



فصلنامه علوم محیطی، دوره نوزدهم، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰

۱۶۰-۱۴۳

شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر فنولوژی و عملکرد گندم در استان کردستان

فاطمه آقامیر*، سعید صوفی زاده و احمد سهیلی

گروه اگرواکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۴

آقامیر، ف.، س. صوفی زاده و ا. سهیلی، ۱۴۰۰. شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر فنولوژی و عملکرد گندم در استان کردستان. فصلنامه علوم محیطی. ۱۹(۱): ۱۴۳-۱۶۰.

سابقه و هدف: تغییر اقلیم یکی از چالش‌های مهم امنیت غذایی بویژه در منطقه‌های خشک و نیمه خشک است. مهمترین متغیرهای اقلیمی تأثیرگذار بر عملکرد محصول‌های زراعی بارش و دما، دی اکسید کربن می‌باشد که بویژه در منطقه‌های زیر کشت دیم از اهمیت بالایی برخوردار است. نتایج پژوهشگران در ایران بیان کننده اثر تغییر اقلیم آشکار و غیر قابل انکار بر عملکرد گیاهان زراعی در ایران است. با بهره از دانش مدل‌سازی در انتخاب گیاه و رقم مناسب برای یک منطقه، تعیین ویژگی‌های مطلوب گیاهی، تعیین بهترین مدیریت زراعی، پیش‌بینی اثر تنوع و تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد محصول و تخمین عملکرد نهفته به‌صورت کم هزینه، سریع و دقیق می‌توان اثر نامطلوب تغییر اقلیم بر کشاورزی را با گزینه‌های تصمیم کاهش داد.

مواد و روش‌ها: در مطالعه حاضر اثر افزایش دما، افزایش و کاهش ۲۰ درصدی در بارش و افزایش غلظت دی اکسید کربن بر فنولوژی و عملکرد گندم دیم در ۴ شهرستان دهگلان، دیواندره، سقز و سنندج در استان کردستان با داده‌های اقلیمی بلندمدت استان کردستان در سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۳ مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، به‌منظور شبیه‌سازی رشد و نمو روزانه گندم در شرایط تغییر اقلیم و ارزیابی اثرهای نهفته شبیه‌سازی زیر مدل گندم APSIM، ۲۴ سناریوی تغییر اقلیم و ۱ سناریوی دوره پایه، براساس حاصل ضرب افزایش دما، به‌مقدار +۱، +۲، +۳ و +۴ درجه سانتی‌گراد، تغییر در بارش به مقدار $\pm 20\%$ و سه غلظت دی‌اکسیدکربن به‌ترتیب ۵/۴۶۲، ۵/۵۲۷ و ۲۲۵ ppm در نظر گرفته شد. ورودی‌های مدل شامل آب و هوا (دما، بارندگی و تابش)، خاک (آب‌خاک و نیتروژن خاک)، ضرایب ژنتیکی و اطلاعات مدیریتی محصول زراعی و خروجی‌های آن شامل تاریخ گلدهی، تاریخ رسیدگی فیزیولوژیک، تاریخ بیشینه سنجه سطح برگ، سنجه سطح برگ، عملکرد دانه و عملکرد زیست‌شناختی در شرایط اقلیم آینده و گذشته تجزیه و تحلیل گردید.

نتایج و بحث: در سناریوهای با افزایش بارندگی در مقایسه با دوره پایه، یکنواختی گل‌دهی، رسیدگی فیزیولوژیک در تمامی شهرستان‌ها افزایش ولی در دهگلان کاهش خواهد یافت. یکنواختی بازه بیشینه سنجه سطح برگ در تمامی شهرستان‌ها افزایش و در دهگلان درصد افزایش یکنواختی از همه کمتر است. همچنین یکنواختی سنجه سطح برگ دهگلان و سنندج، افزایش و سقز و دیوان دره کاهش خواهد یافت. با کاهش بارندگی، یکنواختی گل‌دهی، رسیدگی فیزیولوژیک، بازه بیشینه سنجه سطح برگ در همه شهرستان‌ها کاهش می‌یابد و

* Corresponding Author: Email Address. f_aghmir@sbu.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2021.1020>

درصد کاهش یکنواختی در دهگلان از همه کمتر است. با افزایش بارش، نوسان عملکرد زیست شناختی و دانه در دهگلان بیشترین و در سنندج کمترین بوده است و با کاهش بارش، تمامی شهرستان‌ها دارای نوسان عملکرد زیست شناختی بوده است، همچنین سنندج کمترین نوسان و دیوان دره بیشترین نوسان را داشته است.

نتیجه گیری: اثر عامل‌های تغییر اقلیم شامل دما و بارش و دی اکسید کربن بر منطقه‌های مختلف شهرستان‌های استان کردستان متفاوت است؛ در کشت دیم، در دوره پایه، فنولوژی و عملکرد گندم متأثر از رطوبت اولیه آب در خاک است، در صورتی که در تغییر اقلیم با افزایش دما، فنولوژی گندم با دمای بهینه زراعی قابل پیش‌بینی است؛ هرچند با افزایش بارش با سنجح سطح برگ گندم قابل توجیه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: رسیدگی فیزیولوژیک، عملکرد دانه، گلدهی، مدل APSIM.

مقدمه

کشور حدود ۲۱۰ میلی‌متر، در حدود یک چهارم متوسط جهانی (۸۶۰ میلی‌متر) می‌باشد (Moradi, 2004). بررسی روند تغییر داده‌های آب و هوایی ثبت شده در دهه‌های پیشین و همچنین نتایج خروجی مدل‌های پیش‌بینی اقلیم، گویای بروز تغییر اقلیم غیر قابل چشم‌پوشی در ایران است (Koocheki et al., 2003) که عملکرد محصول‌های زراعی در ایران را از سالی به سال دیگر به- دلیل تغییر اساسی عامل‌های آب و هوایی متغیر نموده است (Bannayan et al., 2011).

مطالعات اثر تغییر اقلیم، مربوط به سه عامل افزایش غلظت دی اکسیدکربن اتمسفر، افزایش دما و تغییر الگوی بارش می‌باشد (Rosenzweig and Tubiello, 2007). مطالعات بسیاری در رابطه با پاسخ گیاهان زراعی به تغییر اقلیمی صورت گرفته است؛ در پژوهشی (Nadi et al., 2011) تأثیر تغییر دما و بارندگی را بر عملکرد نخود شهرستان ملایر مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که سنجح‌های آب و هوایی بر نوسانات عملکرد نخود (آبی و دیم) طی سال‌های ۸۸ - ۱۳۷۸ اثر داشته است و از بین این متغیرها، میانگین ماهانه دماهای کمینه و بیشینه در بهار (فروردین و اردیبهشت) در کشت آبی و میانگین دماهای کمینه در ماه‌های آذر و اسفند بیشترین تأثیر را بر عملکرد نخود در شهرستان ملایر دارا بوده است. همچنین، Kochaki et al. (2006) بیان نمودند که تغییر اقلیم در مقایسه با دوره‌ی پایه بر عملکرد دانه‌ی نخود در

امروزه به دلیل افزایش جمعیت، چالش امنیت غذایی در سطح جهان از مباحث‌های مهم در تمام کشورها به‌شمار می‌آید. به‌طوریکه بنابر اعلام بانک جهانی، در سال ۲۰۱۷ کمابیش ۸۳ میلیون فرد گرسنه نسبت به سال گذشته بیشتر شده که ناشی از گسترش مناقشات خشونت‌آمیز و بحران‌های اقلیمی بوده است (Prosekov and Ivanova, 2018). امنیت غذایی، دست‌آورد سامانه‌های کشاورزی است. راهکار مناسب، در سطح جهانی با فرض محدودیت‌های افزایش سطح زیر کشت برای تولیدهای کشاورزی، افزایش و بهبود کیفیت محصول در واحد سطح می‌باشد که با توجه به موانع تغییر اقلیم از جمله پدیده گرمایش جهانی، کاهش بارندگی و افزایش وقوع پدیده‌های آب و هوایی شدید (مانند امواج گرمایی، خشکسالی و سیل)، بسیار چالش برانگیز شده است (Manschadi et al., 2010).

کشاورزی منطقه‌های خشک و نیمه خشک در اثر تغییر اقلیم بر کشورهای در حال توسعه از جمله ایران بسیار آسیب‌پذیر بوده و در طولانی مدت، بهره‌وری و پایداری سامانه‌های زراعی منطقه‌های خشک را کاهش داده است (Rodriguez et al., 2014). زیرا دامنه بهینه متغیرهای اقلیمی مورد نیاز برای رشد و عملکرد بهینه گیاهان زراعی دستخوش تغییر می‌شود (Ranuzzi and Srivastava, 2012). ایران دارای آب و هوای متغیر می‌باشد؛ ضریب تغییر سالانه‌ی بارندگی در آن بیش از ۷۰٪ (Nazemosadat, 2000) و متوسط بارندگی در

در منطقه‌های جنوبی افزایش خواهد یافت. همچنین در شرایط کشت آبی، عملکرد گندم کمابیش در تمامی منطقه‌ها افزایش خواهد یافت و با افزایش آبیاری در آینده و در نتیجه افزایش تبخیر و تعرق می‌توان کاهش عملکرد گندم در منطقه‌های شمال چین را جبران نمود. در پژوهش دیگر، اثر تغییر اقلیم بر عملکرد گندم زمستانه در فلات سوئیس با توجه به سناریوهای تغییر اقلیم در دوره ۲۰۵۰ - ۲۰۳۰ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج گویای افزایش عملکرد گندم دیم و آبی در اثر تغییر متغیرهای اقلیمی این دوره بوده است (Finger and Schmid, 2007). Ababaei *et al.* (2010)، اثر خطرپذیری تغییر اقلیم بر عملکرد گندم را در اصفهان مورد تحلیل و ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق، از مدل گردش عمومی HadCM3 در دو سناریوی انتشار (A₂ و B₁) و برای تولید متغیرهای اقلیم در مقیاس روزانه برای دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ از مدل LARS-WG استفاده کردند. اثر تغییر اقلیم بر عملکرد گندم آبی با استفاده از مدل SWAP مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داده است که متوسط عملکرد دانه‌ی گندم در هر دو سناریوی انتشار نسبت به دوره‌ی پایه به ترتیب ۴/۱۹ و ۱۷/۹ درصد کاهش یافته است. همچنین بیان کردند که در سناریوهای تغییر اقلیم، بویژه سناریوی B₁ احتمال کاهش محصول نسبت به مقدار میانگین دوره‌ی پایه افزایش خواهد یافت. Valizadeh *et al.* (2013) اثر تغییر اقلیم بر عملکرد زیست شناختی و دانه گندم در استان سیستان و بلوچستان ایران بر دوره‌ی بلوغ، سنجح سطح برگ، زیست توده و عملکرد دانه‌ی گندم، با استفاده از دو مدل گردش عمومی HadCM3 و IPCM4 در سه سناریوی A_{1B}، B₁ و A₂ و سه دوره‌ی زمانی تا سال ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ ارزیابی نمودند، برای شبیه‌سازی متغیرهای آب و هوایی و رشد گندم به ترتیب از مدل‌های LARS - WG و CERES - Wheat استفاده شد. نتایج نشان داد که عملکرد زیست شناختی و عملکرد دانه‌ی گندم در هر دو مدل گردش عمومی در تمام سناریوها و

شرایط دیم در تبریز با پیش‌بینی مدل‌های GISS و GFDL افزایش داشته است، در صورتیکه عملکرد آفتابگردان در همین شرایط با پیش‌بینی مدل GISS کاهش و با پیش‌بینی مدل GFDL افزایش یافته است. گفتنی است که در کشت آبی، عملکرد نخود در دو مدل، کاهش و عملکرد آفتابگردان افزایش یافته است.

Lashkari *et al.* (2012) در شمال شرق ایران پیش‌بینی نمودند که تغییر اقلیم آینده با افزایش دما و غلظت دی‌اکسید کربن و اثر متقابل آن‌ها، عملکرد ذرت را کاهش خواهد داد. همچنین، نتایج سایر پژوهشگران نیز تأیید نموده است که عملکرد ذرت در استان خراسان با افزایش دما و دی‌اکسید کربن کاهش می‌یابد. (Moradi *et al.*, 2013). در پژوهش دیگر، شرایط تغییر اقلیم در نزدیکی شهرستان مشهد به وسیله Kochaki *et al.* (2001) بیان شده است که عملکرد دانه گندم در مقایسه با دوره‌ی پایه به‌طور میانگین ۳۰ درصد افزایش خواهد یافت.

اثر تغییر اقلیم بر پاسخ گیاهان متفاوت است (Semenov, 2009) و شدت این اثر، به ویژگی‌های رقم و الگوهای مکانی و زمانی تغییر اقلیم وابسته می‌باشد. در برخی منطقه‌ها، که دما در طول فصل رشد کمتر از دمای بهینه می‌باشد، افزایش دما، سبب افزایش شتاب رشد گندم شده است (Turner, 2001; Attri and Rathore, 2003). در استرالیا پیش‌بینی می‌شود که افزایش دما سبب افزایش ۳۰ تا ۵۰ درصد عملکرد گندم خواهد شد، زیرا روند افزایشی دما از طریق بالا بردن دمای کمینه و کاهش تعداد وقوع یخبندان بر عملکرد تأثیر مثبت خواهد داشت (Nichalls, 1997). در پژوهشی اثر تغییر اقلیم بر پاسخ گندم زمستانه در مهمترین منطقه‌های تولید گندم چین با استفاده از مدل گردش عمومی با قدرت تفکیک پذیری بالا (MIROC 3.2 و ECHam 5، CSIRO) و مدل Wheat Grow مورد ارزیابی قرار گرفت (Lv *et al.*, 2013). نتایج نشان داد که عملکرد گندم دیم در منطقه‌های شمال چین در آینده کاهش می‌یابد، در صورتیکه عملکرد

بر کشاورزی را با گزینه‌های کاهش اثرهای منفی، مانند تنظیم تاریخ کشت، تغییر الگوی کشت، کشت ارقام مقاوم به گرما و ترویج گیاهان زراعی فراموش شده، کاهش داد. (Tingem and Rivington, 2009) در دهه‌های اخیر قرن بیستم مدل شمایی ساده شده¹ APSIM از سامانه‌های واقعی برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی در بسیاری از کشورهای توسعه یافته به‌طور موفقیت آمیز در پیش‌بینی خلأ عملکرد گیاهان زراعی و مدیریت کارآمد به‌کار گرفته شده است. مدل APSIM ابزار کارآمد برای آزمون فرضیه‌های سامانه‌های واقعی زراعی و نیازمند گذشت زمان است (Manschadi et al., 2010). به‌طور کلی دستیابی و شناخت تأثیر تغییر اقلیم بر ویژگی‌های رشد و نمو گیاه گندم و خلأ عملکرد در کشت دیم، نیاز به شبیه‌سازی سامانه‌های واقعی برای پیش‌بینی دارد. در این پژوهش، اثر عوامل تغییر اقلیم شامل دما، بارش و دی اکسیدکربن بر عملکرد و فنولوژی گندم دیم در استان کردستان براساس سناریوهای IPCC (2013) مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

۱- ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی مناطق

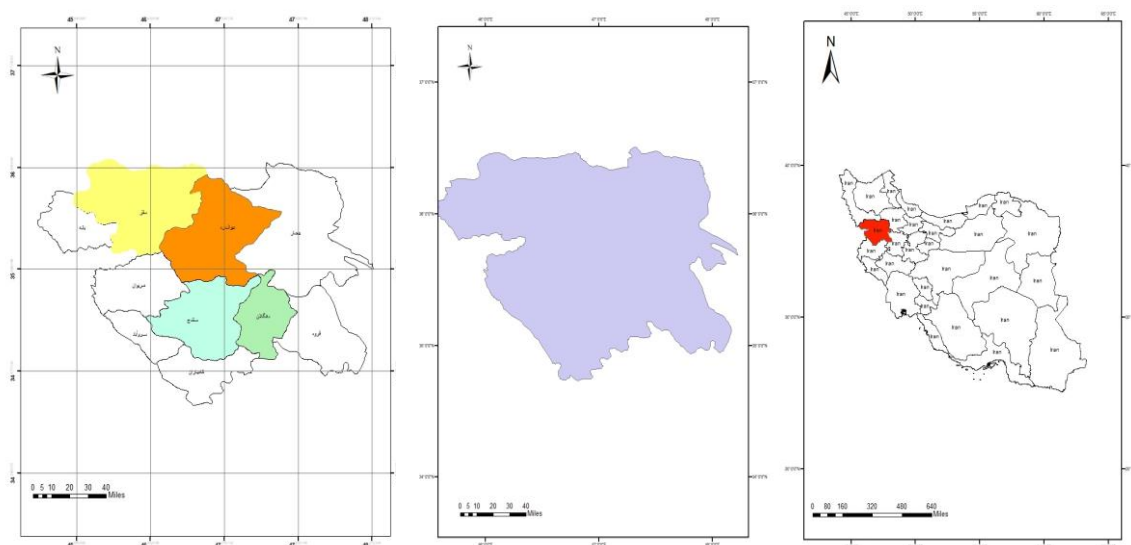
مورد مطالعه

از لحاظ اقلیمی و طبیعی، استان کردستان، منطقه‌ای کوهستانی، دارای اقلیم با توده‌های هوای گرم و مرطوب مدیترانه‌ای، بارندگی در بهار و ریزش برف در زمستان‌ها است. میزان بارندگی سالانه در شرایط عادی اقلیمی حدود ۵۰۰ میلی‌متر است. بیشترین میزان بارندگی مربوط به شهرهای مریوان و بانه حدود ۸۰۰ میلی‌متر در سال و کمترین میزان بارندگی در ناحیه شرق حدود ۴۰۰ میلی‌متر و در قسمت مرکزی استان، سنندج نزدیک به ۵۰۰ میلی‌متر در سال است. در پژوهش حاضر، شهرستان‌های دهگلان، دیواندره، سقز و سنندج در استان کردستان براساس وزن‌دهی توزیع ناحیه‌ای، شرایط اقلیمی و فراهمی اطلاعات هواشناسی انتخاب شدند (شکل ۱). نام و مشخصات جغرافیایی و اطلاعات آب و هوایی شهرستان‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

همه‌ی زمان‌ها در مقایسه با شرایط فعلی کاهش خواهد یافت. در نتیجه تغییر اقلیم بر عملکرد گندم در منطقه‌ی سیستان اثر خواهد داشت (Valizadeh et al., 2013).

Nasiri et al. (2006) در مورد اثر تغییر اقلیم بر گندم دیم در ایران بیان نمودند که کاهش عملکرد گندم به‌طور متوسط در تمام منطقه‌ها در دوره‌های مورد بررسی ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ به ترتیب ۲۰ و ۲۷ درصد به دلیل کاهش دوره فصل رشد گندم در شرایط پتانسیل در مقایسه با دوره‌ی پایه در دوره‌ی ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ به ترتیب ۱۹۲ و ۱۷۷ روز بوده است. (Gohari et al., 2013) نیز دلیل اثر تغییر اقلیم را بر عملکرد محصول‌های مختلف در حوضه‌ی زاینده رود در ایران را طول فصل رشد در تمامی محصول‌های گندم، جو، ذرت و برنج در دوره‌ی ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۴ در مقایسه با دوره‌ی پایه بیان نمودند. گیاه زراعی گندم (*Triticum aestivum* L.) از محصولات استراتژیک می‌باشد که نقش مهم در امنیت غذایی ایران دارد، با وجود این که ایران حدود یک درصد جمعیت جهان را دارا است اما ۲/۵ درصد گندم جهان را مصرف می‌کند. در حال حاضر سهم بزرگی از پتانسیل کشاورزی کشور مربوط به تولید گندم با رقم حدود ۶ میلیون هکتار و سهم گندم دیم حدود ۴ میلیون هکتار است. ۷۵ درصد از زمین‌های دیم در مناطق سردسیر کشور واقع شده و استان کردستان بالاترین سطح برداشت محصول‌های زراعی دیم کشور را با ۱۱/۴ درصد به خود اختصاص داده است؛ در استان کردستان ۹۴ درصد از زمین‌های کشت گندم را، گندم دیم تشکیل می‌دهد و ۸۳/۴۱ درصد از کل گندم تولید شده در این استان، به‌صورت دیم است (Anonymous, 2017).

با بهره از دانش مدل‌سازی در مطالعات مختلف از جمله انتخاب گیاه و رقم مناسب برای یک منطقه، تعیین ویژگی‌های مطلوب گیاهی، تعیین بهترین مدیریت زراعی، پیش‌بینی اثر تنوع و تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد محصول و تخمین عملکرد نهفته به‌صورت کم هزینه، سریع و دقیق (Soltani et al., 2006)، می‌توان اثر نامطلوب تغییر اقلیم



استان کردستان

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان کردستان در ایران و شهرستان‌های دهگلان، دیواندره، سقز و سنندج

Fig. 1- Geographical location of Kurdistan Province in Iran and the cities of Dehgolan, Divandare, Saqez, and Sanandaj

جدول ۱- مختصات جغرافیایی و اطلاعات آب و هوایی شهرستان‌های مورد مطالعه در استان کردستان

Table 1. Geographical coordinates and climatic information of the studied cities in Kurdistan Province

مجموع بارندگی سالانه Total annual rainfall(mm)	میانگین سالانه دمای روزانه Average annual daily temp. (C°)	میانگین سالانه دمای بیشینه Average annual max temp. (C°)	میانگین سالانه دمای کمینه Average annual min temp.(C°)	ارتفاع از سطح دریا Altitude (m)	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	منطقه Location
347.20	11.80	17.80	5.90	1906	47°07'	35°09'	دهگلان Dehgolan
391.90	8.25	14.50	2.00	1850	47°01'	35°54'	دیواندره Divandare
454.40	10.90	19.00	2.80	1476	46°16'	36°۱۶'	سقز Saqez
396.00	14.20	22.30	6.10	1463	46°99'	35°31'	سنندج Sanandaj

در این رابطه، R_s نشان دهنده تشعشع، n طول ساعات آفتابی، N بیشینه ساعات آفتابی ممکن و R_a تابش فرازمینی است. پارامترهای a و b ضرایب آنگستروم کالیبره محلی هستند (Almorox *et al.*, 2005).

داده‌های خاک، شامل بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن)، وزن مخصوص ظاهری، نقاط مهم رطوبتی خاک (نقطه‌ی اشباع، رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت نقطه پژمردگی دائم)، اسیدیته، هدایت الکتریکی و مقدار

۲- جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز

داده‌های اقلیمی دوره پایه بلندمدت استان کردستان در بازه زمانی ۲۳ سال (۱۳۷۰ - ۱۳۹۳) شامل دمای روزانه (C°)، بارندگی روزانه (mm) در ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کشور تهیه و کنترل کیفی شدند. شدت تشعشع روزانه خورشیدی ($Mj\ m^{-2}\ d^{-1}$) با استفاده از معادله آنگستروم (رابطه ۱) شبیه‌سازی گردید.

$$R_s = \left[a + b \frac{n}{N} \right] R_a \quad (1)$$

تغییرات بارش و افزایش غلظت CO₂ بر رشد و عملکرد گندم، از سناریوهای اقلیمی، گزینش سناریوهای زیر براساس گزارش اخیر توسط IPCC، افزایش دما در کره زمین ۱/۵ الی ۴ (C°) استفاده شد (IPCC, 2013). در این پژوهش، ۲۴ سناریوی تغییر اقلیم و ۱ سناریوی دوره پایه براساس حاصل ضرب افزایش دما، به مقدار +۱، +۲، +۳ و +۴ درجه سانتی‌گراد، تغییر در بارش به مقدار ۲۰٪ ± و سه غلظت دی‌اکسیدکربن به ترتیب ۴۶۲/۵، ۵۲۷/۵ و ۷۲۵ ppm در سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۴۰ و ۲۰۷۵ طراحی شد (جدول ۲). دوره پایه نیز شامل ۲۳ سال اطلاعات آب و هوایی (۱۳۹۳ - ۱۳۷۰) بدون تغییر دما و بارش با غلظت دی‌اکسیدکربن ۳۸۰ ppm در نظر گرفته شد.

نیترژن معدنی در عمق توسعه ریشه گندم جمع آوری گردید. تمام داده‌های گیاهی شامل ضرایب ژنتیکی محاسبات فیزیولوژیک رقم غالب گندم دیم ایران رقم سرداری از کالیبراسیون مدل APSIM محاسبه شد (Kheyri *et al.*, 2016). اطلاعات مربوط به اقدام‌های مدیریتی براساس عرف کشت منطقه شامل تاریخ و تراکم کاشت، فاصله بین ردیف‌ها، میزان و زمان کوددهی از مراکز تحقیقاتی استان کردستان و تهیه پرسش‌نامه از کارشناسان زراعت و ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی فراهم شد.

۳- تشکیل سناریوهای اقلیمی

به‌منظور بررسی چگونگی تأثیر اقلیم با عوامل دما،

جدول ۲- عامل‌های تشکیل سناریوهای اقلیمی

Table 2. Factors forming climate scenarios

تغییرات بارش ۲۰ درصد (%) precipitation changes 20%	افزایش دمای کمینه و بیشینه (C°) Increase in the minimum and maximum temperature	افزایش غلظت CO ₂ (ppm) Increase in CO ₂ concentration
P1: افزایش	1 :T1	462.5:C1
P2: کاهش	2 :T2	527.5 :C2
	3 :T3	725 :C3
	4 :T4	

سطح برگ، درصد نیترژن کلش، ارتفاع، زیست توده و درصد نیترژن ریشه، درصد نیترژن دانه، زیست توده کل، عملکرد دانه، اندازه دانه و تعداد دانه در مقیاس روزانه است. فنولوژی در زیر مدل APSIM - Wheat، دارای ۱۱ مرحله رشد و ۹ فاز (زمان بین مرحله‌ها) می‌باشد. شروع هر فاز با زمان حرارتی تجمعی تعیین می‌شود. مرحله‌های نمو شبیه‌سازی عبارتند از: جوانه‌زنی، سبزینه‌گی، پایان دوره جوانی، ظهور برگ پرچم، گلدهی، آغاز دوره پر شدن دانه، پایان دوره پر شدن دانه، بلوغ فیزیولوژیک و بلوغ اقتصادی (برداشت نهایی) است. زمان حرارتی روزانه (درجه روز رشد) از دماهای سه ساعته از دماهای کمینه و بیشینه روزانه درون‌یابی می‌شود. طول دوره کاشت تا جوانه زنی، تابع رطوبت خاک است. زمان حرارتی بین جوانه‌زنی تا

۴- شبیه‌سازی اثرهای سناریوهای اقلیمی

براساس زیرمدل APSIM-Wheat

مرحله‌های مهم فنولوژی و عملکرد گندم در تغییر اقلیم استان کردستان با مدل APSIM، (Version 7.9) فرآیندهای گیاه در قالب زیرمدل اختصاصی APSIM-Wheat برای شبیه‌سازی فنولوژی و عملکرد گندم با استفاده از داده‌های هواشناسی، خاک، گیاه و مدیریت در مقیاس روزانه مرحله‌های مهم فنولوژیک گندم و در مقیاس واحد سطح، پیش‌بینی گردید (Chen *et al.*, 2010).

رشد گندم در این زیرمدل در پاسخ به شرایط آب و هوایی (دما، بارندگی و تشعشع)، فراهمی آب خاک (زیرمدل Soilwat) و نیترژن خاک (زیرمدل SoilN) است. از مهمترین صفت‌ها در بخش خروجی زیرمدل گندم توسعه

نیز دیرترین بازه بیشینه سنجه سطح برگ را دارد. پیدایش گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک و بیشینه سنجه سطح برگ زود هنگام سنندج در مقایسه با دیگر شهرستان‌ها به دلیل بالاتر بودن دمای متوسط روزانه (۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد) در طول دوره رشد است. همچنین، دیررسی در دیواندره، به دلیل دمای متوسط روزانه (۸/۲ درجه سانتی‌گراد) در این شهرستان می‌باشد. در دوره پایه، بیشینه یکنواختی گلدهی و زمان رسیدگی فیزیولوژیک، بیشینه سطح برگ و بازه وقوع حداکثر سطح برگ در شهر دهگلان می‌؛ یکنواختی گلدهی دهگلان به دلیل بیشینه مقدار رطوبت اولیه آب (۲۵۹ میلی‌متر) نسبت به سایر شهرستان‌ها می‌باشد. در دیواندره، گلدهی و زمان رسیدگی فیزیولوژیک نیمه از سال‌ها بین ۲۶۰-۰ روز و ۵۰ درصد دیگر به ترتیب در بازه ۲۷۰ - ۲۶۰ و ۳۰۱ - ۲۵۹ روز انجام گرفته است که این الگو نشان دهنده کمترین یکنواختی زمان گلدهی و زمان رسیدگی فیزیولوژیک و بازه وقوع حداکثر سنجه سطح برگ در دیواندره است؛ در برخی از سال‌ها که بارش کم بوده است، گندم قادر به آغاز رشد یا تداوم آن تا مرحله رسیدگی نبوده است؛ به طوریکه در دیواندره، در ۲۵ درصد از سال‌ها، پیدایش گل و برگ صورت نگرفته است؛ غیریکنواختی و کندی گلدهی در دیواندره به دلیل کمتر بودن مقدار رطوبت اولیه آب (۱۵۶ میلی‌متر) نسبت به سایر شهرستان‌ها می‌باشد. در سنندج و سقز رسیدگی در ۷۵ درصد از سال‌ها به ترتیب در بازه ۲۵۸ - ۲۴۳ و ۲۸۰ - ۱۹۵ قرار داشت که نشان دهنده یکنواختی بیشتر سنندج در مقایسه با سقز است (شکل ۲).

در میان شهرستان‌های مورد بررسی، بیشترین سنجه سطح برگ در دوره پایه دهگلان و سنندج با میان ۷/۲ و پس از آن‌ها سقز با میان ۵/۴ قرار داشت. دیواندره نیز با میان ۴/۹ کمترین سنجه سطح برگ را به خود اختصاص داده است. بیشینه سنجه سطح برگ در دهگلان و سنندج به دلیل بیشینه مقدار رطوبت اولیه آب (۲۵۹ و ۲۲۷

سبزینگی، تابعی از عمق کاشت است و مدت زمان بین سبزینگی و شروع گلدهی نیز تابعی از درجه روز رشد جمعی وابسته به رقم می‌باشد.

۵- کالیبراسیون زیرمدل APSIM - Wheat در گندم دیم

به منظور کالیبراسیون مدل APSIM در شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم، اطلاعات مرحله‌های فنولوژی مهم شامل زمان گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک و همچنین عملکرد دانه در استان جمع آوری شد. برای ارزیابی در مجموع ۹۱ سری داده جمع آوری و ۵۴ سری از داده‌ها اطلاعات مربوط به تاریخ گلدهی و تاریخ رسیدگی فیزیولوژیک بود. مدل برای رقم سرداری با توجه به اطلاعات جمع آوری شده از ایستگاه قاملو (استان کردستان) طی سال‌های زراعی ۸۳ - ۱۳۸۱ با استفاده از روش آزمون و خطا^۲، روش مرسوم برای تعیین ضرایب ژنتیکی، واسنجی شد (Godwin and Singh, 1998; Zhang *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2010). تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی رشد و نمو فنولوژی و عملکرد گندم در سناریوهای اقلیمی با مدل APSIM در استان کردستان با خروجی‌های مدل و ترسیم منحنی با استفاده از نرم افزارهای SigmaPlot و Excel با نمودار جعبه‌ای با پیشنهاد گسترش نمونه‌های خارج از رده و بررسی مقادیر ناهنجاری صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

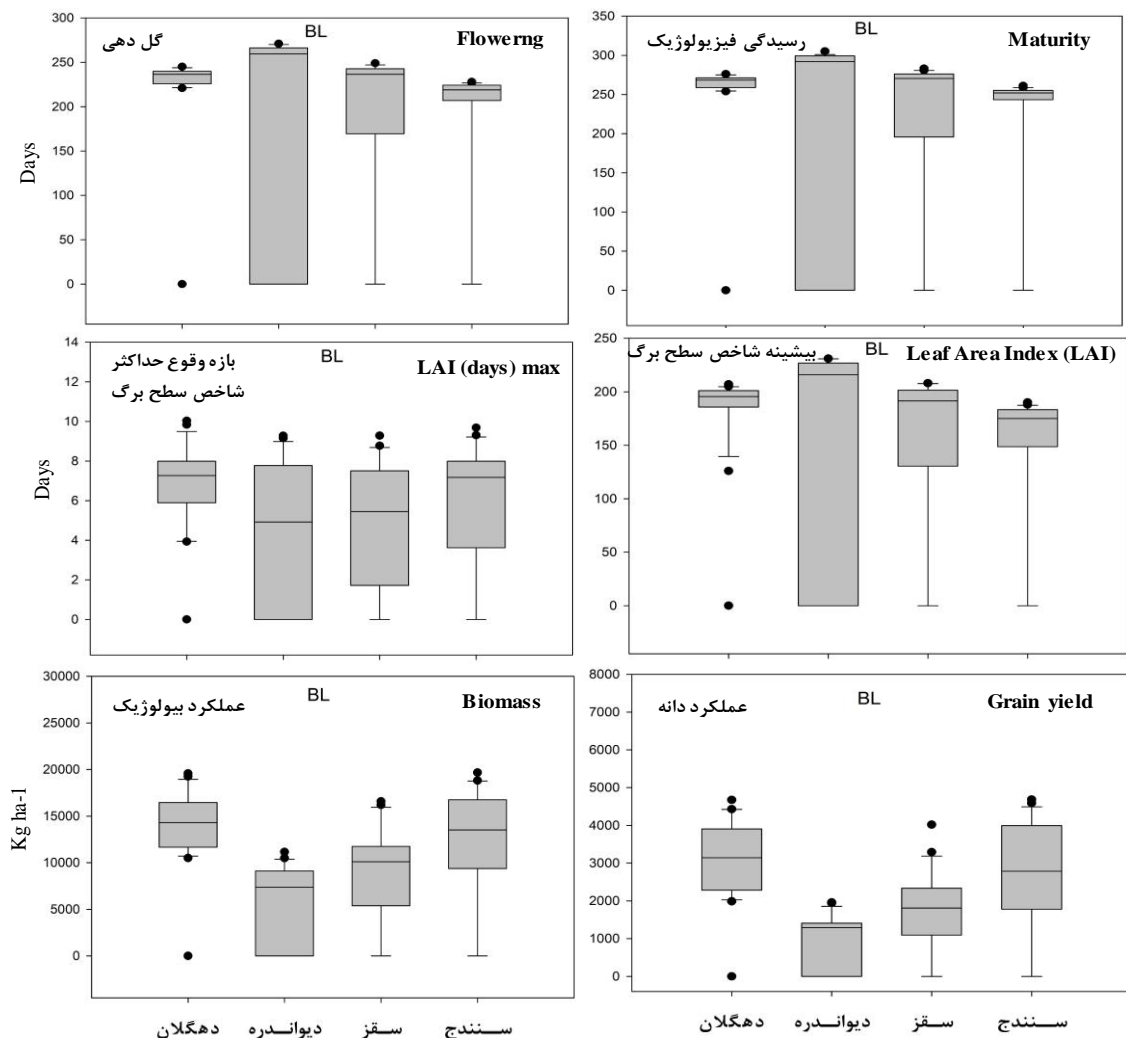
با توجه به نتایج، شبیه‌سازی رشد و نمو گندم در دوره پایه و سناریوهای اقلیمی مورد بحث قرار گرفته است.

۱- دوره پایه

کوتاه‌ترین میانه‌های روز در پیدایش گل و رسیدگی فیزیولوژیک، در دوره پایه، به ترتیب در استان کردستان، شهرستان‌های سنندج، دهگلان و سقز و دیواندره می‌باشند. زودترین بازه وقوع بیشینه سنجه سطح برگ در سنندج و پس از آن سقز و دهگلان بوده است. دیواندره

سنندج و سقز به ترتیب با میانه ۲/۸ و ۱/۸ تن در هکتار قرار دارند. دیواندره نیز با میانه ۱/۳ تن در هکتار کمترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داده است. در کشت دیم ایران، محدودکننده‌ترین عامل عملکرد، آب است که به دلیل بیشترین و کمترین مقدار رطوبت اولیه به ترتیب در دهگلان و دیواندره در مقایسه با دیگر شهرستان‌ها وجود دارد، دیواندره در دوره پایه، کمترین نوسان عملکرد زیست شناختی را در بین شهرستان‌ها و پس از دیواندره نیز دهگلان، سقز و سنندج کمترین تا بیشترین نوسان را در عملکرد زیست شناختی دارند.

میلی‌متر) در این دو شهرستان و کمینه حداکثر سنجه سطح برگ در دیواندره به دلیل کمترین مقدار رطوبت اولیه آب (۱۵۶ میلی‌متر) در این شهرستان است. در دوره پایه، دهگلان با میانه ۱۴/۳ تن در هکتار، بیشترین عملکرد زیست شناختی را دارا بود؛ پس از آن سنندج و سقز به ترتیب با میانه ۱۳/۶ و ۱۰/۱ تن در هکتار قرار دارند. دیواندره نیز با میانه ۷/۴ تن در هکتار، کمترین عملکرد زیست شناختی و عملکرد دانه گندم در دوره پایه را نشان داد؛ همچنین دهگلان با میانه ۳/۲ تن در هکتار، بیشترین عملکرد دانه را دارا بود؛ پس از آن



شکل ۲- نمودار Box-Plot زمان وقوع گلدهی، رسیدگی فیزیولوژیک، بازه بیشینه سنجه سطح برگ، بیشینه سنجه سطح برگ،

عملکرد زیست شناختی و عملکرد دانه گندم در شهرستان‌های استان کردستان در دوره پایه

Fig. 2- Box-Plot diagram of flowering time, physiological maturity, maximum leaf area index, maximum leaf area index, biological yield, and wheat grain yield in cities of Kurdistan Province in the base period

۲- سناریوهای اقلیمی

۱- وقوع گلدهی

با افزایش بارش در مقایسه با دوره پایه، یکنواختی وقوع گلدهی در شهرستان‌های سنندج، سقز و دیواندره، افزایش خواهد یافت؛ همچنین با افزایش دما و غلظت 725 ppm دی‌اکسیدکربن، یکنواختی گلدهی در این سه شهرستان نسبت به دوره پایه بیشتر خواهد شد. در صورتیکه، با افزایش دما یکنواختی گلدهی در دهگلان کاهش می‌یابد. سنندج و دهگلان، به ترتیب بیشترین و کمترین یکنواختی زمان گلدهی را در مقایسه با دوره پایه خواهند داشت (جدول ۳). از طرف دیگر با کاهش بارش، یکنواختی وقوع گلدهی، در شهرستان‌های دهگلان و دیواندره کاهش می‌یابد. این دو شهرستان دارای متوسط بارندگی کمتری نسبت به دو شهرستان سقز و سنندج هستند و کاهش یکنواختی آن‌ها می‌تواند به این دلیل باشد. با کاهش بارش و افزایش 4 درجه دما و غلظت 725 ppm دی‌اکسیدکربن یکنواختی گلدهی، در دیواندره، سقز و سنندج بیشتر از دوره پایه خواهد شد؛ این در حالی است که افزایش دما سبب کاهش یکنواختی گلدهی در دهگلان نسبت به دوره پایه خواهد شد و در صورت افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن یکنواختی

گلدهی در دهگلان افزایش خواهد یافت. سقز و دهگلان، به ترتیب بیشترین و کمترین یکنواختی زمان گلدهی را در مقایسه با دوره پایه خواهند داشت (جدول ۳)

۲- رسیدگی فیزیولوژیک

با افزایش بارش 20 درصد، یکنواختی زمان رسیدگی فیزیولوژیک نسبت به دوره پایه، در همه شهرستان‌ها به جز دهگلان افزایش خواهد یافت. بیشترین یکنواختی رسیدگی در دهگلان با افزایش 4 درجه دما و غلظت 725 ppm دی‌اکسیدکربن اتفاق خواهد افتاد؛ این در حالی است که روند افزایش دما و غلظت دی‌اکسید کربن سبب افزایش یکنواختی رسیدگی در سقز و دیواندره خواهد شد، افزایش 2 درجه دما نیز بیشترین یکنواختی رسیدگی را در سنندج سبب خواهد شد. سنندج و دهگلان، به ترتیب بیشترین و کمترین یکنواختی زمان رسیدگی فیزیولوژیک را در مقایسه با دوره پایه خواهند داشت. همچنین با کاهش بارش 20 درصد، یکنواختی زمان رسیدگی فیزیولوژیک نسبت به دوره پایه، در دهگلان کاهش پیدا خواهد کرد. دیواندره و دهگلان، به ترتیب بیشترین و کمترین یکنواختی زمان رسیدگی فیزیولوژیک را در مقایسه با دوره پایه خواهند داشت (جدول ۴)

جدول ۳- درصد تغییر طول دوره گلدهی نسبت به دوره پایه، در سناریوهای افزایش و کاهش 20 درصدی بارش

Table 3. Percentage of changes in the flowering period compared to the base period in scenarios of 20% increase and decrease in rainfall

		Dehgolan		Divandareh		Saghez		Sanandaj	
		دهگلان		دیواندره		سقز		سنندج	
	Variation	Scenario	Variation	Scenario	Variation	Scenario	Variation	Scenario	
	تغییر	سناریو	تغییر	سناریو	تغییر	سناریو	تغییر	سناریو	
P1	Max	-21.7	C1T4	92.9	C2T3	91.4	C3T2	91.6	C1T1
	Min	4.3	C3T1	2.2	C1T1	29.1	C1T1	89.4	C1T4
P2	Max	-930.4	C1T1	-92.2	C1T1	34.4	C3T3	11.8	C1T4
	Min	-4.3	C3T1	-9.2	C3T4	2.8	C1T1	3	C1T1

Precipitation P1:+20%, P2:-20%, Temperature T1:1, T2:2, T3:3, T4: 4, CO₂ C1:462.5ppm, C2:527.5ppm, C3:725ppm.

جدول ۴- درصد تغییر طول دوره رسیدگی فیزیولوژیک نسبت به دوره پایه، در سناریوهای افزایش و کاهش 20 درصدی بارش

Table 4. Percentage of changes in physiological maturity compared to the base period under scenarios of 20% increase and decrease in precipitation

		Dehgolan		Divandareh		Saghez		Sanandaj	
		دهگلان		دیواندره		سقز		سنندج	
	Variation	Senario	Variation	Senario	Variation	Senario	Variation	Senario	
	تغییر	سناریو	تغییر	سناریو	تغییر	سناریو	تغییر	سناریو	
P1	max	-30	C3T4	94.3	C2T4	93.5	C3T1	93.8	C1T1
	min	15	C3T3	1.6	C1T1	30.2	C1T1	11.5	C2T3
P2	max	-1340	C1T1	93.6	C3T4	33.4	C3T3	11.5	C1T4
	min	15	C3T1	13	C1T1	2.8	C1T1	2.7	C2T1

Precipitation P1: +20%, P2:-20%, Temperature T1:1, T2:2, T3:3, T4: 4, CO₂ C1:462.5ppm, C2:527.5ppm, C3:725ppm.

۳- بازه وقوع بیشینه سنجه سطح برگ

خواهند داشت و چنانچه بارش ۲۰ درصد کاهش پیدا کند، یکنواختی وقوع حداکثر سنجه سطح برگ نسبت به دوره پایه، در شهرستان‌های دهگلان و دیواندره کاهش خواهد یافت، سقز و دهگلان، به ترتیب بیشترین و کمترین یکنواختی را در مقایسه با دوره پایه خواهند داشت (جدول ۵).

براساس پیش‌بینی مدل APSIM، چنانچه بارش ۲۰ درصد افزایش پیدا کند، یکنواختی وقوع بیشینه سنجه سطح برگ نسبت به دوره پایه، در همه شهرستان‌ها افزایش پیدا خواهد کرد. دیواندره و دهگلان، به ترتیب بیشترین و کمترین یکنواختی را در مقایسه با دوره پایه

جدول ۵- درصد تغییر بازه وقوع بیشینه سنجه سطح برگ نسبت به دوره پایه، در سناریوهای افزایش و کاهش ۲۰ درصدی بارش
Table 5. Percentage of changes in the maximum leaf area index compared to the base period under scenarios of 20% increase and decrease in rainfall

		Dehgolan دهگلان		Divandareh دیواندره		Saghez سقز		Sanandaj سنندج	
		Variation تغییر	Scenario سناریو	Variation تغییر	Scenario سناریو	Variation تغییر	Scenario سناریو	Variation تغییر	Scenario سناریو
P1	Max	25.7	C3T3	90	C3T2	70.6	C3T4	78	C3T2
	Min	-3	C4T1	2.1	C1T1	22.5	C1T1	67.9	C2T1
P2	Max	-200	C1T1	85.2	C3T4	29.8	C3T4	18.1	C2T4
	Min	31.8	C2T3	1.3	C3T1	4.8	C1T1	4.2	C3T1

Precipitation P1:+20%, P2:-20%, Temperature T1:1, T2:2, T3:3, T4: 4, CO₂ C1:462.5ppm, C2:527.5ppm, C3:725ppm.

۴- بیشینه سنجه سطح برگ

همچنین اگر بارش ۲۰ درصد کاهش پیدا کند، پیش‌بینی می‌شود که یکنواختی حداکثر سنجه سطح برگ نسبت به دوره پایه، در همه شهرستان‌ها کاهش خواهد یافت، سنندج و دهگلان، به ترتیب بیشترین و کمترین یکنواختی را در مقایسه با دوره پایه خواهند داشت (جدول ۶).

با افزایش بارش ۲۰ درصد، یکنواختی بیشینه سنجه سطح برگ نسبت به دوره پایه، در دیواندره و سقز کاهش پیدا خواهد کرد. سنندج و دیواندره، به ترتیب بیشترین و کمترین یکنواختی را در مقایسه با دوره پایه خواهند داشت.

جدول ۶- درصد تغییر یکنواختی بیشتر سنجه سطح برگ نسبت به دوره پایه، در سناریوهای افزایش و کاهش ۲۰ درصدی بارش
Table 6. Percentage of changes in maximum leaf area index compared to the base period, under scenarios of 20% increase and decrease in rainfall

		Dehgolan دهگلان		Divandareh دیواندره		Saghez سقز		Sanandaj سنندج	
		Variation تغییر	Scenario سناریو	Variation تغییر	Scenario سناریو	Variation تغییر	Scenario سناریو	Variation تغییر	Scenario سناریو
P1	Max	25	C3T1	37	C3T4	46.5	C3T2	52.1	C1T3
	Min	8.9	C2T4	-3.3	C1T1	-2.3	C1T2	33.6	C3T1
P2	Max	-92.8	C2T4	-46.5	C3T2	-20.9	C3T1	-15.2	C3T1
	Min	32.1	C3T1	-2.3	C3T4	-9.3	C3T2	-5.4	C1T2

Precipitation P1:+20%, P2:-20%, Temperature T1:1, T2:2, T3:3, T4: 4, CO₂ C1:462.5ppm, C2:527.5ppm, C3:725ppm

۵- گل دهی، بیشینه سنجه سطح برگ،

رسیدگی فیزیولوژیک

در همه شهرستان‌های مورد مطالعه، با افزایش دما، بیشینه زمان گلدهی، رسیدگی فیزیولوژیک نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت (جدول ۷). در میان شهرستان‌های مورد بررسی، بیشینه و کمینه بازه گلدهی، رسیدگی فیزیولوژیک به ترتیب در سنندج و دیواندره خواهد بود، که به دلیل بالاتر بودن دمای متوسط روزانه در سنندج (۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد) و پایین‌تر بودن دمای متوسط روزانه در دیواندره (۸/۲ درجه سانتی‌گراد)، نسبت به دو شهرستان دیگر می‌باشد. سایر مطالعات نشان داده است که با افزایش میانگین دما، طول فصل رشد گندم و زمان گلدهی کاهش می‌یابد (Sadras and Monzon, 2004; Lal et al., 2006). همچنین (Rosenzweig et al., 2004) پیش‌بینی نمودند که طول فصل رشد گیاهان در ایران با افزایش دما به شدت کاهش خواهد یافت و تولید محصول غلات نیز حدود ۴۰ - ۵ درصد در کشاورزی دیم دچار افت خواهد شد. در پژوهش دیگر، افزایش دما سبب تسریع زمان گلدهی نسبت به دوره پایه شده است (Nasiri et al., 2006; Roberts and Summerfield, 2007; Valizadeh et al., 2013).

افزایش دما، سرعت رشد و نمو محصول‌های زراعی را افزایش خواهد داد، با این حال شواهد آزمایشی نشان داده است که تحت این شرایط، طول دوره‌ی رسیدگی دانه در غلات و گیاهان دانه‌ای کوتاه‌تر خواهد شد (Parry et al., 2004). طبق مطالعه (Kochaki and Nasiri, 2008)، افزایش دما در شرایط اقلیمی آینده (۲۰۵۰) طول فصل رشد گندم در ایران را به صورت قابل توجهی کاهش خواهد داد. این کاهش فصل رشد از ۲۸ تا ۳۳ روز در جنوب و شرق و ۲۰ تا ۲۲ روز به ترتیب در مناطق غربی و شمال کشور متغیر است. نتایج (Valizadeh et al., 2013) نیز در بررسی اثرهای تغییر اقلیم بر عملکرد گندم در استان سیستان و بلوچستان نشان داد که طول فصل رشد گندم

در منطقه‌ی مورد بررسی تحت سناریوهای A2، B1 و A1B و مدل‌های اقلیمی HadCM3 و IPCM4 در سه دوره‌ی ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ نسبت به دوره‌ی پایه کاهش می‌یابد. افزایش دما در مطالعات زیادی سبب تسریع زمان رسیدگی فیزیولوژیک و کاهش دوره رشد نسبت به دوره پایه شده است (Koocheki et al., 2006; Ozdoghan, 2011; Lashkari et al., 2012).

نتایج مطالعه اثر تغییرات دما بر وقوع حداکثر سنجه سطح برگ نشان داد که با افزایش دما در همه شهرستان‌های مورد مطالعه، وقوع بیشینه سنجه سطح برگ نسبت به دوره پایه تسریع پیدا خواهد کرد به نحوی که با افزایش بیشتر دما، شدت تسریع وقوع حداکثر سنجه سطح برگ نیز بیشتر خواهد شد (جدول ۷). بیشترین و کمترین شدت تسریع وقوع حداکثر سنجه سطح برگ در میان شهرستان‌های مورد بررسی به ترتیب در دهگلان و دیواندره خواهد بود؛ که این امر می‌تواند به دلیل بالاتر بودن مقدار رطوبت اولیه آب در دهگلان (۲۵۹ میلی‌متر) و پایین‌تر بودن مقدار رطوبت اولیه آب در دیواندره (۱۵۶ میلی‌متر) باشد. افزایش دما، سرعت رشد و نمو محصول‌ها را افزایش می‌دهد (Parry et al., 2004) که چه بسا وجود آب به همراه افزایش دما سبب افزایش سرعت رشد و رسیدن سریع‌تر به بیشینه سنجه سطح برگ شده است.

۶- عملکرد زیست شناختی گندم

بر اساس پیش‌بینی مدل APSIM با افزایش بارش، نوسان عملکرد زیست شناختی نسبت به دوره پایه، در سنندج کاهش پیدا خواهد کرد. سنندج و دهگلان، به ترتیب بیشترین و کمترین یکنواختی عملکرد زیست شناختی را در مقایسه با دوره پایه خواهند داشت، همچنین اگر بارش ۲۰ درصد کاهش پیدا کند، پیش‌بینی می‌شود که نوسان عملکرد زیست شناختی نسبت به دوره پایه، در همه شهرستان‌ها افزایش خواهد یافت، سنندج و دیواندره به ترتیب بیشترین و کمترین یکنواختی را در مقایسه با دوره پایه خواهند داشت (جدول ۸).

جدول ۷- بیشینه سنجه سطح برگ، گلدهی و رسیدگی نسبت به دوره پایه در دمای سناریو

Table 7. Maximum leaf area index, flowering, and ripening relative to the base period at the scenario temperature

	دما T(°C)	حداکثر سنجه سطح برگ LAI _{max} (Day)	گلدهی Flowering (Day)	رسیدگی
				Maturity (Day)
دهگلان Dehgolan	1	7-31	6-10	6-9
	2	14-45	13-17	12-16
	3	22-50	21-23	17-23
	4	29-56	28-31	27-30
دیواندره Divandareh	1	10-13	1-5	2-5
	2	14-28	8-11	8-13
	3	25-33	17-19	17-20
	4	32-39	17-19	22-26
سقز Saghez	1	7-9	6-7	4-5
	2	17-33	14-15	13-15
	3	26-46	21-22	21-22
	4	23-52	21-22	26-30
سنندج Sanandaj	1	11-24	7-9	7-9
	2	18-31	14-17	14-16
	3	29-38	23-24	22-47
	4	36-43	29-31	25-28

جدول ۸- درصد نوسان عملکرد بیولوژیک نسبت به دوره پایه، در سناریوهای افزایش و کاهش ۲۰ درصدی بارش

Table 8. Percentage of changes in biological yield uniformity compared to the base period under scenarios of 20% increase and decrease in precipitation

		Dehgolan دهگلان		Divandareh دیواندره		Saghez سقز		Sanandaj سنندج	
		Variation	Scenario	Variation	Scenario	Variation	Scenario	Variation	Scenario
		تغییر	سناریو	تغییر	سناریو	تغییر	سناریو	تغییر	سناریو
P1	Max	-37.3	C3T4	50.9	C3T1	38.9	C3T1	52.9	C3T1
	Min	-9.6	C1T3	-19.2	C1T1	-17.6	C1T2	34.2	C3T2
P2	Max	-209.6	C2T4	-75	C2T4	-39.6	C2T4	-28.8	C3T1
	Min	4.8	C3T4	12.5	C3T4	-11.3	C1T1	-4.8	C1T1

Precipitation P1:+20%, P2:-20%, Temperature T1:1, T2:2, T3:3, T4: 4, CO₂ C1:462.5ppm, C2:527.5ppm, C3:725ppm.

۲۰ درصد کاهش پیدا کند، پیش‌بینی می‌شود که نوسان

عملکرد نسبت به دوره پایه، در همه شهرستان‌ها افزایش خواهد یافت و سنندج و دیواندره به ترتیب بیشترین و کمترین یکنواختی را در مقایسه با دوره پایه خواهند داشت (جدول ۹).

۷- عملکرد دانه

با افزایش بارش ۲۰ درصد، نوسان عملکرد دانه نسبت به دوره پایه، در سنندج کاهش پیدا خواهد کرد. سنندج و دیواندره به ترتیب بیشترین و کمترین یکنواختی را در مقایسه با دوره پایه خواهند داشت. همچنین اگر بارش،

جدول ۹- درصد نوسان عملکرد دانه نسبت به دوره پایه، در سناریوهای افزایش و کاهش ۲۰ درصدی بارش

Table 9. Percentage of changes in grain yield uniformity compared to the base period under scenarios of 20% increase and decrease in rainfall

		Dehgolan دهگلان		Divandareh دیواندره		Saghez سقز		Sanandaj سنندج	
		Variation	Scenario	Variation	Scenario	Variation	Scenario	Variation	Scenario
		تغییر	سناریو	تغییر	سناریو	تغییر	سناریو	تغییر	سناریو
P1	Max	-16.6	C2T4	36.8	C2T3	-28.1	C2T4	42.4	C1T1
	Min	4.1	C1T1	-31.5	C1T3	18.7	C1T1	4.4	C2T4
P2	Max	-208.3	C2T4	-89.4	C3T2	-81.2	C3T4	-53.3	C3T3
	Min	16.6	C3T4	-21	C3T4	-6.2	C1T1	-4.4	C1T1

Precipitation P1:+20%, P2:-20%, Temperature T1:1, T2:2, T3:3, T4: 4, CO₂ C1:462.5ppm, C2:527.5ppm, C3:725ppm.

افزایش هرچه بیشتر دما و غلظت CO₂، سبب افزایش بیش از پیش عملکرد زیست شناختی و دانه خواهد شد، به طوریکه با افزایش ۴ درجه دما و غلظت ۷۲۵ ppm دی اکسیدکربن، بیشترین عملکرد در هر ۴ شهرستان به دست خواهد آمد (جدول ۱۰).

براساس پیش‌بینی مدل APSIM، نتایج نشان داد که افزایش همزمان دما و غلظت دی اکسیدکربن در مقایسه با دوره پایه، در سناریوهای افزایش و کاهش ۲۰ درصد بارش، عملکرد زیست شناختی و دانه را در تمام شهرستان‌های استان کردستان افزایش خواهد داد.

جدول ۱۰- درصد افزایش عملکرد زیست شناختی و عملکرد دانه نسبت به دوره پایه، در سناریوهای افزایش و کاهش ۲۰ درصدی بارش
Table 10. Percentage of increase in biological yield and grain yield compared to the base period under scenarios of 20% increase and decrease in rainfall

		Dehgolan دهگلان		Divandareh دیواندره		Saghez سقز		Sanandaj سنندج	
		Biomass yield عملکرد زیست شناختی	Grain yield عملکرد دانه	Biomass yield عملکرد زیست شناختی	Grain yield عملکرد دانه	Biomass yield عملکرد زیست شناختی	Grain yield عملکرد دانه	Biomass yield عملکرد زیست شناختی	Grain yield عملکرد دانه
		P1	Max	40.5	50	100	161.5	87.1	155.5
	Min	11.8	18.7	12.2	30.7	20.8	44.4	19.8	42.8
P2	Max	44.1	62.5	94.6	123	64.3	122.2	46.3	71.4
	Min	4.9	-3.1	16.2	7.7	14.8	22.2	3.7	21.4

Precipitation P1:+20%, P2:-20%.

نشان‌دهنده فراهمی دمایی بهینه برای رشد گندم و افزایش عملکرد زیست شناختی و دانه است. در اثر افزایش بارش، روند نوسان عملکرد زیست شناختی و دانه از روند تغییرات سنجه سطح برگ پیروی می‌کند؛ در شرایط کاهش محدودیت آب، سنجه سطح برگ افزایش یافته، گیاه به‌طور مؤثر از تشعشع محیطی استفاده کرده، در نتیجه زیست توده بیشتری را تولید می‌کند. در اثر کاهش بارش، روند نوسان عملکرد زیست شناختی و دانه با روند سنجه سطح برگ همخوانی نداشت؛ در شرایط محدودیت آب، سنجه سطح برگ لزوماً پاسخ مثبت از گیاه محسوب نمی‌شود، زیرا در چنین شرایطی سنجه سطح برگ به مفهوم تعرق بیشتر و نامطلوب است. افزایش همزمان دما و غلظت دی اکسیدکربن، در سناریوهای افزایش و کاهش ۲۰ درصدی بارش در مقایسه با دوره پایه، سبب افزایش عملکرد دانه گندم در هر ۴ شهرستان استان کردستان خواهد شد.

پی‌نوشت‌ها

¹ Agricultural Production Systems sIMulator

² Trial and Error

نتیجه‌گیری

در کشت دیم گندم، دما در طول فصل رشد، بارش، غلظت دی اکسید کربن از طریق سه مکانیسم، عملکرد دانه را در مرحله‌های مختلف فنولوژیک در اثر تغییر اقلیم تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ با اثر بر جذب تشعشع فعال فتوسنتزی در کانوپی (توسعه سطح برگ، پیری زودرس برگ)، راندمان مصرف نور، سنجه برداشت (کاهش در تخصیص مواد فتوسنتزی گیاه به دانه) سبب تغییر یکنواختی و کاهش عملکرد زیست شناختی و دانه می‌شود. در کشت دیم گندم، مقدار رطوبت اولیه آب در خاک از اهمیت بالایی برخوردار است؛ از عوامل مهم در کشت دیم، یکنواختی در مراحل مختلف فنولوژیک گندم است که در تحت تأثیر تغییر اقلیم است و بر افزایش عملکرد دانه گندم تأثیرگذار خواهد بود. در دوره پایه، شهرستان دهگلان با وجود متوسط بارندگی کمتر ولی به دلیل مقدار رطوبت اولیه بیشتر، بیشترین یکنواختی گلدهی و زمان رسیدگی فیزیولوژیک، بیشینه سنجه سطح برگ و بازه بیشینه سنجه سطح برگ را دارد.

اثر افزایش دما در تمامی شهرستان‌های استان کردستان،

منابع

- Ababaei, B., Sohrabi, T., Mirzaei, F. and Rezaordinejad, B. and Karimi, B., 2010. The effect of climate change on wheat yield and risk analysis (case study: Ruddasht region of Isfahan). *Journal of Soil and Water Knowledge*. 20(3), 135-150. (In Persian with English Abstract).
- Anonymous, 2017. *Agricultural Statistics. The first volume of crops. Year 2015-2016*. Ministry of Agriculture. (In Persian with English Abstract).
- Attri, S.D. and Rathore, L.S., 2003. Simulation of impact of projected climate change on wheat in India. *International Journal of Climatology*. 23, 693-705.
- Bannayan, M., Sadegi Lotfabadi, S., Sanjani, S., Mohamadian, A. and Aghaalikhani, M., 2011. Effects of precipitation and temperature on crop production variability in northeast Iran. *International Journal of Biometeorology*. 55, 387-401.
- Chen, C., Wang, E.L. and Yu, Q., 2010. Modeling wheat and maize productivity as affected by climate variation and irrigated supply in North China Plain. *Agronomy Journal*. 102, 1037-1049.
- Finger, R. and Schmid, S., 2007. Modeling agricultural production risk and the adaptation to climate change. Presentation at the EAAE Seminar Management of Climate Risks in Agriculture. 5th – 6th July, Berlin, Germany.
- Godwin, D.C. and Singh, U., 1998. Nitrogen Balance and Crop Response to Nitrogen in Upland and Lowland Cropping Systems. In: Tsuji, G., Hoogenboom, G., Thornton, P, (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Springer Netherlands, pp. 55-77.
- 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 Environment*. 442, 405-419.
- IPCC, 2013. Summary for policymakers. In: *Climate Change 2013: Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Toner, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bexm V., Midgley, P.M., (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- Kheyri, M., 2016. Investigation of the efficiency of APSIM-Wheat model in simulation of phenology and yield of dryland wheat in Iran. M.Sc. Thesis, Research Institute of Environmental Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. 95 p. (In Persian with English Abstract).
- Kochaki, A. and Nasiri Mahallati, M., 2008. The effect of climate change with increasing carbon dioxide concentration on wheat yield in Iran and evaluation of adaptation strategies. *Iranian Journal of Crop Research*. 6(1), 139-154. (In Persian with English Abstract).
- Kochaki, A., Nasiri Mahallati M., Jamali J. and Marashi H., 2006 a. Study of the effect of climate change on growth characteristics and yield of rain-fed wheat of Sardari cultivar using general circulation model. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 20(7), 83-95. (In Persian with English Abstract).
- Kochaki, A., Nasiri Mahallati M., Sharifi H.R., Zind, A. and Kamali G.A., 2001. Simulation of growth, phenology and production of wheat cultivars due to climate change in Mashhad. *Desert Magazine*. 2, 117-127. (In Persian with English Abstract).
- Koocheki, A., Nassiri, M. and Kamali, G.A., 2003. Weather condition of Iran under climate change. Project Report. Iran Meteorological Organization,

Tehran, Iran.

Koocheki, A., Nassiri, M., Soltani, A., Sharifi, H. and Ghorbani, R., 2006. Effect of climate change on growth criteria and yield of Sunflower and Chickpea crops in Iran. *Climatic Research*. 30, 247-253.

Lashkari, A., Alizadeh, A., Eyshi Rezaei, E. and Bannayan, M., 2012. Mitigation of climate change impacts on maize productivity in northeast of Iran: a simulation study. *Mitigation Adaptation Strategy Global Change*. 17, 1-16.

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 and Forest Meteorology*. 171-172, 234-248.

Manschadi, A.M., Soufizadeh, S. and Deihimfard, R., 2010. The role and importance of simulation modeling in improving crop production in Iran. *The Proceedings of the 11th Iranian Crop Science Congress*, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, pp. 234- 247.

Moradi, H.R., 2004. The effects of NOA index on climate of Iran. *Geography Resources*. 48, 17-30.

Moradi, R., Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M. and Mansoori, H., 2013. Adaptation strategies for maize cultivation under climate change in Iran: Irrigation and planting data management. *Mitigation Adaptation Strategy Global Change*. 18, 265-284.

Nadi, M.R., Askari A., Sufizadeh S., Cambodia, J. and Mahdavi Damghani, A.M., 2011. The effect of temperature change and rainfall on yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in Malayer city of Hamadan province. *Fourth National Congress of Iranian Beans. Organization of Agricultural Engineering and Natural Resources*, 8th – 9th

February, Arak, Iran. (In Persian with English Abstract).

Nasiri, M., Koocheki, A., Kameli, G.A. and Shahandeh, H., 2006. Potential impact of climate change on rainfed wheat production in Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 52, 113-124.

Nazemosadat, M.J., 2000. Winter drought in Iran: association with ENSO. *Drought Netw. News*. 13,1.

Nichalls, N., 1997. Increased Australian wheat yield due to recent climate trend. *Journal of Nature*. 387, 484-485.

Ozdoghan, M., 2011. Modeling the impacts of climate change on wheat yields in Northwestern Turkey. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 141, 1-12.

Parry, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M. and Gischer, G., 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*. 14, 53-67.

Prosekov, A.Y. and Ivanova, S.A., 2018. Food security: The challenge of the present. *Geoforum*. 91, 73-77.

Ranuzzi, A. and Srivastava, R., 2012. Impact of climate change on agriculture and food security. *ICRIER Policy Series*, No. 16.

Rodriguez Diaz, J.A., Weatherhead, J.W., Knox, E. and Camacho, E., 2014. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Regional Environmental Change*. 7, 149-159.

Rosenzweig, C. and Tubiello, F.N., 2007. Adaptation and mitigation strategies in agriculture: an analysis of potential synergies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 12, 855-873.

Semenov, M.A., 2009. Impacts of climate change on wheat in England and wales. The Royal Society. 6, 343-350.

Soltani, A., Robertson, M.J., Mohammad-Nejad, Y. and Rahemi-Karizaki, A., 2006. Modeling chickpea growth and development: leaf production and senescence. Field Crops Research. 99, 14- 23.

Tingem, M. and Rivington, M., 2009. Adaptation for crop agriculture to climate change in Cameroon: turning on the heat. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 14, 153-168.

Turner, N.C., 2001. Optimizing water use. In: Nosberger HA, Struik PC (Eds), International Crop Science. CAB International, Wallingford, UK, pp. 119-135.

Valizadeh, J., Ziaei, S.M. and Mazlounzadeh, S.M., 2013. Assessing climate change impacts on wheat production (a case study). Journal of the Saudi of Agricultural Science. 78, 2-9.

Zhang, Y., Feng, L., Wang, E., Wang, J. and Li, B., 2012. Evaluation of the APSIM-Wheat model in terms of different cultivars, management regimes and environmental conditions. Canadian Journal of Plant Science. 92, 937-949.





Environmental Sciences Vol.19 / No.1 / Spring 2021

143-160

Simulation of the effects of climate change on phenology and yield of dryland wheat in Kurdistan Province

Fateme Aghamir*, Saeid Soufizadeh and Ahmad Soheili

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

Received: 2020.03.07

Accepted: 2021.03.04

Aghamir, F., Soufizadeh, S. and Soheili A., 2021. Simulation of the effects of climate change on phenology and yield of dryland wheat in Kurdistan Province. *Environmental Sciences*. 19(1): 143-160.

Introduction: Climate change is one of the most important human challenges to food security in the agricultural sector, especially in arid and semi-arid regions. The most important climatic variables affecting crop yield are rainfall, temperature, and carbon dioxide, especially in rainfed areas. The results of previous research have indicated the undeniable effects of climate change on crop yields in Iran. The modeling approach can be used in selecting the appropriate plant and cultivar for a region, determining the optimal plant characteristics, determining the best crop management, predicting the effect of diversity and climate change on crop growth and yield, and estimating the potential yield at a low cost, fast, and accurate way to mitigate the adverse impacts of climate change on agriculture.

Material and methods: In the present study, the effect of temperature increase, 20% increase and decrease in precipitation, and increase of carbon dioxide concentration on phenology and yield of dryland wheat was studied in four cities of Dehgolan, Divandare, Saqez, and Sanandaj in Kurdistan Province with long-term climatic data of the region from 1370 to 1393. In order to simulate the daily growth and development of wheat in the conditions of climate change and to evaluate the potential effects of the simulation under the APSIM wheat model, 24 climate change scenarios and one baseline scenario were considered based on the product of temperature increase multiplied by +1, +2, +3, and +4 °C, 20% change in precipitation, and three concentrations of carbon dioxide (462.5, 527.5, and 725 ppm, respectively). Model inputs included climate (temperature, rainfall, and radiation), soil (soil water and soil nitrogen), genetic coefficients, and crop management information and its outputs including flowering date, physiological maturity date, maximum leaf area index date, leaf area index, grain yield, and biological yield were analyzed in future and past climatic conditions.

* Corresponding Author: *Email Address.* f_ghamir@sbu.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2021.1020>

Results and discussion: In scenarios with increasing rainfall compared to the base period, flowering uniformity and physiological maturity increased in all cities but Dehgolan, in which they decreased. The uniformity of the maximum range of the leaf area index has increased in all cities, with the lowest percentage of the increase occurring in Dehgolan. Also, the uniformity of the leaf area index increased in Dehgolan and Sanandaj, but in Saqez and Divandareh it decreased. With decreasing rainfall, flowering uniformity, physiological maturity, and the maximum range of leaf area index decreased in all cities and the percentage of uniformity reduction in Dehgolan was the lowest. With increasing rainfall, biological and grain yield fluctuations were highest in Dehgolan and lowest in Sanandaj. With decreasing rainfall, all cities had biological fluctuations, Sanandaj had the least and Divandareh had the most fluctuations.

Conclusion: The effect of climate change factors including temperature, precipitation, and carbon dioxide on different regions of Kurdistan Province was different. In rainfed cultivation, in the base period, wheat phenology and yield were affected by the initial water moisture in the soil. However, by changing the climate, wheat phenology could be justified by increasing the temperature with the optimal crop temperature and by increasing rainfall, with the wheat leaf area index.

Keywords: Physiological maturity, Grain yield, Flowering, APSIM model