل دوره رشد در مقایسه با دوره پایه کاهش می‌یابد. این کاهش برای گندم ۱۹/۵ و برای جو حدود ۲۲/۵ درصد در کل دوره رشد خواهد بود. به‌طور کلی در بین همه مناطق و سناریوهای مورد مطالعه در این تحقیق طول فصل رشد در مقایسه با دوره پایه ۵/۱ درصد کاهش نشان داد. کاهش طول فصل رشد نیز همان‌گونه که قبلاً بیان شد به دلیل افزایش دما (جدول ۴) در طول فصل رشد رخ می‌دهد. دلیل دیگر که باعث کاهش نیاز آبیاری گندم در آینده می‌شود، افزایش غلظت CO₂ و در نتیجه کاهش هدایت روزنه‌ای (افزایش مقاومت روزنه‌ای) است که باعث می‌شود کارایی تعرق افزایش یافته و در نهایت تعرق کاهش یابد (۳۶). لازم به ذکر است در این تحقیق هدایت روزنه‌ای شبیه‌سازی نشده، اما میزان تعرق که تابعی از آن می‌باشد در جدول ۷ ارائه شده است). کوچکی و همکاران (۲۱) در یک مطالعه در ایران مشاهده کردند که در شرایط تغییر اقلیم (افزایش دما و دو برابر شدن غلظت CO₂) در آینده، طول

دلیل افزایش کارایی مصرف آب، افزایش عملکرد و کاهش تبخیر-تعرق بود. عملکرد دانه در شرایط افزایش CO₂ روند افزایشی خواهد داشت. همان‌طور که قبلاً ذکر شد گندم گیاهی C3 بوده که در صورت مناسب بودن شرایط دمایی در طول فصل رشد، از افزایش غلظت CO₂ سود خواهد برد و باعث افزایش عملکرد این محصول خواهد شد. در سناریوهای A2 (۱۷ درصد)، A1B (۱۶ درصد) و B1 (۱۶ درصد) عملکرد دانه نسبت به دوره پایه روند افزایشی داشت. نتایج این مطالعه در مجموع نشان داد که در صورت افزایش دما و CO₂ در استان خوزستان، نیاز آبیاری گندم در مزارع این استان تحت سناریوهای A2، A1B و B1 در مقایسه با دوره پایه به ترتیب ۱۰، ۱۰ و ۷ درصد کاهش خواهد یافت.

تعداد روز پس از کاشت در سناریوهای A2 و A1B (۵- درصد) نسبت به سناریوی B1 (۴- درصد) کاهش بیشتری نشان داده است که دلیل آن، دمای بالاتر سناریوی A2 (۱۶/۴۳ درجه سانتی‌گراد) و A1B (۱۶/۵۴ درجه سانتی‌گراد) نسبت به سناریوی B1 (۱۶/۱۸ درجه سانتی‌گراد) است. نتایج نشان داد که تبخیر-تعرق در آینده نسبت به دوره پایه به دلیل افزایش غلظت CO₂، کاهش هدایت روزنه‌ای و همچنین طول فصل رشد کمتر کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که این کاهش در سناریوهای A2 و A1B (۶- درصد) نسبت به سناریوی B1 (۴- درصد) بیشتر است. کارایی مصرف آب در شرایط تغییر اقلیم تحت سناریوهای B1 (۲۱ درصد)، A1B (۲۴ درصد) و A2 (۲۵ درصد) نسبت به دوره پایه روند افزایشی داشت.



شکل ۲- تغییرات عملکرد دانه، تبخیر و تعرق تجمعی در طول فصل رشد، متوسط دما از کاشت تا برداشت، نیاز آبیاری، کارایی مصرف آب و روز پس از کاشت گندم از دوره پایه به سمت سناریوهای آینده در استان خوزستان

Figure 2- Changes in grain yield, seasonal cumulative ET, average temperature (sowing to harvest), irrigation requirement, water use efficiency and days after sowing from the baseline toward future scenarios in Khuzestan province

CO₂ بر کارایی مصرف آب، نیاز آبی و رشد و نمو گندم آبی در استان خوزستان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که

نتیجه‌گیری کلی

در مطالعه حاضر اثر تغییر اقلیم ناشی از افزایش دما و غلظت

عملکرد دانه و همچنین کاهش تبخیر-تعرق در شرایط تغییر اقلیم، کارایی مصرف آب $3/24$ کیلوگرم در مترمربع افزایش یافته و از $13/64$ کیلوگرم در هکتار به ازای هر میلی‌متر در دوره پایه به $16/89$ کیلوگرم در هکتار به ازای هر میلی‌متر (۲۳ درصد افزایش کارایی مصرف آب) در دوره 2050 می‌رسد. در نهایت با توجه به افزایش دما و CO_2 ، کاهش طول فصل رشد و کاهش تبخیر-تعرق نتایج نشان داد که نیاز آبیاری گندم در شرایط تغییر اقلیم آینده $29/26$ میلی‌متر کاهش یافته و از $308/77$ میلی‌متر در دوره پایه به $279/51$ میلی‌متر در دوره 2050 (۹ درصد کاهش نیاز آبیاری) می‌رسد. با توجه به این که روند تغییر اقلیم در حال وقوع است، و کشور ما در منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع شده و با بحران کم‌آبی روبرو خواهد شد، لذا می‌توان با برآورد نیاز آبیاری و کارایی مصرف آب محصولات مختلف در مناطق مستعد کشاورزی اقدامات لازم برای جلوگیری از هدر رفتن آب و مدیریت بهینه آن جهت نیل به عملکرد بیشتر گام‌های مؤثری در آینده برداشت.

میانگین دمای طول فصل رشد گندم در استان خوزستان تحت هر سه سناریوی مورد بررسی ($A1B$ ، $B1$ و $A2$) $1/1$ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و از $15/28$ درجه سانتی‌گراد در دوره پایه به $16/39$ درجه سانتی‌گراد (۷ درصد افزایش دما) در دوره 2050 می‌رسد. با افزایش میانگین دما در طول فصل رشد، طول فصل رشد در استان خوزستان $7/74$ روز کاهش یافته و از $150/95$ روز در دوره پایه به $143/21$ روز (۵ درصد کاهش طول فصل رشد) در دوره 2050 می‌رسد. با توجه به این موضوع که دلیل اصلی تغییر اقلیم افزایش غلظت CO_2 است و همچنین $C3$ بودن گیاه گندم، مقدار تبخیر-تعرق به دلیل کاهش هدایت روزنه‌ای و کاهش طول فصل رشد $24/2$ میلی‌متر کاهش یافته و از $420/52$ میلی‌متر در دوره پایه به $396/32$ میلی‌متر (۵ درصد کاهش تبخیر-تعرق) در دوره 2050 رسید. نتایج شبیه‌سازی‌ها همچنین نشان داد که عملکرد دانه گندم در این استان به‌طور میانگین $953/9$ کیلوگرم در هکتار افزایش می‌یابد و از $5745/16$ کیلوگرم در هکتار در دوره پایه به $6699/07$ کیلوگرم در هکتار (۱۶ درصد افزایش عملکرد) در دوره 2050 می‌رسد. با افزایش

منابع

- Aggarwal P.K. 1994. Simulating the effect of climatic factors, genotype and management on productivity of wheat in India. Agricultural Research Institute, pp. 1-11.
- Alizadeh A., Sayari N., Hesami Kermani M.R., Bannayan Aval M., and Farid Hossaini A. 2010. Assessment of Climate Change Potential Impacts on Agricultural Water Use and Water Resources of Kashaf rood basin. Journal of water and soil, 24(4): 815-835. (in Persian with English abstract).
- Angstrom A. 1924. Solar and terrestrial radiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 50:121-5.
- Anonymous. 2014. Agricultural statistics, 2013-2014, volume 1. Available at: <http://www.maj.ir/Portal/Home/>.
- Ashraf B., Mousavi-Baygi M., Kamali G.A., and Davari K. 2012. Evaluation of wheat and Sugar beet water use Variation due to Climate Change Effects in two Coming Decades in the selected plains of Khorasan Razavi. Iranian Journal of Irrigation and drainage, 2(6): 105-117. (in Persian with English abstract).
- Bannayan M. 2009. Crop models efficiency and performance under elevated atmospheric CO_2 . Journal of Water and Soil, 23(4): 115-126. (in Persian with English abstract).
- Bannayan M., Lotfabadi S., Sanjani S., Mohammadian A., and Aqaalikhani M. 2011. Effects of precipitation and temperature on cereal yield variability in northeast of Iran. International Journal of Biometeorology, 55: 387-401.
- Bos M.G. 1985. Summary of ICID definitions of irrigation efficiency ICID Bull, 34: 28-31.
- de Boer H.J., Lammertsma E.I., Wagner-Cremer F., Dilcher D.L., Wassen M.J., and Dekker S.C. 2011. Climate forcing due to optimization of maximal leaf conductance in subtropical vegetation under rising CO_2 . Proceeding national academy sciences, 108:4041-40466.
- Deihimfard R., Eyni Nargeseh H., and Haghighat M. 2016. Zoning of drought incident in Fars province under climate change conditions using standardized precipitation index. Journal of Agreology, 7(4): 528-546. (In Persian with English abstract).
- Deihimfard R., Nassiri Mahallati M., and Koocheki A. 2015. Yield gap analysis in major wheat growing areas of Khorasan province, Iran, through crop modelling. Field Crops Research, 184:28-38.
- Drake B.G., and González-Meler M.A. 1997. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO_2 ? Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 48:609-639.
- Eyni Nargeseh H., Deihimfard R., Soufizadeh S., Haghighat 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(4): 203-224. (In Persian with English abstract).

14. Farhanfar S., Bannayan M., Khazaei H.R., and Mousavi Baygi M. 2015. Vulnerability assessment of wheat and maize production affected by drought and climate change. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 13: 37- 51.
15. Ghorbani K., Zakerinia M., and Hezarjaribi A. 2013. The effect of climate change on water requirement of soybean in Gorgan. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2(1): 60-72. (in Persian with English abstract).
16. Gohari A., Eslamian S., Abedi-Koupaei J., Massah Bavani A., Wang D., and Madani K. 2013. Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of the Total Environmental*, 442:405-419.
17. Hajarpour A., Soltani A., Zeinali E., and Sayyedi F. 2013. Simulating the impact of climate change on production of Chickpea in rainfed and irrigated condition of Kermanshah. *Journal of Plant Production*, 20 (2):235-252. (in Persian with English abstract)
18. Hoogenboom G., Jones J.W., Porter C.H., Wilkens P.W., Boote K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A., and Tsuji G.Y. (Editors). 2003. *Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Vol. 1: Overview*. University of Hawaii, Honolulu, HI.
19. IPCC. 2014 *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp 151.
20. Keating B.A., Carberry P.S., Hammer G.L., Probert M.E., Robertson M.J., Holzworth D., Huth N.I., Hargreaves J.N.G., Meinke H., Hochman Z., McLean G., Verburg K., Snow V., Dimes J.P., Silburn M., Wang E., Brown S., Bristow K.L., Asseng S., Chapman S., McCown R.L., Freebairn D.M., and Smith C.J. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18:267– 288.
21. Koocheki A., Nassiri M., Soltani A., Sharif H, and Ghorbani R. 2006. Effects of climate change on growth criteria and yield of sunflower and chickpea crops in Iran. *Climate Research*, 30: 247-253.
22. Koocheki A., Nassiri M., Sharifi H., and Zand E. 2001. Simulation of growth, phenology and production of Wheat cultivars in effect of climate change under Mashhad conditions. *Journal of Desert*, 6(2): 117-127. (in Persian with English abstract).
23. Ludwig F., and Asseng S. 2006. Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. *Agricultural Systems*, 90: 159-179.
24. Lv Z., Lio X., Cao W., and Zhu Y. 2013. Climate change impacts on regional winter wheat production in main wheat production regions of China. *Agricultural of Forest Meteorology*, 171-172: 234-248.
25. 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 Environment*, 134:67–78.
26. Nakicenovic N., and Swart R. 2000. *Emissions scenarios. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
27. Nehbandani A.R., and Soltani A. 2016. Simulate the Effect of Climate Change on Development, Irrigation Requirements and Soybean Yield in Gorgan. *Journal of water and soil*, 30(1): 77-87. (in Persian with English abstract).
28. Olesen J.E., Trnka M., Kersebaum K.C., Skjelvag A.O., Seguin B., Peltonen-Sainio P., Rossi F., Kozyra J., and Micale F. 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34:96-112.
29. Prudhomme C., Wilby R.L., Crooks S., Kay A.L., and Reynard N.S. 2010. Scenario-neutral approach to climate change impact studies: application to flood risk. *Journal of Hydrology*, 390:198-209.
30. Rahimi D., and Salahshour F. 2014. Estimation of Water Requirement, Evaporation and Potential Transpiration of Brassica Napus L Plant in Ahwaz Town Using CROWPWAT Model. *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 2(4):1377-1387.
31. Rahmani M., Jami Al-Ahmadi M., Shahidi A., and Hadizadeh Azghandi M. 2016. Effects of climate change on length of growth stages and water requirement of wheat (*Triticum aestivum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) (Case study: Birjand plain). *Journal of Agroecology*, 7(4):443-460. (in Persian with English abstract).
32. Reidsma P., Ewert F., Lansink A.O., and Leemans R. 2010. Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: the importance of farm level responses. *European Journal of Agronomy*, 32:91–102.
33. SAS Institute. 2001. *SAS System*, eighth ed. SAS Inst., Cary, NC.
34. Semenov M.A., and Barrow E.M. 2002. *LARS-WG: A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies*, Version 3.0, User's Manual.
35. SigmaPlot. 2003. Published by systat software. *SigmaPlot 12.5 User's Guid*.
36. Wall G.W., Garcia R.L., Wechsung F., and Kimball B.A. 2011. Elevated atmospheric CO₂ and drought effects on leaf gas exchange properties of barley. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 144(2):390-404.
37. Wall B.H. "TAMET". 1977: *Computer program for processing meteorological data.* CSIRO Australia. Division of Tropical Crops and Pastures. *Tropical Agronomy Technical Memorandum*, 4, 13p.

38. Wallach D., and Goffinet B. 1987. Mean squared error of prediction in models for studying economic and agricultural systems. *Biometrics*, 43:561-576.
39. Wang E., Robertson M.J., Hammer G.L., Carberry P.S., Holzworth D., Meinke H., Chapmesan S.C., Hargreaves J.N.G., Huth N.I., and Mclean G. 2002. Development of generic crop model template in the cropping system model APSIM. *European journal of Agronomy*, 18:121-140.
40. Wang J., Wang E., and Liu D.L. 2011. Modelling the impact of climate change on wheat yield and field water balance over the Murry-Darling Basin in Australia. *Theoretical and Applied Climatology*, 104:285-300.
41. Wetterhall F., Bardossy A., Chen D., Halldin S., and Xu C. 2009. Statistical downscaling of daily precipitation over Sweden using GCM output. *Theoretical and Applied Climatology*, 96: 95-103.
42. Wilby R.L., and Wigley T.M.L. 1997. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21: 530-548.
43. Wilcox J., and Makowski D. 2014. A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies. *Field Crops Research*, 156(2):180-190.
44. Yang Y., Liu D.L., Rajin Anwar M., Leary G., Macadam I., and Yang Y. 2016. Water use efficiency and crop water balance of rainfed wheat in a semi-arid environment: sensitivity of future changes to projected climate changes and soil type. *Theoretical and Applied Climatology*, 123:565-579.



Modeling the Effects of Climate Change on Irrigation Requirement and Water Use Efficiency of Wheat Fields of Khuzestan Province

R. Deihimfard^{1*} - H. Eyni Nargeseh² - Sh. Farshadi³

Received:03-09-2016

Accepted:05-12-2016

Introduction: One of the most important consequences of the future climate change is its impact on water use and water use efficiency (WUE) in agriculture which could challenge the water resources management. Khuzestan province is one of the most important areas of crops production in Iran particularly for wheat, so that 15.73 percent of total irrigated wheat production and 8.85 percent of total arable land is located in this province. Therefore, investigating climate change effects on irrigated wheat production, WUE and irrigation requirement will be necessary in the Khuzestan province. In this context, this study was conducted to simulate the growth and yield of irrigated wheat under climate change conditions, and to calculate WUE and irrigation requirement in this province.

Materials and Methods: The current study was done at six locations of Khuzestan province in southwestern Iran, included Ahwaz, Behbahan, Dezful, Izeh, Omidiyeh and Ramhormoz. Historical daily weather data including solar radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), precipitation (mm) and maximum and minimum temperatures ($^{\circ}\text{C}$) for the baseline period gathered for each study location from their established meteorological stations. To predict the climatic variables in the future, HadCM3 climate model was applied under three emission scenarios (B1, A1B and A2) for one future time period (2046-65). The observed historical daily weather data at each location was used to generate the future scenario files to be applied in LARS-WG (Long Ashton Research Station-Weather Generator) program. These parameters are necessary for future projection of weather variables. The downscaled daily weather data obtained from the LARS-WG included maximum and minimum temperatures, rainfall and solar radiation for each period of future climate. These data are required for running crop simulation model. The Agricultural Production Systems simulator (APSIM) was used to predict the impacts of climate change on wheat yield, WUE and irrigation requirement. The model requires daily weather variables (maximum and minimum temperatures, precipitation and solar radiation), soil properties, type of genotype (as cultivar-specific parameters), and crop management information as inputs to simulate crop growth and development. In order to evaluate the climate model NRMSE (Normalized Root Mean Square Error) index was used. Finally, the outputs obtained from the model simulation experiments were analyzed using excel, SAS and Sigma Plot.

Results and Discussion: Results of climate model evaluation indicated that LARS-GW well predicted radiation (NRMSE from 0.63 to 1.67%), maximum (NRMSE from 0.63% to 1.05%) and minimum (NRMSE from 0.63% to 1.97%) temperatures. However, the accuracy in prediction of rainfall (NRMSE from 11.42% to 21.47%) was not as good as the other climatic variables. The simulation results in the baseline by APSIM-Wheat showed that maximum and minimum grain yield were obtained in the Izeh ($6764.2 \text{ Kg.ha}^{-1}$) and Omidiyeh ($5230.2 \text{ Kg.ha}^{-1}$), respectively. Under climate change conditions (rising temperature and elevated CO_2), on average, the highest and lowest grain yield were obtained in Izeh ($7755.3 \text{ Kg.ha}^{-1}$) and Omidiyeh ($6290.76 \text{ Kg.ha}^{-1}$), respectively. The simulation results in the baseline also indicated that the highest and lowest evapotranspiration (ET) were obtained in the Izeh (441.7 mm) and Ramhormoz (401.5 mm), respectively. When averaged across all future scenarios, the maximum and minimum ET were obtained in Izeh (409.56 mm) and Ramhormoz (375.38 mm), respectively. The future rising temperature will intensify the ET, whereas reducing stomata conductance due to higher CO_2 concentration in one hand, and shortening growing period due to rising temperature on the other hand, will reduce the cumulative ET in wheat. The simulation results in the baseline showed that the highest and lowest WUE were obtained in Izeh ($15.32 \text{ Kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$) and Omidiyeh ($12.7 \text{ Kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$), respectively. In climate change conditions (rising temperature and CO_2 elevated), on average the highest and lowest WUE were obtained in Izeh ($18.93 \text{ Kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$) and Omidiyeh ($15.76 \text{ Kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$), respectively. Wheat crop would be benefitted under future climate change in Khuzestan province as it is a C3 plant, and under optimal conditions (no water and nitrogen limitations), it will produce more grain because of reduced stomata conductance and increased photosynthesis and WUE owing to elevated CO_2 . Simulation results also indicated

1 and 3- Assistant Professor and M.Sc. Student in Agroecology, Department of Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, G.C., Tehran, Iran

(* - Corresponding Author Email: deihim@sbu.ac.ir)

2- PhD Candidate, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University

that under climate change conditions, on average, the highest and lowest irrigation requirement were obtained in Ahwaz (315.39 mm) and Izeh (225.96 mm), respectively. The reduced irrigation requirement of wheat under climate change conditions could be attributed to decreasing length of growing season and increasing CO₂ concentration.

Conclusion: In the current study, the effects of climate change caused by rising temperature and elevating CO₂ concentration on WUE, irrigation requirement, growth and yield of wheat were investigated in the Khuzestan province. The simulation results showed that, wheat grain yield under climate change conditions (averaged across all scenarios) will increase by 16 % compared to the baseline. In addition, WUE will be increased 23 percent owing to increasing grain yield (+16%) and decreasing ET (5%) under different scenarios. Overall, under climatic conditions of Khuzestan province in 2046-2065, WUE would be increased by 23% and irrigation requirement would be decreased by 9%. The reasons behind these increases and decreases are rising temperature (7%), elevating CO₂ concentration (up to 526 ppm for 2046-65) and decreasing the length of growing season and ET both by 5%.

Keywords: APSIM, Climate scenario, GCM, Simulation