

سازگاری گندم دیم پاییزه به تغییر اقلیم در مناطق نیمه خشک و سرد با استفاده از تاریخ کاشت بهینه و آبیاری تکمیلی

حامد عینی نرگسه^۱، سجاد رحیمی مقدم^{۲*}، خسرو عزیزی^۲، امین قرنچیک^۲، سیدرضا امیری^۴

۱- گروه علوم کشاورزی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

۳- گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه سراوان، سراوان، ایران

* مسئول مکاتبه: rahimi.s@lu.ac.ir

DOI: 10.22034/CSRAR.2023.408044.1364

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۳۰

چکیده

تغییرات اقلیمی جهانی باعث تغییرات گسترده در متغیرهای اقلیمی شده است که در نهایت بر تولیدات زراعی تأثیر می‌گذارد. در شرایط حال و تغییر اقلیم آینده، راهکارهای سازگاری مانند تاریخ کاشت بهینه و آبیاری تکمیلی می‌تواند به یک تولید پایدار در سیستم‌های کشت دیم منجر شود. در این تحقیق اثرات تاریخ‌های کاشت (۹ مهر، ۲۳ مهر و ۸ آبان) و رژیم‌های آبیاری (دیم، آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی و آبیاری تکمیلی در مرحله پر شدن دانه) بر عملکرد دانه گندم در پنج شهرستان استان کردستان در دوره پایه و تغییر اقلیم آینده (پنج مدل گردش عمومی تحت سناریوی RCP8.5) با استفاده از مدل APSIM-Wheat ارزیابی شد. میانگین عملکرد دانه گندم در استان کردستان در دوره پایه برابر ۴/۶۳ تن در هکتار بود. به‌طور کلی در همه شهرستان‌های استان کردستان (بجز سنندج) بیشترین عملکرد دانه در دوره پایه در تاریخ کاشت ۹ مهر بدست آمد در حالی که در شرایط تغییر اقلیم، گندم بهترین عملکرد را در تاریخ کاشت ۲۳ مهر داشت. در شهرستان سنندج در دوره پایه و تغییر اقلیم بالاترین عملکرد دانه به ترتیب از کاشت گندم در تاریخ‌های ۲۳ مهر و ۸ آبان حاصل شد. در شرایط تغییر اقلیم، عملکرد دانه گندم در رژیم‌های آبیاری در مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه در مقایسه با رژیم دیم ۸/۷ درصد افزایش یافت. نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب تاریخ کاشت حدواسط (۲۳ مهر)×آبیاری تکمیلی در مراحل گل‌دهی/پر شدن دانه به‌عنوان بهترین راهکار مدیریتی تحت شرایط تغییر اقلیم آینده شناخته شد و می‌تواند در مناطق با اقلیم نیمه خشک و سرد کشور پیشنهاد گردد.

واژه‌های کلیدی: بارش فصلی، مدل‌سازی، مراحل رشد زایشی، میانگین دمای روزانه

مقدمه

نهایت بر تولیدات زراعی تأثیر می‌گذارد (Kheiri et al., 2018). بر همین اساس، راهکارهای سازگاری مانند انتخاب ژنوتیپ‌های پرمحصول (Sengxua et al., 2017)، تاریخ کاشت بهینه (Amiri et al., 2020) و آبیاری تکمیلی (Attia et al., 2016; Amiri et al., 2021) می‌تواند منجر به تولید پایدار در سیستم‌های کشت دیم شود.

در سطح مزرعه، مدیریت تقویم کشت از طریق تغییر تاریخ کاشت یکی از راهبردهای سازگاری برای کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی بر عملکرد محصول است (Turrall et al., 2011). تولید گندم دیم نه‌تنها به رطوبت اولیه خاک بستگی دارد (Nassiri et al., 2006) بلکه تحت تأثیر میانگین دمای روزانه و توزیع و میزان بارندگی فصلی نیز قرار می‌گیرد (Bannayan and Eyshi Rezaei, 2014; Kheiri et al.,)

گندم دیم (*Triticum aestivum* L.) بیش از ۳/۴ میلیون هکتار از اراضی زیر کشت ایران را پوشش می‌دهد و نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی ایفا می‌کند. در اکوسیستم‌های زراعی ایران، عملکرد دانه گندم دیم از ۲۵۲ تا ۲۶۵۹ کیلوگرم در هکتار متغیر است که این موضوع نشان‌دهنده شکاف بزرگ در مناطق زیر کشت گندم دیم از نظر عملکرد دانه در واحد سطح است. از سوی دیگر، کل تولید گندم دیم عمدتاً تحت تأثیر شرایط محیطی، به ویژه میزان و توزیع بارندگی در مناطق خشک و نیمه خشک قرار می‌گیرد (Eyshi Rezaei and Bannayan, 2012; Nouri et al., 2017). این در حالی است که تغییرات اقلیمی جهانی باعث تغییرات گسترده در متغیرهای اقلیمی مانند بارندگی و دما شده است (IPCC, 2018)، که در

(Singh *et al.*, 2016). نتایج یک تحقیق در نگزاس آمریکا نشان داد که آبیاری تکمیلی به میزان ۱۰۰ میلی‌متر در مرحله چکمه‌ای شدن عملکرد گندم را در مقایسه با شرایط دیم ۳۵ درصد افزایش داد در حالی که ۱۴۰ میلی‌متر آبیاری تکمیلی در مرحله پر شدن دانه ۶۸ درصد عملکرد دانه بالاتری در مقایسه با تیمار دیم تولید کرد.

تحقیقات در بخش کشاورزی با استفاده از داده‌های بلند مدت برای طیف وسیعی از شرایط اقلیمی می‌تواند درک عمیق‌تری از شرایط هر منطقه را ارائه دهد (Chenu *et al.*, 2017; Eyni-Nargeseh *et al.*, 2020). مدل‌های شبیه‌سازی رشد مبتنی بر فرآیند را می‌توان برای بررسی اثرات اقلیم و سناریوهای مدیریتی و برهمکنش آن‌ها بر گیاهان در نظر گرفت (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2019; Amiri *et al.*, 2020). مدل‌های زراعی در حال تبدیل شدن به یک ابزار ارزشمند برای افزایش درک اکولوژی و فیزیولوژی محصولات زراعی هستند و می‌توانند برای بررسی و بهینه‌سازی فعالیت‌های مدیریتی مانند تاریخ کاشت (Dong *et al.*, 2014; Nouri *et al.*, 2017) و آبیاری (Attia *et al.*, 2016) بکار روند. شبیه‌ساز سیستم‌های تولید کشاورزی (APSIM) یک مدل رشدی است که توسط واحد تحقیقات سیستم‌های تولید کشاورزی (APSRU) در استرالیا طراحی شده است و توانایی بالایی در شبیه‌سازی دقیق رشد و نمو گیاهان در سطح مزرعه دارد (Keating *et al.*, 2003). مدل APSIM به طور گسترده برای محصولات مختلف مانند گندم، ذرت و کلزا به ویژه در محیط‌های خشک و نیمه خشک ایران با در نظر گرفتن تنوع آب و هوا، تاریخ کاشت و رژیم آبیاری آزمایش شده است (Deihimfard *et al.*, 2018; Eyni-Nargeseh *et al.*, 2021b).

با توجه به تغییرات مداوم اقلیمی و اثرات آن بر بخش کشاورزی به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، ارائه راهکارهای سازگاری برای کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم و افزایش تولیدات کشاورزی اجتناب‌ناپذیر است. بر این اساس، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تاریخ کاشت و آبیاری تکمیلی بر عملکرد و رشد ارقام بهار و پاییزه در اکوسیستم‌های کشاورزی گندم دیم ایران تحت شرایط پایه و تغییرات اقلیمی آبی با استفاده از مدل APSIM-Wheat انجام شد.

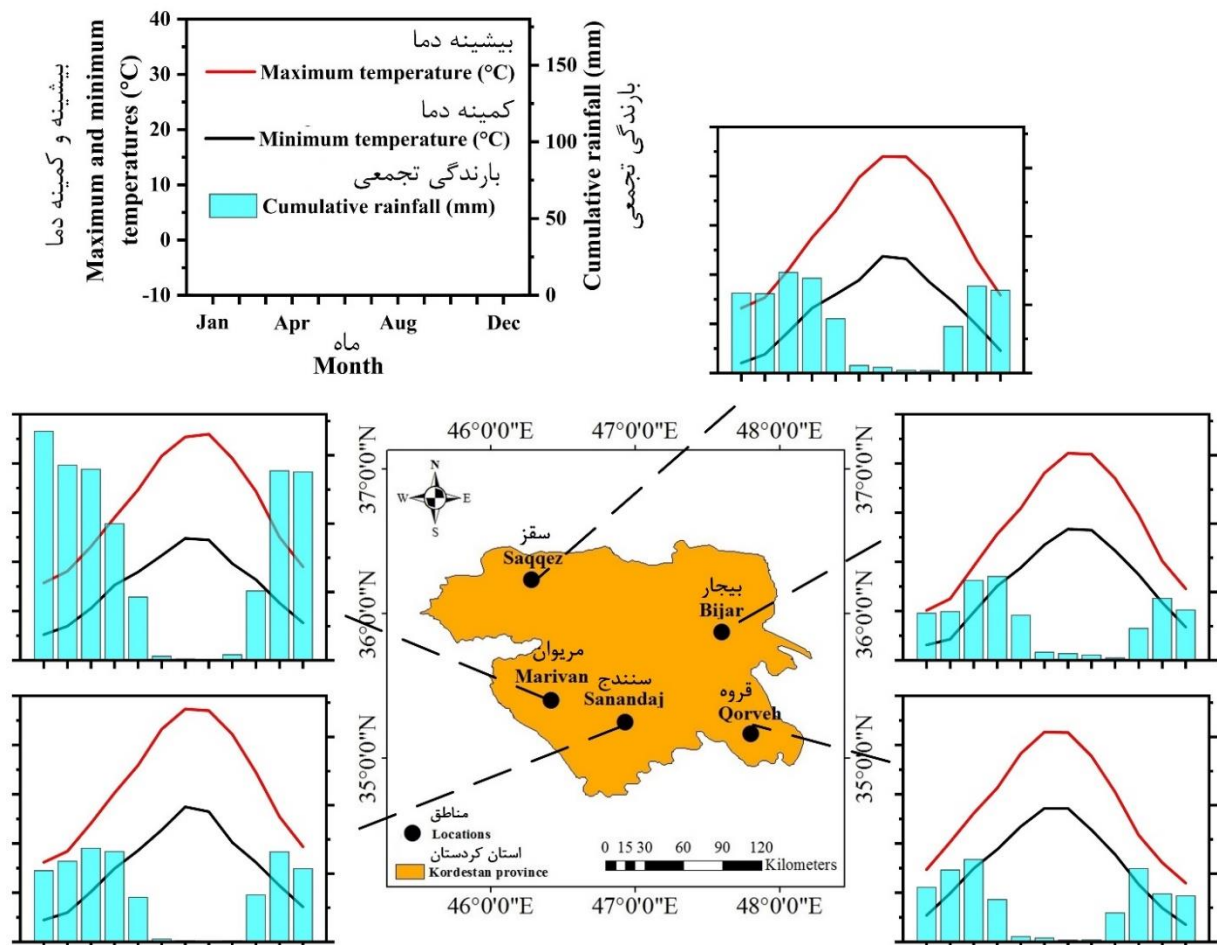
(Arredondo *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2018). در این راستا، میزان رطوبت خاک در اوایل فصل رشد که از طریق تنظیم تاریخ کاشت تأمین می‌شود، همبستگی مثبت بالایی با عملکرد دانه دارد و می‌تواند عملکرد محصول را بهبود بخشد (Hai-dong *et al.*, 2017). علاوه بر تغییر تاریخ کاشت، آبیاری تکمیلی نیز می‌تواند یک روش مدیریتی مؤثر برای افزایش عملکرد دانه و هم‌چنین حفظ منابع آب، به ویژه در اکوسیستم‌های کشاورزی گندم دیم باشد. آبیاری تکمیلی به‌عنوان یکی از شیوه‌های مدیریتی مورد استفاده در محیط‌های مستعد خشکسالی برای تثبیت تولید محصول و جلوگیری از نوسانات تولید محصولات دیم استفاده می‌شود (Feres and Soriano, 2007; Amiri *et al.*, 2021). در این رویکرد، آبیاری فقط در مراحل مهم رشد گیاه در مناطقی که منابع آب محدود است اعمال می‌شود (Amiri *et al.*, 2016; Shang *et al.*, 2020).

تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه تأثیر تاریخ کاشت و آبیاری تکمیلی بر عملکرد محصولات مختلف تحت شرایط تغییر اقلیم به انجام رسیده است. در تحقیقی با بررسی اثرات تغییر اقلیم آینده بر تولید گندم دیم در شمال غرب و غرب ایران گزارش شد که تغییر فعالیت‌های زراعی مانند تاریخ کاشت می‌تواند به عنوان یک راهکار سازگاری برای بهبود در تولید گندم دیم در آینده در نظر گرفته شود (Nassiri *et al.*, 2006). در مطالعه‌ای دیگر گزارش شد که به تعویق انداختن تاریخ کاشت می‌تواند اثرات نامطلوب تغییرات اقلیمی آبی بر عملکرد گندم دیم را جبران کند که عمدتاً این موضوع به دلیل تطابق دوره رشد گیاه با توزیع بارندگی در غرب و شمال غرب ایران طی دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ است (Nouri *et al.*, 2017). در پژوهشی اثرات رژیم‌های مختلف آبیاری تکمیلی در مراحل گل‌دهی و پر شدن غلاف بر عملکرد نخود در شمال شرق ایران ارزیابی و گزارش شد عملکرد دانه در مقایسه با تیمار دیم به ترتیب ۴۱ تا ۱۳۹ درصد و ۱۳ تا ۶۶ درصد افزایش یافت (Amiri *et al.*, 2016). در پژوهشی دیگر اثرات تاریخ‌های کاشت و رژیم‌های آبیاری مختلف بر عملکرد دانه گندم دیم در پنجاب هند بررسی و گزارش شده که عملکرد دانه در تاریخ‌های کاشت دیر هنگام به دلیل وزن و تعداد دانه کمتر کاهش یافت و دلیل این افت عملکرد هم‌زمانی دوره پر شدن دانه با درجه حرارت‌های گرم در انتهای فصل عنوان شد (Balwinder-)

مواد و روش‌ها
منطقه مورد مطالعه

اقلیمی بلند مدت ۳۱ ساله (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰) شامل دماهای بیشینه و کمینه و بارش و همچنین مختصات جغرافیایی مناطق مورد بررسی در شکل ۱ ارائه شده است. مناطق مورد مطالعه بر اساس سطح زیر کشت، تنوع اقلیمی و دسترسی به داده‌های آب و هوایی (بارش، تعداد ساعات آفتابی، و دماهای کمینه و بیشینه) انتخاب شدند. این مناطق بر اساس طبقه‌بندی مبتنی بر روش یونسکو (UNESCO, 1979) در طبقه اقلیمی نیمه‌خشک و سرد قرار می‌گیرند.

تحقیق حاضر در پنج شهرستان استان کردستان (بیجار، مریوان، سقز، قروه و سنندج) به‌عنوان قطب اصلی تولید گندم دیم کشور به انجام رسید. کردستان یکی از استان‌های ایران واقع در غرب کشور است که از شمال به استان‌های آذربایجان غربی و زنجان، از شرق به همدان و زنجان، از جنوب به کرمانشاه و از غرب به کشور عراق محدود می‌شود و حدود ۱/۷ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است. متغیرهای



شکل ۱- بارندگی تجمعی ماهانه و دماهای کمینه و بیشینه در ایستگاه‌های ۵ مورد مطالعه

Figure 1- Monthly cumulative rainfall, maximum, and minimum temperatures of 5 studied stations

مورد استفاده قرار گرفت. این مدل توسط محققین استرالیایی طراحی گردیده است و توانایی بالایی در شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی مختلف از جمله گندم دارد. زیر مدل گندم (APSIM-Wheat) رشد و نمو را در مقیاس روزانه

توصیف مدل رشدی و داده‌های مدیریتی، خاکی و آب و هوایی

در این تحقیق برای پیش‌بینی رشد و نمو گندم دیم، سیستم شبیه‌ساز تولید کشاورزی (APSIM)، نسخه ۷/۱۰

شبیه‌سازی می‌کند و به عوامل مختلفی مانند آب و هوا (شامل بارش، تابش و دما)، خاک (شامل آب و نیتروژن خاک)، ضرایب ژنتیکی و اطلاعات مدیریتی مربوط به کاشت محصول زراعی پاسخ می‌دهد (Keating *et al.*, 2003).

داده‌های آب و هوایی که در این تحقیق استفاده شد شامل بارش (میلی‌متر)، تعداد ساعات آفتابی، و دماهای کمینه و بیشینه (درجه سانتی‌گراد) از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ بودند. این متغیرهای آب و هوایی از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شدند. این متغیرها یکی از ورودی‌های چهارگانه مورد نیاز مدل APSIM هستند. از آنجایی که در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی داده‌های پرت و ثبت نشده در برخی از روزها وجود دارد، این داده‌ها با استفاده از برنامه WeatherMan (Hoogenboom *et al.*, 2003) اصلاح و بازسازی شدند. همان‌گونه که ذکر شد، یکی از متغیرهای آب و هوایی که به‌عنوان ورودی مورد نیاز مدل APSIM استفاده می‌شود تابش است، اما این متغیر در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی ثبت نمی‌شود و بجای آن تعداد ساعات آفتابی ثبت می‌گردد. بر همین اساس و با استفاده از تعداد ساعات آفتابی در هر روز، تابش روزانه در هر ایستگاه با استفاده از معادله آنگستروم (معادله ۱) (Prescott, 1940) تخمین زده شد:

$$R_s = (a + b \times n/N)R_a \quad (1)$$

در این معادله R_s ، n ، N و R_a به ترتیب تابش روزانه (مگاژول در متر مربع)، تعداد ساعات آفتابی، بیشینه تعداد ساعات آفتابی و تابش فرازمینی هستند. هم‌چنین a و b ضرایب آنگستروم کالیبر شده محلی می‌باشند. تابش فرازمینی با استفاده از رابطه ارائه شده توسط آلن و همکاران (Allen *et al.*, 1998) تخمین زده شد.

به دلیل فقدان اطلاعات جامع زمین‌های کشاورزی در ایران، از اطلاعات خاکی در پایگاه داده خاک جهانی (HWSO: <http://www.iiasa.ac.at/Research/LULC/External-World-Soil-database/HTML>) ارائه شده توسط سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد و موسسه بین‌المللی برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های کاربردی وین (<http://www.iiasa.ac.at/Research/LULC/External-World-Soil-database/HTML>) به‌عنوان منبع اصلی برای

پارامترهای خاکی مورد نیاز در شبیه‌سازی منطقه‌ای استفاده گردید. عمق خاک، چگالی ظاهری (BD)، رطوبت در ظرفیت پژمردگی (CLL)، رطوبت در ظرفیت مزرعه (DUL)، و رطوبت در ظرفیت اشباع (SAT) داده‌های ضروری خاک مورد نیاز برای اجرای ماژول بیلان آب خاک در مدل رشدی را تشکیل می‌دهند؛ مقادیر این پارامترها برای مناطق مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. از آنجایی که در اکوسیستم‌های کشاورزی دیم تاریخ کاشت و آب اولیه خاک ثابت نیست، تاریخ کاشت و آب اولیه خاک از یک مجموعه اولیه شبیه‌سازی بدست آمد. در این شبیه‌سازی‌ها، مدل APSIM با توجه به خصوصیات خاک، فعالیت‌های مدیریتی کشاورزان، بازه زمانی کاشت (از ۱ مهر تا ۲ آذر)، و بارندگی برای هر منطقه در طی یک دوره ۳۱ ساله (از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰) اجرا شد. برای این شبیه‌سازی‌ها، آب اولیه خاک ۲۰ درصد ظرفیت بالقوه آب خاک در دسترس (PAWC) برای هر منطقه جهت شروع شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شد (Chenu *et al.*, 2013; Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2021a) و آب خاک و نیتروژن برای هر سال مجدد تنظیم گردید. جوانه‌زنی زمانی اتفاق می‌افتد که حداقل ۵ میلی‌متر بارندگی به مدت ۵ روز متوالی در طول بازه زمانی کاشت وجود داشته باشد و آب در دسترس خاک در هر مکان و فصل حداقل ۳۰ میلی‌متر باشد (بر اساس توصیه سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی ایران برای کشاورزان کاشت گندم دیم). برای هر مکان، ۳۱ نقطه شبیه‌سازی روز جوانه‌زنی (۳۱ سال) و محتوای آب خاک مربوطه در زمان جوانه‌زنی وجود داشت. صدک ۲۵، میانه و صدک ۷۵، این نقاط به عنوان تاریخ کاشت ثلث و محتوای اولیه آب خاک در هر مکان برای اجرای شبیه‌سازی‌های بلندمدت و کاربرد مدل در نظر گرفته شد که در بخش‌های بعدی توضیح داده شده است.

اطلاعات مربوط به عملیات مدیریت کشاورزان محلی توسط کارشناسان محلی از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی و وزارت جهاد کشاورزی در استان کردستان به دست آمده است. این اطلاعات شامل رقم غالب، خاک‌ورزی، عمق کاشت، فاصله ردیف‌ها، تراکم بوته و مقدار کود نیتروژن بود که در بخش‌های بعدی توضیح داده شده است.

شبیه‌سازی می‌کند و به عوامل مختلفی مانند آب و هوا (شامل بارش، تابش و دما)، خاک (شامل آب و نیتروژن خاک)، ضرایب ژنتیکی و اطلاعات مدیریتی مربوط به کاشت محصول زراعی پاسخ می‌دهد (Keating *et al.*, 2003).

داده‌های آب و هوایی که در این تحقیق استفاده شد شامل بارش (میلی‌متر)، تعداد ساعات آفتابی، و دماهای کمینه و بیشینه (درجه سانتی‌گراد) از ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ بودند. این متغیرهای آب و هوایی از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شدند. این متغیرها یکی از ورودی‌های چهارگانه مورد نیاز مدل APSIM هستند. از آنجایی که در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی داده‌های پرت و ثبت نشده در برخی از روزها وجود دارد، این داده‌ها با استفاده از برنامه WeatherMan (Hoogenboom *et al.*, 2003) اصلاح و بازسازی شدند. همان‌گونه که ذکر شد، یکی از متغیرهای آب و هوایی که به‌عنوان ورودی مورد نیاز مدل APSIM استفاده می‌شود تابش است، اما این متغیر در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی ثبت نمی‌شود و بجای آن تعداد ساعات آفتابی ثبت می‌گردد. بر همین اساس و با استفاده از تعداد ساعات آفتابی در هر روز، تابش روزانه در هر ایستگاه با استفاده از معادله آنگستروم (معادله ۱) (Prescott, 1940) تخمین زده شد:

$$R_s = (a + b \times n/N)R_a \quad (1)$$

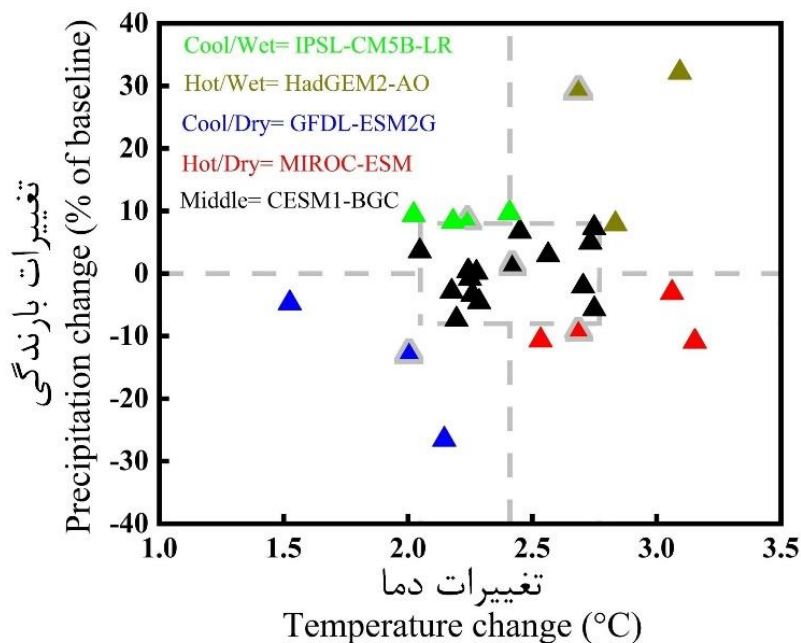
در این معادله R_s ، n ، N و R_a به ترتیب تابش روزانه (مگاژول در متر مربع)، تعداد ساعات آفتابی، بیشینه تعداد ساعات آفتابی و تابش فرازمینی هستند. هم‌چنین a و b ضرایب آنگستروم کالیبر شده محلی می‌باشند. تابش فرازمینی با استفاده از رابطه ارائه شده توسط آلن و همکاران (Allen *et al.*, 1998) تخمین زده شد.

به دلیل فقدان اطلاعات جامع زمین‌های کشاورزی در ایران، از اطلاعات خاکی در پایگاه داده خاک جهانی (HWSO: <http://www.iiasa.ac.at/Research/LULC/External-World-Soil-database/HTML>) ارائه شده توسط سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد و موسسه بین‌المللی برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های کاربردی وین (<http://www.iiasa.ac.at/Research/LULC/External-World-Soil-database/HTML>) به‌عنوان منبع اصلی برای

جدول ۱- خصوصیات خاک، ارتفاع و سطح زیر کشت گندم در مناطق مورد مطالعه

Table 1- Soil characteristics, elevation, and area under wheat cultivation in the study stations

ایستگاه Stations	عمق خاک Soil depth (cm)	وزن مخصوص ظاهری Bulk density (g cm ⁻³)	رطوبت خاک		ظرفیت آب قابل دسترس برای گیاه Plant available water-holding capacity (cm)	ارتفاع Elevation (m)	سطح زیر کشت Area under cultivation (ha)
			رطوبت خاک در نقطه پژمردگی Crop lower limit (cm ³ cm ⁻³)	رطوبت خاک در نقطه ظرفیت زراعی Drained upper limit (cm ³ cm ⁻³)			
بیجار	0-30	1.44	0.141	0.281	4.2	1940	151000
Bijar	30-100	1.54	0.140	0.280	9.8		
مریوان	0-30	1.3	0.135	0.270	4.1	1320	2500
Marivan	30-100	1.36	0.140	0.280	9.8		
قروه	0-30	1.44	0.135	0.270	4.1	1907	68200
Qorveh	30-100	1.54	0.140	0.280	9.8		
سنندج	0-30	1.3	0.135	0.270	4.1	1521	30000
Sanandaj	30-100	1.36	0.140	0.280	9.8		
سقز	0-30	1.3	0.135	0.270	4.1	1476	79700
Saqqez	30-100	1.36	0.140	0.280	9.8		



شکل ۲- تغییرات نسبی در دما و بارندگی تحت همهی مدل های گردش عمومی نسبت به دوره پایه در دوره (۲۰۴۰-۲۰۷۰) و RCP8.5. هر مثلث نشان دهنده یک یکی از ۲۹ مدل گردش عمومی در هر طبقه اقلیمی است. ۵ مدل گردش عمومی انتخاب شده با خط خاکستری پیزامون مثلث مشخص شده است.

Figure 2- Relative change in temperature and precipitation under all GCMs with respect to baseline during mid-century period RCP8.5. Each triangle is colored by its category and represents one of the 29 GCMs. Selected representative GCMs are denoted with a gray outline.

۳۱ ساله (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰) برگرفته از سازمان هواشناسی و رهیافت AgMIP (AgMIP, 2013) برای اواسط قرن (۲۰۷۰-۲۰۴۰) تحت سناریوهای RCP4.8 و RCP8.5 اجرا شد. خروجی های ۲۹ مدل گردش عمومی برای انتخاب پنج مدل

مدل های گردش عمومی و سناریوهای تغییر اقلیم
۲۹ مدل گردش عمومی از مجموعه مدل های CMIP5
برای تولید آب و هوای آینده هر مکان بر اساس داده های اقلیمی
مشاهده شده روزانه (دماهای کمینه و بیشینه، تابش و بارش)

مدل گردش عمومی بر اساس پنج ویژگی آب و هوایی ممکن، از جمله مرطوب خنک (IPSL-CM5B-LR)، مرطوب گرم (HadGEM2-AO)، خشک سرد (GFDL-ESM2G)، خشک گرم (MIROC-ESM)، و حدواسط (CESM1-BGC) جدا شدند. تغییرات بارش تجمعی و میانگین دما در طول فصل رشد گندم دیم برای پنج مدل گردش عمومی در دوره‌های پایه و دوره‌های آبی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.

گردش عمومی که نشان‌دهنده عدم قطعیت در تغییرات دما و بارندگی پیش‌بینی شده برای منطقه مورد مطالعه بودند، تجزیه و تحلیل شد. برای انجام این کار، تغییرات دما و بارش در طول فصل رشد گندم (شهریور تا خرداد) برای هر مدل گردش عمومی و سناریوی RCP8.5 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. سپس، پنج مدل گردش عمومی بر اساس نمودارهای پراکندگی میانگین تغییر دما در برابر تغییر درصد بارندگی انتخاب شدند (Ruane and McDermid, 2017) (شکل ۲). در نهایت، پنج

جدول ۲- تغییرات (درصد) در بارش تجمعی (میلی‌متر) و میانگین دما (درجه سانتی‌گراد) در پنج مدل گردش عمومی (IPSL-CM5B-LR، HadGEM2-AO، CESM1-BGC، GFDL-ESM2G، MIROC-ESM) در مقایسه با دوره پایه در طول فصل رشد گندم دیم در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Table 2- The changes in cumulative precipitation (mm) and mean temperature ($^{\circ}\text{C}$) in five general circulation models (IPSL-CM5B-LR, HadGEM2-AO, CESM1-BGC, GFDL-ESM2G, and MIROC-ESM) compared with the baseline during the rainfed wheat growing season in the studied stations

ایستگاه Station	پایه Baseline	IPSL-CM5B-LR	HadGEM2-AO	CESM1-BGC	GFDL-ESM2G	MIROC-ESM
میانگین دما در طول فصل رشد گندم دیم Mean temperature during the rainfed wheat growing season						
بیجار Bijar	8.6	+2.3	+1.5	+2.3	+1.6	+2.3
مریوان Marivan	10.9	+2.4	+3.3	+2.8	+2.7	+3.0
قروه Qorveh	9.6	+2.4	+3.5	+2.7	+2.7	+3.2
سنندج Sanandaj	11.1	+2.4	+3.5	+2.7	+2.7	+3.2
سقز Saqqez	8.7	+2.5	+3.3	+2.9	+2.7	+3.0
بارش تجمعی در طول فصل رشد گندم دیم Cumulative precipitation during rainfed wheat growing season %						
بیجار Bijar	273	+0.8	+7.1	+0.8	+12.6	+0.8
مریوان Marivan	789	+8.5	+49.5	-4.9	-25.5	-20.3
قروه Qorveh	283	+16.1	+34.7	+6.3	-29.4	-9.1
سنندج Sanandaj	366	+13.3	+28.0	+4.8	-22.0	-16.0
سقز Saqqez	390	+8.3	+47.8	-3.3	-21.7	-17.1

گندم در پنج شهرستان استان کردستان استفاده شد. تیمارهای آزمایشی شامل سه رژیم آبیاری (دیم، آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی، و آبیاری تکمیلی در مرحله پر شدن دانه) و سه تاریخ

آزمایش‌های شبیه‌سازی بلند مدت و توصیف تیمارها: کاربرد مدل در تحقیق حاضر رقم آذر ۲ برای شبیه‌سازی رشد و نمو

بلندمدت ترکیبی از سه رژیم آبیاری، سه تاریخ کاشت، پنج منطقه در طول ۳۱ سال در دوره پایه و پنج مدل گردش عمومی تحت دو سناریو (۱۶۷۴۰ آزمایش شبیه‌سازی) بودند. لازم به ذکر است که غلظت دی‌اکسیدکربن برای شبیه‌سازی‌های دوره پایه ۳۶۰ قسمت در میلیون و برای سناریوی RCP8.5 ۵۷۰ قسمت در میلیون در نظر گرفته شد (Nasir *et al.*, 2020). در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی رشد و نمو گندم دیم در شهرستان‌های مورد مطالعه از رقم آذر ۲ به‌عنوان رقم غالب در مزارع دیم غرب و شمال غرب کشور استفاده شد. این رقم پیش‌تر توسط نویسندگان مقاله حاضر واسنجی و اعتبارسنجی شده است (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2021a). بنابراین در این تحقیق از مدل زراعی واسنجی و اعتبارسنجی شده استفاده شد. ضرایب ژنتیکی رقم آذر ۲ در جدول ۳ قابل مشاهده است. تمام تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده از برنامه R انجام شد. هم‌چنین نمودارها و نقشه‌ها به ترتیب با استفاده از نرم‌افزارهای OriginPro 9.1 و ArcGIS 10.1 ترسیم شدند.

کاشت (۹ مهر، ۲۳ مهر و ۸ آبان) در دوره پایه (۳۱ سال) و پنج مدل گردش عمومی (HadGEM2-AO, IPSL-CM5B-LR, CESM1-BGC و MIROC-ESM, GFDL-ESM2G) تحت دو سناریوی انتشار دی‌اکسیدکربن (RCP4.5 و RCP8.5) برای دوره زمانی ۲۰۷۰-۲۰۴۰ بودند. مقدار آبیاری تکمیلی در مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه بر اساس عرف کشاورزان در منطقه معادل ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ۵۰ میلی‌متر آبیاری تکمیلی بر اساس عرف کشاورزان مناطق با توجه به توصیه کارشناسان جهاد کشاورزی و مراکز تحقیقات کشاورزی در مناطق مورد مطالعه و هم‌چنین عمق خاک‌های زراعی مناطق مورد بررسی بود. خاک‌ورزی (رایج)، عمق کاشت (۵ سانتی‌متر)، تراکم بوته (۳۸۰ بوته در متر مربع)، و فاصله ردیف‌ها (۲۵ سانتی‌متر) در طول شبیه‌سازی برای کاربرد مدل بدون تغییر باقی ماندند. لازم به ذکر است که تمامی شبیه‌سازی‌ها برای کاربرد مدل در شرایط بدون تنش نیتروژن و عوامل زیستی انجام شد. در نهایت، آزمایش‌های شبیه‌سازی

جدول ۳- ضرایب ژنتیکی گندم (رقم آذر ۲) در APSIM-Wheat (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2021a)

Table 3- The genetic coefficients of wheat (Azar-2 cultivar) in APSIM-Wheat (Rahimi-Moghaddam *et al.*, 2021a)

ضریب Coefficient	مقدار Value	واحد Unite
زمان حرارتی در پایان مرحله جوانی Thermal time at the end of juvenile stage	380	°Cd
تعداد دانه در گرم ساقه Number of grain per gram of stem	25	Kernel/g stem
زمان حرارتی در مرحله ابتدای گلدهی Thermal time at floral initiation stage	500	°Cd
حداکثر اندازه دانه Maximum grain size	0.041	
زمان حرارتی از مرحله شروع پر شدن دانه تا رسیدگی Thermal time from start grain filling to maturity	400	°Cd
حساسیت به طول روز Photoperiod sensitivity	2.5	-
حساسیت به بهاره‌سازی Vernalization sensitivity	2	-

شبیه‌سازی نشان داد اختلاف عملکرد زیادی بین تیمارهای مورد بررسی (تاریخ‌های کاشت و رژیم‌های مختلف آبیاری) از نظر عملکرد دانه گندم وجود دارد؛ عملکرد دانه از ۱/۸۱ تن در هکتار (در تیمار دیم و تاریخ کاشت ۸ آبان) در شهرستان قروه تا ۵/۷۶ تن در هکتار (در تیمار آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی و تاریخ کاشت ۲۳ مهر و هم‌چنین تیمار آبیاری

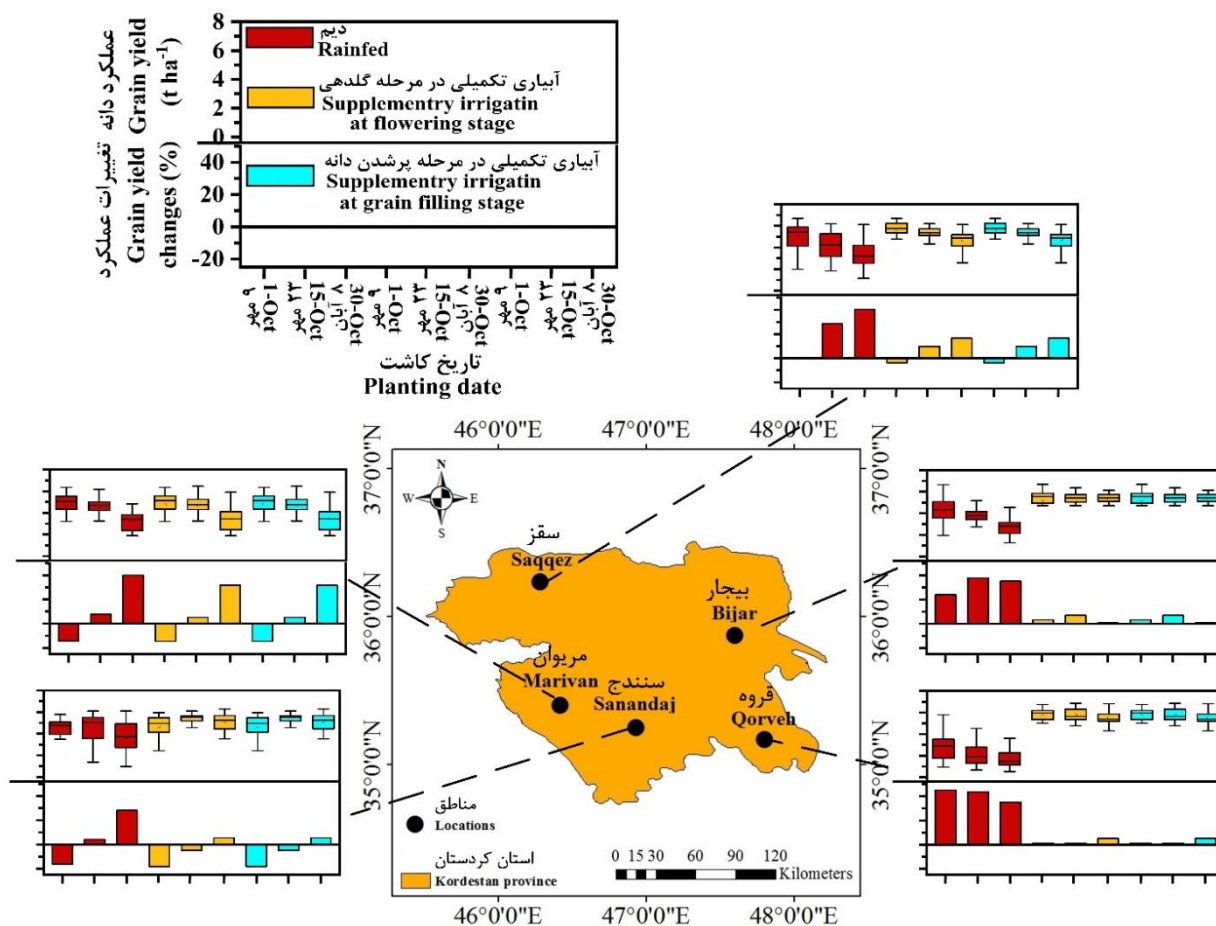
نتایج و بحث

عملکرد دانه گندم در دوره پایه تحت تیمارهای مختلف آبیاری و تاریخ کاشت

بطور کلی عملکرد دانه گندم دیم (رقم آذر ۲) در استان کردستان (میانگین سال، تاریخ‌های کاشت، رژیم‌های آبیاری و مناطق) ۴/۶۳ تن در هکتار شبیه‌سازی شد (شکل ۳). نتایج

کرد (شکل ۳). نتایج نشان داد که در همه مناطق بجز سنندج، عملکرد دانه گندم در تاریخ‌های کاشت ۲۳ مهر و ۸ آبان به ترتیب ۴/۶ و ۱۷/۱ درصد کمتر از تاریخ کاشت ۹ مهر بود (شکل ۳). در سنندج بیشترین عملکرد دانه با میانگین ۵/۰۷ تن در هکتار در تاریخ ۲۳ مهر بدست آمد و گندم دیم کاشته شده در تاریخ‌های ۹ مهر و ۸ آبان به ترتیب ۱۰/۵ و ۸/۲ درصد عملکردهای دانه کمتری نسبت به تاریخ کاشت ۲۳ مهر داشت.

تکمیلی در مرحله پر شدن دانه و تاریخ کاشت ۲۳ مهر) در این شهرستان نوسان داشت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در استان کردستان عملکرد دانه گندم (میانگین رژیم‌های آبیاری و مناطق بجز سنندج) در تاریخ کاشت ۹ مهر برابر ۴/۹۶ تن در هکتار بود. در تمام مناطق مورد بررسی بجز سنندج، کاشت گندم در تاریخ‌های ۲۳ مهر و ۸ آبان عملکرد دانه کمتری در مقایسه با بوته‌های کاشته شده در تاریخ کاشت ۹ مهر تولید



شکل ۳- عملکرد دانه بلندمدت شبیه‌سازی شده برای رژیم‌های آبیاری تکمیلی و تاریخ‌های کاشت در دوره پایه ۲۰۱۰-۱۹۸۰ (باکس پلات) و تغییرات آن در دوره آینده ۲۰۷۰-۲۰۴۰ (ستون‌ها؛ میانگین پنج مدل گردش عمومی) در همه مناطق مورد مطالعه. مقیاس‌ها در کادر بالا سمت چپ ارائه شده است.

Figure 3- Long-term simulated wheat grain yield for different supplementary irrigation regimens and planting dates at baseline for 1980–2010 (boxplots) and its change in the future of 2040–2070 (columns; average of the five GCMs) in all study sites. Scales are given in the top-left box.

افزایش عملکرد دانه گندم در شهرستان قروه با افزایش ۱۴۱/۴ درصدی (میانگین تاریخ‌های کاشت و سال) در مقایسه با رژیم دیم مشاهده شد (شکل ۳).

همان‌گونه که ارائه شد، یافته‌های این تحقیق نشان داد که گندم (رقم آذر ۲) پاسخ‌های متفاوتی به تاریخ‌های کاشت مورد

بطور میانگین در سرتاسر تاریخ‌های کاشت، مناطق و سال‌ها، عملکرد دانه گندم در رژیم دیم برابر ۳/۷۲ تن در هکتار بدست آمد و با آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی و همچنین آبیاری تکمیلی در مرحله پر شدن دانه عملکرد دانه ۳۶/۸ درصد افزایش نشان داد (شکل ۳). شایان ذکر است که بیشترین

بارندگی کمتر در انتهای دوره رشد مناطق مورد مطالعه در مقایسه با تاریخ کاشت ۹ مهر نسبت داد. برتری تاریخ کاشت ۲۳ مهر در شهرستان سنندج نشان دهنده شرایط محیطی مطلوب مانند میانگین دمای روزانه در طول دوره رشد گندم و هم‌چنین توزیع بهتر بارندگی در مقایسه با دو تاریخ کاشت دیگر (۹ مهر و ۸ آبان) است (شکل ۱).

مطالعه نشان داد به طوری که در تاریخ کاشت اول (۹ مهر) بیشترین عملکرد دانه در همه مناطق مورد بررسی (بجز سنندج) بدست آمد. در شهرستان سنندج، ۲۳ مهر به عنوان تاریخ کاشت برتر برای تولید گندم شناخته شد. کاهش در عملکرد دانه گندم در تاریخ‌های کاشت ۲۳ مهر و ۸ آبان را می‌توان عمدتاً به میانگین دمای روزانه بالاتر (جدول ۴) و مقدار

جدول ۴- تابش تجمعی، روز تا رسیدگی، میانگین دما در طول دوره رشد و پر شدن دانه گندم در سه تاریخ کاشت در دوره پایه و شرایط تغییر اقلیم در استان کردستان (به طور میانگین در سرتاسر مناطق و رژیم‌های آبیاری)

Table 4- Cumulative radiation, days to maturity, mean temperature during the growing season and grain filling period of wheat on three planting dates at baseline and climate change conditions in Kurdistan provinces (on average across locations and irrigation regimes)

دوره	تاریخ کاشت	تابش تجمعی	روز تا رسیدگی	میانگین دما در طول دوره رشد	میانگین دما در طول دوره پر شدن دانه
Period	Planting date	Cumulative radiation (MJ m ⁻²)	Days to maturity	Mean temperature during the growing period (°C)	Mean temperature during the grain filling period (°C)
پایه Baseline	۹ مهر 1-Oct	3796.3	233.02	7.01	16.53
	۲۳ مهر 15-Oct	3817.2	230.62	6.77	17.80
	۸ آبان 30-Oct	3759.6	222.05	6.76	18.85
آینده Future	۹ مهر 1-Oct	3263.2	211.41	8.56	15.11
	۲۳ مهر 15-Oct	3286.0	209.71	8.22	17.06
	۸ آبان 30-Oct	3261.6	202.91	8.11	18.45

بارندگی در مراحل رشد زایشی در منطقه مورد مطالعه است (شکل ۱ و جدول ۵). در همین زمینه، در تحقیقی که رابطه بین متغیرهای اقلیمی (دما و بارندگی) و عملکرد گندم دیم در شمال غرب ایران را مورد ارزیابی قرار داد، گزارش شد که بین بارندگی در طول فصل و عملکرد دانه گندم همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد (Kheiri et al., 2018).

یافته‌های این تحقیق نشان داد که آبیاری تکمیلی در مراحل گل‌دهی و پر شدن دانه اثرات مشابهی بر عملکرد دانه گندم داشت و هر دو رژیم آبیاری افزایش قابل توجه عملکرد دانه را در پی داشتند. شناسایی زمان مناسب آبیاری تکمیلی در مراحل رشدی مهم یک عامل حیاتی برای محصولات زراعی در شرایط دیم قلمداد می‌شود (Wale et al., 2019). آبیاری محصولات دیم ماند گندم در مراحل رشد زایشی باعث افزایش

هنگامی که گندم در مناطق خشک و نیمه‌خشک با تأخیر کشت می‌شود عملکرد دانه به دلیل افزایش شدت تنش خشکی انتهای فصل کاهش می‌یابد (Nouri et al., 2017). در همین زمینه، در تحقیقی اثر متقابل ژنوتیپ «محیط» تاریخ کاشت بر عملکرد گندم دوروم در مرکز و جنوب ایتالیا مورد بررسی قرار گرفت و گزارش شد که عملکرد دانه تولید شده در تاریخ کاشت زودهنگام به دلیل شاخص سطح برگ و طول دوره پر شدن دانه بیشتر، از کاشت گندم در تاریخ‌های کاشت دیرهنگام بالاتر بود (Padovan et al., 2020). همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، عملکرد دانه گندم در تاریخ‌های کاشت دیرتر کمتر از تاریخ کاشت زودهنگام بود، در حالی که عملکرد دانه گندم با آبیاری تکمیلی در مراحل گل‌دهی یا پر شدن دانه به طور قابل توجهی افزایش نشان داد (شکل ۳) که این امر نشان‌دهنده کمبود

تکمیلی در مرحله رشد طولی ساقه انجام شد به طور معنی داری بیشتر از شرایط دیم (بدون آبیاری تکمیلی) بود (Shang *et al.*, 2020). نتایج حاصل از یک پژوهش دیگر نیز نشان داد که آبیاری تکمیلی در مراحل گل دهی و پر شدن غلاف در نخود در غرب و شمال غرب ایران باعث افزایش ۵ تا ۳۹ درصد عملکرد دانه شد (Amiri *et al.*, 2021).

عملکرد دانه از طریق بهبود شرایط رشدی و اجزای عملکرد می شود (Attia *et al.*, 2016; Shang *et al.*, 2020). در تحقیقی گزارش شد که دوبر آبیاری تکمیلی در مراحل زایشی گندم در گچساران عملکرد دانه ژنوتیپ های گندم را تا ۴۵ درصد افزایش می دهد (Karimzadeh and Mohammadi, 2011). در تحقیقی دیگر، گزارش شد که عملکرد دانه و کارایی مصرف آب گندم در دشت شمالی چین زمانی که یک آبیاری

جدول ۵- مقدار بارندگی (میلی متر) مناطق مورد مطالعه در سه تاریخ کاشت (۹ مهر، ۲۳ مهر و ۸ آبان) در دوره پایه و آینده (میانگین پنج مدل گردش عمومی)

Table 5- Rainfall amount (mm) of studied locations on three planting dates (1, 15, and 30-Oct) at baseline and future (average of the five GCMs) periods

ایستگاه Station	پایه Baseline			آینده Future		
	۹ مهر 1-Oct	۲۳ مهر 15-Oct	۸ آبان 30-Oct	۹ مهر 1-Oct	۲۳ مهر 15-Oct	۸ آبان 30-Oct
	بیجار Bijar	288.1	312.9	292.5	303.8	328.2
مریوان Marivan	925.2	922.2	900.3	877.8	899.2	881.8
قروه Qorveh	300.5	267.2	262.1	309.2	263.5	254.8
سنندج Sanandaj	407.7	422.9	421.7	384.8	397.1	403.8
سقز Saqqez	463.5	452.6	437.0	452.9	452.0	436.1

مورد بررسی نشان داد. نتایج شبیه سازی نشان داد زمانی که گندم بصورت دیم کاشته شد (بدون آبیاری تکمیلی)، بیشترین عملکرد دانه تحت سناریوی RCP8.5 در تاریخ کاشت ۲۳ مهر با میانگین ۵/۴۴ تن در هکتار در شهرستان سقز بدست آمد (شکل ۳). در تیمارهای آبیاری تکمیلی در مراحل گل دهی و پر شدن دانه، تحت سناریوی RCP8.5 بیشترین عملکرد دانه گندم (۵/۸۵ تن در هکتار) در تاریخ کاشت ۲۳ مهر در شهرستان سنندج بدست آمد. به طور میانگین در سرتاسر رژیم های آبیاری، بیشترین عملکرد دانه شبیه سازی شده تحت سناریوی اقلیمی RCP8.5 در شهرستان های بیجار (۵/۴۰ تن در هکتار)، مریوان (۴/۹۵ تن در هکتار) و سقز (۵/۷۱ تن در هکتار) از کاشت گندم در تاریخ ۲۳ مهر بدست آمد. در شهرستان سنندج بیشترین عملکرد دانه گندم تحت سناریوی RCP8.5 در تاریخ کاشت ۸ آبان با میانگین عملکرد ۵/۱۸ تن در هکتار شبیه سازی شد (شکل ۳). در شهرستان قروه بیشترین

تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد دانه گندم دیم تحت تأثیر تاریخ کاشت × آبیاری تکمیلی

نتایج شبیه سازی نشان داد عملکرد دانه گندم دیم تحت تأثیر تغییر اقلیم آینده در مناطق و تیمارهای مختلف متفاوت بود. عملکرد دانه گندم (به طور میانگین در سراسر تاریخ های کاشت، رژیم های آبیاری و مناطق مورد بررسی) تحت سناریوی RCP8.5 در مقایسه با دوره پایه ۶/۹ درصد افزایش یافت. نتایج حاصل از شبیه سازی ها تغییرات زیادی را در عملکرد دانه گندم دیم بسته به تاریخ های کاشت و رژیم های آبیاری تحت شرایط تغییر اقلیم آینده در مناطق مورد بررسی نشان داد. بر همین اساس، عملکرد دانه گندم دیم از ۲/۴۵ تن در هکتار (دیم × ۸ آبان) در شهرستان قروه تا ۵/۸۵ تن در هکتار (آبیاری تکمیلی در مرحله گل دهی × ۲۳ مهر) در شهرستان سقز متغیر بود (شکل ۳).

گندم دیم پاسخ متفاوتی به تاریخ های کاشت در مناطق

غلظت دی‌اکسیدکربن ناشی از تغییر اقلیم از سوی دیگر باعث افزایش عملکرد دانه گندم شده است. باید توجه داشت که روند گرمایش جهانی به دلیل تغییر اقلیم ممکن است برای تولید گندم در برخی مناطق مفید باشد، اما ممکن است بهره‌وری در مناطقی که دمای مطلوب در حال حاضر وجود دارد را کاهش دهد (Ortiz *et al.*, 2008; Eyni-Nargeseh *et al.*, 2020). در همین زمینه گزارش شد که برخی از مناطقی که در حال حاضر آب و هوای سردی برای رشد گندم دارند می‌توانند از افزایش دمای ناشی از تغییر اقلیم بهره ببرند (Mueller *et al.*, 2015). همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شد، عملکرد دانه شبیه‌سازی شده گندم در هر سه تاریخ کاشت در آینده نسبت به دوره پایه در شهرستان‌های بیجار و قروه افزایش یافت. این درحالی بود که افزایش عملکرد ناشی از آبیاری تکمیلی در هر سه تاریخ کاشت جزئی بود. به‌نظر می‌رسد تأثیر توأم افزایش دما و غلظت دی‌اکسیدکربن (Dehimfard *et al.*, 2018) و هم‌چنین توزیع یکنواخت بارندگی در طول فصل (Bannayan and Eyshi Rezaie, 2014; Kheiri *et al.*, 2018) باعث افزایش عملکرد دانه گندم در هر سه تاریخ کشت تحت تیمار دیم در این مناطق شده است. در همین راستا گزارش شده است (Adil Rashid *et al.*, 2019) که عملکرد گندم با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و دما در دشت شمالی چین افزایش می‌یابد. این محققین عنوان کردند که افزایش غلظت دی‌اکسید کربن تحت سناریوهای مختلف سهم ۱۰ تا ۳۲ درصدی در افزایش عملکرد دانه گندم داشت. افزایش جزئی در عملکرد دانه تحت رژیم‌های آبیاری تکمیلی در مقایسه با رژیم دیم در هر سه تاریخ کاشت تحت شرایط تغییر اقلیم را می‌توان به تغییر توزیع بارش‌های فصلی به مراحل رشد زایشی گندم (از گل‌دهی به بعد) نسبت داد که این بارش‌ها باعث کاهش اثرات مثبت آبیاری تکمیلی شده است. در مجموع، با توجه به روند گرم شدن هوا در مناطق مورد مطالعه در آینده و وجود دماهای روزانه مناسب‌تر برای رشد و نمو گندم در استان کردستان، برهمکنش تاریخ کاشت حدواسط (۲۳ مهر) × آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی یا پر شدن دانه برای افزایش تولید گندم قابل توصیه است.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق رشد و عملکرد گندم دیم (رقم آذر ۲) با

عملکرد دانه گندم (۴/۵۲ تن در هکتار) در تاریخ کاشت ۹ مهر به ثبت رسید (شکل ۳). نتایج شبیه‌سازی نشان داد که آبیاری تکمیلی در هر دو مرحله گل‌دهی و پر شدن دانه اثر یکسانی بر عملکرد دانه گندم در همه مناطق مورد مطالعه داشت. عملکرد دانه گندم در تیمار دیم (به‌طور میانگین در سرتاسر مناطق و تاریخ‌های کاشت) معادل ۴/۴۲ تن در هکتار بود و زمانی که آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی یا پر شدن دانه انجام شد، عملکرد دانه ۱۷/۸۷ درصد افزایش نشان داد (شکل ۳). نکته قابل توجه در مورد آبیاری تکمیلی در شهرستان قروه مشاهده شده به‌طوری‌که عملکرد گندم در این شهرستان با کاربرد آبیاری تکمیلی بیشترین درصد افزایش (۷۳/۸۷ درصد تحت سناریوی RCP8.5) را نسبت به تیمار دیم نشان داد.

یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی رشد و عملکرد گندم نشان داد که تغییر اقلیم آینده اثرات متفاوتی بر عملکرد گندم داشت. به‌نظر می‌رسد نوسانات بارندگی در دوره رشد از یک سو (Yang *et al.*, 2019) و افزایش دما و غلظت دی‌اکسیدکربن از سوی دیگر (Nassiri *et al.*, 2006; Dehimfard *et al.*, 2018; Eyni-Nargeseh *et al.*, 2020) از جمله دلایل اصلی برای پاسخ‌های متفاوت گندم در هر منطقه هستند. در شهرستان‌های مورد مطالعه در استان کردستان عملکرد دانه گندم نوسانات زیادی در واکنش به تغییر در تاریخ کاشت و رژیم آبیاری تحت شرایط تغییر اقلیم در مقایسه با دوره پایه نشان داد. به‌عنوان مثال، در شهرستان‌های مریوان و سقز عملکرد دانه گندم در تاریخ کاشت ۹ مهر در هر سه رژیم آبیاری کمتر از دو تاریخ کاشت دیگر بود و تأخیر در کاشت موجب افزایش عملکرد دانه گندم شد. در شهرستان سنندج روند تقریباً مشابهی مشاهده شد به این‌صورت که کاشت گندم در تاریخ‌های ۹ و ۲۳ مهر موجب دستیابی به عملکردهای دلنه کمتری در مقایسه با دوره پایه شد درحالی‌که تاریخ کاشت ۸ آبان عملکرد دانه گندم را نسبت به دوره پایه افزایش داد (شکل ۳). عملکرد دلنه کمتر گندم در تاریخ کاشت ۹ مهر نسبت به دو تاریخ کاشت دیگر (۲۳ مهر و ۸ آبان) را می‌توان ناشی از بارندگی کمتر در شروع دوره رشد گیاه دانست. شکل ۳ نشان می‌دهد عملکرد دانه شبیه‌سازی شده در شهرستان‌های مریوان، سقز و سنندج در تاریخ‌های کاشت دیر هنگام بیشتر بود. در این مناطق مقدار بارش بیشتر در زمان کاشت از یک سو و افزایش دما و

تاریخ کاشت ۸ آبان بدست آمد. نتایج این مطالعه نشان داد آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی و مرحله پر شدن دانه اثرات مشابهی بر عملکرد دانه گندم در استان کردستان داشتند. در مجموع، ترکیب تاریخ کاشت زود هنگام (۹ مهر) × آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی/پر شدن دانه در دوره پایه و ترکیب تاریخ کاشت حدواسط (۲۳ مهر) × آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی/پر شدن دانه تحت شرایط تغییر اقلیم آینده برای اغلب مناطق استان کردستان قابل توصیه است.

سپاس‌گزاری

بدین وسیله از دانشگاه لرستان بخاطر حمایت‌های خود در تحقیق حاضر کمال تشکر و قدردانی را داریم. (کد طرح: ۱۴۰۲-۱۹-۶-۰۲-۶-۱۴۰۰).

استفاده از مدل APSIM-Wheat در تاریخ‌های کاشت ۹ مهر، ۲۳ مهر و ۸ آبان در سه رژیم دیم، آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی و آبیاری تکمیلی در مرحله پر شدن دانه در دوره پایه و تغییر اقلیم آینده در پنج شهرستان استان کردستان شبیه‌سازی شد. به‌طور کلی عملکرد دانه گندم (میانگین همه مناطق، تاریخ‌های کاشت، رژیم‌های آبیاری) تحت شرایط تغییر اقلیم ۶/۹ درصد در مقایسه با دوره پایه افزایش نشان داد. در دوره پایه بیشترین عملکرد دانه در همه مناطق مورد بررسی در تاریخ کاشت زود هنگام ۹ مهر بدست آمد بجز سنندج که تاریخ کاشت ۲۳ مهر برتر از دو تاریخ کاشت دیگر بود. در تمام شهرستان‌های استان کردستان (بجز سنندج) تحت شرایط تغییر اقلیم، بیشترین عملکرد دانه گندم در تاریخ کاشت ۲۳ مهر بدست آمد؛ در شهرستان سنندج بیشترین عملکرد دانه گندم دیم در

References

- Adil Rashid, M., Jabloun, M., Neumann Andersen, M., Zhang, X. and Olesen, J.E., 2019. Climate change is expected to increase yield and water use efficiency of wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 222, pp.193-203. doi: 10.1016/j.agwat.2019.06.004
- AgMIP., 2013. Guide for Running AgMIP Climate Scenario Generation Tools with R in Windows Version 2.3. <http://www.agmip.org/wp-content/uploads/2013/10/Guide-for-Running-AgMIP-Climate-Scenario-Generation-with-R-v2.3.pdf>
- Amiri, S.R., Deihimfard, R. and Eyni-Nargeseh, H., 2020. Toward dormant seeding of rainfed chickpea as an adaptation strategy to sustain productivity in response to changing climate. *Field Crops Research*, 247, pp.107674. doi: 10.1016/j.fcr.2019.107674
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage, Paper No 56, Rome.
- Amiri, S.R., Deihimfard, R. and Soltani, A., 2016. A single supplementary irrigation can boost chickpea grain yield and water use efficiency in arid and semiarid conditions: a modeling study. *Agronomy Journal*, 108, pp.2406-2416. doi: 10.2134/agronj2016.02.0087
- Amiri, S.R., Eyni-Nargeseh, H., Rahimi-Moghaddam, S. and Azizi, K., 2021. Water use efficiency of chickpea agro ecosystems will be boosted by positive effects of CO₂ and using suitable genotype × environment × management under climate change conditions. *Agricultural Water Management*, 252, pp.106928. doi: 10.1016/j.agwat.2021.106928
- Arredondo, T., Delgado-Balbuena, J., Kimball, B., Luna-Luna, M., Yopez-Gonzalez, E., Huber-Sannwald, E., Garcia Moya, E. and Garatuza-Payan, J., 2020. Late sowing date as an adaptive strategy for rainfed bean production under warming and reduced precipitation in the Mexican Altiplano?. *Field Crops Research*, 255,

- pp.107903. doi: **10.1016/j.fcr.2020.107903**
- Attia, A., Rajan, N., Xue, Q., Nair, S., Ibrahim, A. and Hays, D., 2016. Application of DSSAT- CERES-Wheat model to simulate winter wheat response to irrigation management in the Texas High Plains. *Agricultural Water Management*, 165, pp.50-60. doi: **10.1016/j.agwat.2015.11.002**
- Balwinder-Singh, B., Humphreys, E., Gaydon, D.S. and Eberbach, P.L., 2016. Evaluation of the effects of mulch on optimum sowing date and irrigation management of zero till wheat in central Punjab, India using APSIM. *Field Crops Research*, 197, pp.83-96. doi: **10.1016/j.fcr.2016.08.016**
- Bannayan, M. and Eyshi Rezaei, E., 2014. Future production of rainfed wheat in Iran (Khorasan province): climate change scenario analysis. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19(2), pp.211–227. doi: **10.1007/s11027-012-9435-x**
- Chenu, K., Deihimfard, R. and Chapman, S.C., 2013. Large-scale characterization of drought pattern: a continent-wide modelling approach applied to the Australian wheatbelt—spatial and temporal trends. *New Phytologist*, 198(3), pp.801–820. doi: **10.1111/nph.12192**
- Chenu, K., Porter, J.R., Martre, P., Basso, B., Chapman, S.C., Ewert, F., Bindi, M. and Asseng, S., 2017. Contribution of crop models to adaptation in wheat. *Trends in Plant Science*, 22(6), pp.472–490. doi: **10.1016/j.tplants.2017.02.003**
- Deihimfard, R., Eyni-Nargeseh, H. and Mokhtassi-Bidgoli, A., 2018. Effect of future climate change on wheat yield and water use efficiency under semi-arid conditions as predicted by APSIM-Wheat model. *International Journal of Plant Production*, 12(2), pp.115–125. doi: **10.1007/s42106-018-0012-4**
- Dong, C., Hu, D., Fu, Y., Wang, M. and Liu, H., 2014. Analysis and optimization of the effect of light and nutrient solution on wheat growth and development using an inverse system model strategy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 109, pp.221–231. doi: **10.1016/j.compag.2014.10.013**
- Eyni-Nargeseh, H., Deihimfard, R., Rahimi-Moghaddam, R. and Mokhtassi-Bidgoli, A., 2020. Analysis of growth functions that can increase irrigated wheat yield under climate change. *Meteorological Applications*, 27(1), PP.1-10. doi: **10.1002/met.1804**
- Eyshi-Rezaei, E. and Bannayan, B., 2012. Rainfed wheat yields under climate change in northeastern Iran. *Meteorological Applications*, 19, pp.346-354. doi: **10.1002/met.268**
- Fereres, E. and Soriano, M.A., 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), pp.147-159. doi: **10.1093/jxb/erl165**
- Hai-dong, L., Ji-quan, Z. and Dong-wei, G., 2017. Efficacy of planting date adjustment as a cultivation strategy to cope with drought stress and increase rainfed maize yield and water-use efficiency. *Agricultural Water Management*, 179, pp.227-235. doi: **10.1016/j.agwat.2016.09.001**
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Porter, C.H., Wilkens, P.W., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Tsuji, G.Y., 2003. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Vol. 1: Overview. University of Hawaii, Honolulu, HI.
- IPCC., 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above

- pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, Connors S, Matthews JBR, Chen Y, Zhou X, Gomis MI, Lonnoy E, Maycock T, Tignor M, Waterfield T, (eds.)].
- Karimzadeh, R. and Mohammadi, M., 2011. Association of canopy temperature depression with yield of durum wheat genotypes under supplementary irrigated and rainfed conditions. *Australian Journal of Crop Science*, 5(2), pp.138-146.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N., Meinke, H., Hochman, Z. and McLean, G., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3), pp.267–288. doi: **10.1016/s1161-0301(02)00108-9**
- Kheiri, M., Soufizadeh, S., Ghaffari, A., Aghalikhani, M. and Eskandari, A., 2018. Association between temperature and precipitation with dryland wheat yield in northwest of Iran. *Climatic Change*, 141, pp.703-717. doi: **10.1007/s10584-017-1904-5**
- Mueller, B., Hauser, M., Iles, C., Haque-Rimi, R., Zwiers, F.W. and Wan, H., 2015. Lengthening of the growing season in wheat and maize producing regions. *Weather and Climate Extremes*, 9, pp.47–56. doi: **10.1016/j.wace.2015.04.001**
- Nasir, I.R., Rasul, F., Ahmad, A., Asghar, H.N. and Hoogenboom, G., 2020. Climate change impacts and adaptations for fine, coarse, and hybrid rice using CERES-Rice. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, pp.9454–9464. doi: **10.1007/s11356-019-07080-z**
- Nassiri, M., Koocheki, A., Kamali, G.A. and Shahandeh, H., 2006. Potential impact of climate change on rainfed wheat production in Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 52(1), pp.113-124. doi: **10.1080/03650340600560053**
- Nouri, M., Homae, M., Bannayan, M. and Hoogenboom, G., 2017. Towards shifting planting date as an adaptation practice for rainfed wheat response to climate change. *Agricultural Water Management*, 186, pp.108-119. doi: **10.1016/j.agwat.2017.03.004**
- Ortiz, R., Sayre, K.D., Govaerts, B., Gupta, R., Subbarao, G.V., Ban, T., Hodson, D., Dixon, M.D., Ortiz-Monasterio, J.V and Reynolds, R., 2008. Climate change: Can wheat beat the heat? *Agriculture Ecosystems and Environment*, 126, pp.46–58. doi: **10.1016/j.agee.2008.01.019**
- Padovan, G., Martre, P., Semenov, M.A., Masoni, A., Bregaglio, S., Ventrella, D., Lorite, I.J., Santos, C., Bindi, M., Ferrise, R. and Dibari, C., 2020. Understanding effects of genotype × environment × sowing window interactions for durum wheat in the Mediterranean basin. *Field Crops Research*, 259, pp.107969. doi: **10.1016/j.fcr.2020.107969**
- Prescott, J.A., 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 64, pp.114-118. doi: **10.4236/jss.2014.28019**

- Rahimi-Moghaddam, S., Deihimfard, R., Azizi, K. and Roustaii, M. 2021a Characterizing spatial and temporal trends in drought patterns of rainfed wheat (*Triticum aestivum* L.) across various climatic conditions: A modelling approach. *European Journal of Agronomy*, 129, pp.126333. doi: **10.1016/j.eja.2021.126333**
- Rahimi-Moghaddam, S., Eyni-Nargeseh, H., Ahmadi, S.A.K. and Azizi, K., 2021b. Towards withholding irrigation regimes and drought-resistant genotypes as strategies to increase canola production in drought-prone environments: A modeling approach. *Agricultural Water Management*, 243, pp.106487. doi: **10.1016/j.agwat.2020.106487**
- Rahimi-Moghaddam, S., Kambouzia, J. and Deihimfard, R., 2019. Optimal genotype \times environment \times management as a strategy to increase seed maize productivity and water use efficiency in water-limited environments and rising temperature. *Ecological Indicators*, 107, pp.105570. doi: **10.1016/j.ecolind.2019.105570**
- Ruane, A.C. and Mcdermid, S.P., 2017. Selection of a representative subset of global climate models that captures the profile of regional changes for integrated climate impacts assessment. *Earth Perspectives*, 4(1), pp.1-20. doi: **10.1016/j.agrformet.2011.10.015**
- Sengxua, Ph, Samson, B.K., Bounphanousay, Ch., Xayavong, S., Douangboupaha, Kh., Harnpichitvitaya, D., Jackson, T.M. and Wade, L.J., 2017. Adaptation of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes in the rainfed lowlands of lao PDR. *Plant Production Science*, 20(4), pp.477-484. doi: **10.1080/1343943x.2017.1403290**
- Shang, Y., Lin, X., Li, P., Shubo, G., Lei, K., Wang, S., Hu, X., Zhao, P. and Wang, D., 2020. Effects of supplemental irrigation at the jointing stage on population dynamics, grain yield, and water-use efficiency of two different spike-type wheat cultivars. *Plos One*, 15(4), pp.e0230484. doi: **10.1371/journal.pone.0230484**
- Turrall, H., Burke, J.J. and Faurès, J.M., 2011. Climate Change, Water and Food Security. FAO Water Reports 36. FAO, Rome.
- UNESCO., 1979. Map of the world distribution of arid regions. Map at scale 1:25,000,000 with explanatory note. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, 54 pp. ISBN 92-3-101484-6
- Wale, A., Sebnie, W., Girmay, G. and Beza, G., 2019. Evaluation of the potentials of supplementary irrigation for improvement of sorghum yield in Wag-Himra, North Eastern, Amhara Ethiopia. *Cogent Food and Agriculture*, 5: 1664203. doi: **10.1080/23311932.2019.1664203**
- Yang, Ch., Fraga, H., Leperen, W., Trindade, H. and Santos, J.A., 2019. Effects of climate change and adaptation options on winter wheat yield under rainfed Mediterranean conditions in southern Portugal. *Climatic Change*, 154, pp.159-178. doi: **10.1007/s10584-019-02419-4**

Adapting autumn rainfed wheat to climate change in semi-arid and cold regions using optimal planting date and supplementary irrigation

Hamed Eyni-Nargeseh¹, Sajjad Rahimi-Moghaddam^{2*}, Khosro Azizi², Amin Gharanjik³, Seyedreza Amiri⁴

¹ Department of Agricultural Science, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran

² Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad, Iran

³ Department of Agroecology, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

⁴ Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, University of Saravan, Saravan, Iran

*Corresponding Author: rahimi.s@lu.ac.ir

Received: 21 July 2023 Accepted: 6 December 2023

DOI: 10.22034/CSRAR.2023.408044.1364

Abstract

Introduction: Global climate change has caused extensive changes in climatic parameters such as rainfall and temperature, ultimately affecting field crop productions. Considering continuous climate change and its effects on the agricultural sector, especially in arid and semi-arid regions, it seems inevitable to provide adaptation strategies to reduce climate change's negative effects and increase agricultural production. Accordingly, the present study aimed to investigate the effect of planting date and supplementary irrigation (SI) at important growth stages on wheat yield and growth in rainfed agro-ecosystems under baseline and future climate change conditions using the APSIM-Wheat model.

Materials and Methods: The current study focused on five locations (Bijar, Marivan, Saqqez, Qorveh, and Sanandaj) in Kurdistan province, Iran. The study locations were chosen based on being a cultivated rainfed wheat area, their climatic diversity, and the availability of long-term climate data (rainfall, sunshine duration, and minimum and maximum temperatures). The WeatherMan (Weather Data Manager) program embedded in Decision Support System for Agro-technology Transfer (DSSAT) package was used to restore and modify missing and outliers data in the study locations. The APSIM-Wheat model was applied to predict the wheat development and growth (Azar-2 cultivar). The performance of the crop model was evaluated based on the comparison of field-measured and simulated values for study traits. To do this, the Willmott index of agreement (d-index), normalized root mean squared error (nRMSE), mean bias error (MBE), determination coefficient (R^2), and 1:1 line indicators were considered. The five GCMs under RCP8.5 scenario were singled out based on five possible climate characteristics, including cool wet (IPSL-CM5B-LR), hot wet (HadGEM2-AO), cool dry (GFDL-ESM2G), hot dry (MIROC-ESM), and middle (CESM1-BGC). Simulation experimental treatments in five locations were three irrigation regimes of (i) rainfed, (ii) SI at flowering stage, (iii) and SI at grain filling stage, and three planting dates of 1, 15, and 30 October at baseline period (1980-2010) and five GCMs under the RCP8.5 scenario for 2040-2070 period.

Results and Discussion: Large variability was detected in rainfed wheat grain yield depending upon planting date and irrigation regime in five studied locations. wheat plants differently responded to planting dates and irrigation regimes in the Kurdistan province, Iran and varied from 1.81 t ha⁻¹ (rainfed × 30-Oct in Qorveh) to 5.76 t ha⁻¹ (SI at flowering stage × 15-Oct and SI at grain filling stage × 15-Oct in Qorveh). The average grain yield of the entire wheat agro-ecosystems was 4.63 t ha⁻¹. An increase of 6.9% was simulated for wheat grain yield entire Kurdistan province, Iran (as a semi-arid and cold agro-climatic zone) under future climate change conditions compared with the baseline. At the baseline period, the maximum wheat grain yield produced at an early planting date (1-Oct) in all locations except for Sanandaj, in which a mid-planting date (15-Oct) had the highest simulated grain yield. The simulated grain yields were maximized at a mid-planting date in studied locations except

for Sanandaj, in which a late planting date (30-Oct) had the highest grain yield under future climate change conditions. The SI at flowering and grain filling stages had a similar effect on the wheat grain yield. Averaged by planting dates and locations, the wheat grain yield was increased by 8.7% when SI regimes were used compared with the rainfed treatment under climate change conditions.

Conclusion: The current findings showed that a mid planting date \times SI at flowering/grain filling stages was identified as the best management practice under future climate conditions and can be suggested in semi-arid and cold agro-climatic zone for the autumn wheat in the Kurdistan province, Iran.

Keywords: Daily mean temperature, Modeling, Reproductive stages, Seasonal rainfall