



مقاله علمی - پژوهشی

بررسی روند تغییرات دمایی و اثرات آن بر طول دوره پر شدن دانه و پتانسیل عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) در مناطق مختلف ایران در طی یک دوره ۲۰ ساله (۹۱-۱۳۷۱)

رضا عباسی علی کمر^۱، مهدی نصیری محلاتی^{۲*} و علیرضا کوچکی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۲۱

عباسی علی کمر، ر.، نصیری محلاتی، م. و کوچکی، ع.، ۱۳۹۹. بررسی روند تغییرات دمایی و اثرات آن بر طول دوره پر شدن دانه و پتانسیل عملکرد گندم (*Triticum aestivum* L.) در مناطق مختلف ایران در طی یک دوره ۲۰ ساله (۹۱-۱۳۷۱). بوم‌شناسی کشاورزی، ۱۲(۲): ۳۴۳-۳۱۹.

چکیده

میانگین دمای سطحی زمین در طی ۳۰ سال گذشته در طی هر دهه ۰/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است. ایران نیز از این گرمایش جهانی به دور نبوده و اثرات آن در نقاط مختلف کشور مشهود می‌باشد. این تغییرات دما اثرات زیادی بر دوره‌های رشد گیاهان دارد و به تبع آن تولید گیاهان زراعی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش روند تغییرات دمای ۱۸ شهر از چهار ناحیه اقلیمی (خزری، گرم، معتدل و سردسیر) در طی ۲۰ سال گذشته (۹۱-۱۳۷۱) مورد مطالعه قرار گرفت و با استفاده از مدل شبیه‌سازی WOFOST مراحل گل‌دهی و رسیدگی گندم آبی (*Triticum aestivum* L.) در هر منطقه مشخص شد. سپس تغییرات مراحل گل‌دهی و رسیدگی و همچنین عملکرد گندم و رابطه آن‌ها با دما در هر ناحیه بررسی شد. نتایج نشان داد که در طی سال‌های مورد مطالعه، در تمامی ۱۸ شهر کشور، دمای میانگین سالانه افزایش یافت که در آن اردیبهشت بیشترین شدت افزایش دما (۰/۱۵۹) درجه سانتی‌گراد به‌ازای هر سال) و پارس‌آباد معان کمترین شدت افزایش دما (۰/۰۶۶) درجه سانتی‌گراد به‌ازای هر سال) را نشان داد. واسنجی و تغییرات پارامترهای مدل WOFOST بر اساس داده‌های واقعی و صحت‌سنجی مدل با RMSE% و آزمون شیب خط رگرسیون برای شهرهای منتخب هر ناحیه اقلیمی انجام شد. نتایج نشان داد که این مدل با دقت بالایی قادر به تخمین مراحل گل‌دهی و رسیدگی گندم بود. در مناطق گرم و مرطوب خزری افزایش دمای میانگین سالانه، با شدت کمی طول دوره پر شدن و عملکرد دانه را افزایش داده که احتمالاً به‌دلیل اثرات تعدیلی رطوبت هوا در این مناطق بوده است. اما در مناطق گرم و خشک جنوب و مرکز ایران افزایش دما به‌تدریج با ایجاد تنش در دوره رسیدگی دانه منجر به کاهش طول دوره پر شدن دانه و کاهش عملکرد گندم شده است. در مناطق معتدل نیز با افزایش دما، کاهش طول دوره پر شدن و عملکرد دانه گندم مشهود بود. با افزایش دمای میانگین سالانه در مناطق سردسیر، طول دوره پر شدن دانه افزایش یافته که دلیل آن احتمالاً عدم برخورد ابتدای دوره زایشی با سرمای خسارت‌زا بوده است و قرار گرفتن دوره پر شدن دانه در محدوده دمایی مناسب در این نواحی منجر به افزایش عملکرد شده است. میانگین عملکرد پتانسیل گندم با در نظر گرفتن سهم شهرهای مورد مطالعه از تولید کل کشور در طی یک دهه (۸۱-۱۳۷۱) به‌میزان ۱/۸٪ و در طی دو دهه (۹۱-۱۳۷۱) به‌میزان ۳/۲۸٪ کاهش داشته است.

واژه‌های کلیدی: تغییرات اقلیم، رگرسیون، شبیه‌سازی، گرمایش جهانی، WOFOST

مقدمه

۷۰۰۰ سال پیش بوده که پس از اتمام آن، دوره اقلیمی کنونی شروع شده است (NASA, 2011). گرمایش کنونی کره زمین از این جهت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که دلیل اصلی بروز آن، فعالیت‌های انسانی بوده است و در ۱۳۰۰ سال گذشته زمین بی‌سابقه می‌باشد (Pachauri et al., 2007). در سال ۱۹۸۸، هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC) در گزارش خود، قطعیت گرمایش در سیستم‌های اقلیمی را مورد تأکید قرار داد و اعلام کرد که در مقیاس جهانی از سال ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۲ میلادی افزایش میانگین دما در سطح کره زمین

در طی سالیان گذشته دوره‌های متعددی از تغییرات دمایی در اقلیم کره زمین ثبت شده است. به‌طوری‌که در طی ۶۵ هزار سال گذشته هفت دوره یخبندان ثبت شده که آخرین آن‌ها مربوط به

۱- دانشجوی دکتری گروه آگرو تکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

۲- استاد گروه آگرو تکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

*- نویسنده مسئول: (Email: mnassiri@um.ac.ir)

Doi:10.22067/jag.v12i2.58737

1- Intergovernmental Panel on Climate Change

فولوژی و رشد گیاهان زراعی صورت گرفته و تأثیرات تغییر اقلیم به‌صورت وقوع گل‌دهی سریع‌تر در نخود (*Cicer arietinum*) و آفتاب‌گردان (*Helianthus annuus*) (Koocheki et al., 2006)، کاهش طول دوره رشد و عملکرد ذرت (*Zea mays*) (Bafkar et al., 2014; Moradi et al., 2014)، تسریع در گل‌دهی زعفران (*Crocus sativus*) (Koocheki et al., 2009)، کاهش طول فصل رشد، شاخص برداشت و عملکرد گندم (*Triticum aestivum*) (L. Koocheki et al., 2006; Koocheki & Kamali, 2010;)، و گندم آبی (Nassiri et al., 2006) و گندم آبی (Delghandi et al., 2014;)، گزارش شده است. (Ghrineh et al., 2016; Koocheki et al., 2001)

شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم نشان داد که افزایش حرارت در شرایط اقلیمی سال ۱۴۰۰ منجر به کاهش ۲۶ روزه در طول دوره رشد گندم در شرایط مشهد خواهد شد. شاخص‌های فیزیولوژیک نظیر تعداد و سطح برگ‌ها نیز تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار خواهد گرفت (Koocheki et al., 2001).

پیش‌بینی مراحل فنولوژیک بر اساس داده‌های اقلیمی برای یک‌گونه خاص به‌عنوان یکی از مشکلات تحقیقاتی در قرن ۲۱ مطرح شده است؛ که برای رفع این مشکل و پیش‌بینی رفتارهای فنولوژیک در گیاهان ناگزیر به استفاده از مدل‌های رشدی خواهیم بود (Cleland et al., 2007). WOFOST یک مدل شبیه‌سازی رشد محصول بوده و قادر است رشد گیاهان زراعی یک‌ساله را به‌صورت روزانه در شرایط پتانسیل و محدودیت آب بر اساس خصوصیات گیاهی، پارامترهای روزانه هواشناسی و خصوصیات فیزیکی خاک شبیه‌سازی کند (Boogaard et al., 1998). کاتالین و همکاران (Catalin et al., 2009) در رومانی، وو و همکاران (Wu et al., 2006) در چین، بافکار و همکاران (Bafkar et al., 2014) در منطقه ماهی‌دشت کرمانشاه و قرینه و همکاران (Gharineh et al., 2016) در خوزستان از این مدل شبیه‌سازی WOFOST برای مطالعات گیاهان زراعی مختلف استفاده کرده‌اند و در تمامی مطالعات دقت این مدل در شبیه‌سازی مراحل رشدی و برآورد عملکرد قابل قبول گزارش شد.

با توجه به نوع مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی رشد گیاهان و همچنین سال‌های مورد مطالعه نتایج متفاوتی در مورد عملکرد گندم گزارش شده است. گرچه گزارشاتی مبنی بر افزایش عملکرد گندم در اثر تغییر اقلیم ارائه شده است (Ainworth et al., 2005;)، اما این مطالعات عمدتاً اثرات افزایش CO₂ را بررسی کرده‌اند. به نظر می‌رسد افزایش درجه حرارت و کاهش بارش‌ها اثرات مطلوب افزایش CO₂ را خنثی می‌کند. لذا اثرات ترکیبی تغییر اقلیم عمدتاً منجر به کاهش

مشهود بوده است، به‌طوری‌که گرم‌ترین دهه کره زمین در فاصله زمانی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ ثبت شده است (IPCC, 2013). بررسی دماهای ثبت شده در طی ۵۲ سال منتهی به سال ۲۰۱۰ نشان داد که حاشیه غربی قطب جنوب بیشترین سرعت افزایش دما در جهان را داشته است. به‌طوری‌که از سال ۱۹۵۸ تا ۲۰۱۰، میانگین دمای سالانه این منطقه ۲/۴ درجه سانتی‌گراد (تقریباً ۰/۴۸ درجه سانتی‌گراد به‌ازای هر دهه) گرم‌تر شده است (Bromwich et al., 2013).

بررسی یک دوره زمانی ۳۰ ساله در ۳۴ ایستگاه سینوپتیک ایران، نشان داد که در ۶۸٪ ایستگاه‌ها، روند افزایش دما و در ۳۲٪ ایستگاه‌ها روند کاهش دما ثبت شده است (Shirgholami & Ghahraman, 2005). طبری و حسین‌زاده (Tabari & Hosseinzadeh Talaei, 2011) داده‌های یک دوره ۳۹ ساله (۱۹۶۶ تا ۲۰۰۵ میلادی) را در ۱۹ ایستگاه هواشناسی واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور مورد بررسی قرار دادند. بر اساس این تحقیق، تغییرات دمایی برای دمای حداکثر و حداقل در دوره‌های سالانه، فصلی و ماهانه در اغلب ایستگاه‌ها روند افزایشی نشان دادند. فنولوژی، مطالعه رویدادهای متناوب در طول دوره زندگی گیاهان و جانوران است که ارتباط تنگاتنگی با محیط و به‌خصوص تغییرات فصلی دما دارد (Cleland et al., 2006). درک زمان‌بندی مراحل نمو گیاه و مطالعه تغییرات آن بر اثر تغییر اقلیم، می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی برای بهینه‌سازی تولید نقش به‌سزایی داشته باشد.

با قبول فرض ادامه‌دار بودن افزایش دما و با قبول این مسئله که واکنش موجودات زنده به دما تأثیر گسترده و شناخته‌شده‌ای بر فعالیت‌های نمو گیاهان دارد (Menzel et al., 2006)، تغییر مراحل فنولوژیک گیاهان و به تبع آن تغییرات تولید محصولات زراعی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. آنچه مسلم است شدت اثرات تغییر اقلیم بر گیاهان بیش از دیگر موجودات است، زیرا گیاهان در مقایسه با سایر موجودات، امکان فرار از شرایط نامساعد محیطی را ندارند (Koocheki et al., 1998).

منزل و همکاران (Menzel et al., 2006) با مطالعه داده‌های فنولوژیک ۱۲۵۰۰۰ سری زمانی در ۲۱ کشور اروپایی در طی یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۷۱-۲۰۰۰) که حاصل مطالعه بر روی ۵۴۲ گونه گیاهی و ۱۹ گونه جانوری بوده است، دریافتند که مراحل فنولوژی (برگ‌دهی، گل‌دهی و میوه‌دهی) در ۷۸٪ گونه‌های گیاهی زودتر بروز کردند که در یک‌سوم موارد این تسریع از نظر آماری معنی‌دار بود.

در ایران نیز مطالعات متعددی بر روی اثرات تغییر اقلیم بر

حداقل نمودن خطا بین دو متغیر مستقل (زمان، X) و وابسته (دما، Y) به دست می آید. معنی داری رگرسیون بر اساس تجزیه واریانس رگرسیون با استفاده از نرم افزار Excel مورد بررسی قرار گرفت.

ناحیه بندی اقلیمی ایران با اصلاحات اعمال شده به روش کوپن (Koppen, 1936) صورت گرفت (Kasmai, 2006)، شهرهای مورد مطالعه بر اساس گروه بندی ایستگاه های تحقیقات گندم کشور و با در نظر گرفتن ارتفاع از سطح دریا، طول دوره یخبندان، حداقل مطلق دمای سالیانه و نوع تنش های موجود (Saidi & Chokan, 2000) در چهار گروه خزری، معتدل، گرم و سرد دسته بندی شدند (جدول ۲). در هر ناحیه یک شهر شاخص در نظر گرفته شد که حداقل هشت سال داده فنولوژیک واقعی (طی سال های ۲۰۰۹-۲۰۰۱) در آن قابل استناد بود.

در این تحقیق از نسخه WOFOST control center v. (February 2014) 2.1.2 برای شبیه سازی مراحل گل دهی و رسیدگی و عملکرد گندم استفاده شد و شرایط شبیه سازی در حالت پتانسیل اجرا گردید (Boogaard et al., 2014). لازم به ذکر است که منظور از شرایط پتانسیل شریطی است که گیاه بدون محدودیت آب و مواد غذایی در محیطی عاری از علف های هرز، آفات و بیماری ها گیاهی رشد می کند. برای این منظور پارامترهای گیاهی مناسب با اقلیم هر منطقه شامل T_{SUM1} (مجموع درجه حرارت از جوانه زنی تا گل دهی) T_{SUM2} (مجموع درجه حرارت از گل دهی تا رسیدگی) برای مدل تعریف شد. داده های هواشناسی شامل دمای حداقل روزانه، دمای حداکثر روزانه و تشعشع روزانه که برای مدل سازی در شرایط پتانسیل ضروری بودند به فرمت استاندارد مدل (CABO-Format) تهیه و در مدل WOFOST وارد شد.

برای واسنجی مقادیر شبیه سازی شده از داده های واقعی نتایج آزمایشات به نژادی گندم (سال های ۲۰۱۰-۱۹۹۵) استفاده شد (Seed & Plant Improvement Institute, 1995-2010). در هر ناحیه اقلیمی، پارامترهای گیاهی مورد نیاز برای واسنجی مدل WOFOST، برای رقم گندم آبی که در سال صحت سنجی مدل (۲۰۰۶) به عنوان رقم شاهد در آزمایشات به نژادی مراکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی مشخص شده بود مورد استناد قرار گرفت.

صحت تاریخ های گل دهی و رسیدگی که با مدل WOFOST شبیه سازی شده بودند در چهار شهر شاخص، با آماره $RMSE\%$ (معادله ۱) مورد اعتبارسنجی قرار گرفت.

عملکرد گندم شده است (Koocheki et al., 2001). به طوری که برای گندم آبی ۲۱-۱۴ درصد (Koocheki et al., 2008) و برای گندم دیم ۱۳/۸ و ۲۰/۷ درصد کاهش اعلام شده است (Nassiri et al., 2006).

مطالعات متعددی سعی در بررسی تغییرات در شرایط اقلیمی آینده داشته اند که عمدتاً بر اساس پیش بینی شرایط دمایی با مدل های گردش عمومی صورت گرفته است. هدف این مطالعه یافتن روندهای دمایی گذشته ایران بر اساس مشاهدات دمایی ثبت شده در طی ۲۰ سال منتهی به سال ۲۰۱۲ بوده است. همچنین در این مطالعه با استفاده از مدل WOFOST زمان ظهور مراحل گل دهی و رسیدگی بررسی و پتانسیل عملکرد گندم در سال های مختلف و در مناطق مختلف کشور شبیه سازی شد. انتظار می رود که نتایج این تحقیق با درک رفتار دمایی مناطق مختلف و اثراتی که این تغییرات دما در مراحل رشدی حساس و پتانسیل عملکرد گندم داشته است در جهت مدیریت بهینه کاشت، داشت و برداشت گندم با در نظر گرفتن محدودیت های هر منطقه، مؤثر باشد.

مواد و روش ها

این مطالعه روی ۱۸ شهر کشور شامل اهواز، اراک، اردبیل، بیرجند، بجنورد، گرگان، همدان، کرمان، کرمانشاه، خرم آباد، مشهد، ارومیه، پارس آباد مغان، سمنان، تبریز، زابل، اصفهان و شیراز صورت گرفت. شهرهای مورد مطالعه با توجه به وجود داده های اقلیمی درازمدت انتخاب شدند و سعی بر این بود که پراکنش مناسبی در سطح کشور داشته باشند. همچنین با توجه به مطالعه دوره رشدی گندم در این تحقیق، در مناطقی که تراکم شهرها زیاد بود (از جمله غرب و شمال کشور) بر اساس میزان سطح زیر کشت و تولید (Ministry of Agriculture-Jahad, 2015)، شهرستان هایی که سطح زیر کشت یا تولید آن ها کمتر از دو درصد کل کشور بود، حذف شدند. خصوصیات ایستگاه های مورد بررسی به شرح جدول ۱ است.

سال های مورد مطالعه از سال ۱۹۹۲ الی ۲۰۱۲ میلادی (۱۳۷۱ الی ۱۳۹۰ شمسی) بودند. داده های هواشناسی از سازمان هواشناسی کل کشور دریافت شد که پس از مرتب سازی داده ها، اطلاعات مربوط به هر ایستگاه هواشناسی واقع در ۱۸ شهر مورد مطالعه شامل دمای میانگین، حداکثر و حداقل روزانه برای هر سال استخراج شد. سپس روند تغییرات دمایی در هر شهرستان بر اساس دماهای میانگین، حداکثر و حداقل در طی ۲۰ سال از طریق آنالیز رگرسیون مورد مطالعه قرار گرفت.

برای بررسی روند، از آزمون رگرسیون به روش کمترین مربعات خطا استفاده شد. در این روش عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون با

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \cdot \frac{100}{O} \quad \text{معادله (۱)}$$

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی شهرهای مورد مطالعه و متوسط دماهای میانگین، حداکثر و حداقل سالانه، برای دوره مطالعاتی ۲۰ ساله (۹۱-۱۳۷۱)

Table 1- Geographic characteristics of selected cities and average of annual means, maximum and minimum temperature for 20 years (1992-2012)

ایستگاه Station	عرض جغرافیایی Latitude		طول جغرافیایی Longitude		ارتفاع از سطح دریا Altitude (m)	حداقل سالانه دما Mean Annual Min temperature (°C)	حداکثر سالانه دما Mean Annual Max temperature (°C)	میانگین سالانه دما Mean Annual temperature (°C)
	درجه Degree	دقیقه Minute	درجه Degree	دقیقه Minute		دما Annual Min temperature (°C)	دما Annual Max temperature (°C)	دما Annual temperature (°C)
اهواز Ahwaz	31	20	40	48	22	19.3	33.4	26.3
اراک Arak	34	6	46	49	1708	7.3	20.9	14.1
اردبیل Ardabil	38	24	29	48	1338	3.1	15.5	9.3
بیرجند Birjand	32	52	12	59	1491	8.6	24.6	16.6
بجنورد Bojnurd	37	28	19	57	1070	7	19.8	13.4
گرگان Gorgan	36	51	16	54	13	12.7	23.1	17.9
همدان Hamadan	34	52	35	48	1850	4	19.6	11.8
کرمان Kerman	30	15	58	56	1753	7.5	25.3	16.4
کرمانشاه Kermanshah	34	21	9	47	1318	7	23.7	15.4
خرم‌آباد Khoramabad	33	26	17	48	1147	8.7	25.1	16.9
مشهد Mashhad	36	16	38	59	999	9	22	15.5
ارومیه Orumieh	37	52	5	45	1315	5.4	18	11.7
پارس‌آباد Parsabad	39	51	57	47	34	9.9	20.7	15.3
سمنان Semnan	35	23	30	52	1130	13.1	24	18.5
تبریز Tabriz	38	5	17	46	1361	7.8	19	13.4
زابل Zabol	31	10	32	61	480	15.2	30.1	22.7
اصفهان Esfahan	32	37	40	51	1550	9.3	23.3	16.3
شیراز Shiraz	29	32	32	52	1480	11	26.2	18.6

جدول ۲- مشخصات اقلیم‌های ایران، رقم گندم و شهر شاخص هر اقلیم
Table 2- Characteristics of Iran's climates, wheat variety, and specific city of each climate

ناحیه Zone	اقلیم Climate	شهرهای واقع در اقلیم Cities in each zone	متوسط بارندگی Mean precipitation (mm)	رقم گندم Wheat Cultivar	شهر منتخب Selected City
1	اقلیم گرم و مرطوب سواحل دریای خزر Northern warm and humid climate	گرگان - پارس‌آباد مغان Gorgan, Parsabad Moghan	350 - 1000	تجن Tajan	گرگان Gorgan
2	اقلیم گرم و خشک جنوب Southern warm and dry climate	اهواز - شیراز - زابل - بیرجند Ahwaz, Shiraz, Zabol, Birjand	40-200	چمران Chamran	اهواز Ahwaz
3	اقلیم معتدل فلات مرکزی Temperates climate	مشهد - کرمان - کرمانشاه - اصفهان - سمنان - خرم‌آباد Mashhad, Kerman, Kermanshah, Khoramabad, Esfahan, Semnan	200-300	پشتاز Pishtaz	مشهد Mashhad
4	اقلیم سرد کوهستانی Cold and high elevation climate	اراک - اردبیل - بجنورد - همدان - ارومیه - تبریز Arak, Ardabil, Bojnourd, Hamedan, Orumieh, Tabriz	200-800	شهریار Shahriar	اراک Arak

بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

بررسی سابقه تاریخی اقلیمی شهرهای مورد مطالعه

تغییرات دمای حداکثر، حداقل و میانگین سالانه در شهرهای منتخب در طی دوره زمانی مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. در مطالعه روند میانگین سالانه دما در طی ۲۰ سال، در تمامی شهرهای مورد مطالعه، روند مثبت و معنی‌دار مشاهده شد که نشان از افزایش میانگین دمای سالانه در تمام شهرهای مورد مطالعه داشت. رگرسیون بین سال و دمای میانگین سالانه در شیراز، ارومیه و پارس‌آباد مغان در سطح ۹۵٪ و در سایر شهرها در سطح ۹۹٪ معنی‌دار بودند. کمترین شیب خط رگرسیون دمای میانگین سالانه مربوط به مربوط به پارس‌آباد مغان با مقدار ۰/۰۶۶ درجه سانتی‌گراد به‌ازای هر سال و بیشترین شدت گرمایش دمای میانگین سالانه مربوط به اردبیل با میزان ۰/۱۵۹ درجه به‌ازای هر سال بود. مسعودیان (Masoudian, 2004) در مطالعه ۵۰ ساله و علیجانی و همکاران (Alijani et al., 2011) در یک مطالعه ۴۰ ساله، روند افزایش دمای میانگین شبانه‌روزی ایران را تأیید کردند.

در این تحقیق طبق نتایج بررسی ۲۰ ساله دمای میانگین سالانه، افزایش میانگین دمای سالانه در پارس‌آباد مغان با سرعت تغییر ۰/۰۶۶ درجه سانتی‌گراد به‌ازای هر سال کمترین شدت تغییرات را به خود اختصاص دادند. جریانات اقلیمی دریای خزر و آثار تعدیلی رطوبت

که در آن، P_1 : مقادیر پیش‌بینی‌شده، O_i : مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{O} : میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و n : تعداد مشاهدات می‌باشد. در صورتی که $RMSE\%$ بین ۱ تا ۱۰ باشد، دقت پیش‌بینی مدل بسیار خوب، بین ۱۰ تا ۲۰، خوب، بین ۲۰ تا ۳۰، قابل‌قبول و بیشتر از ۳۰، ضعیف تفسیر می‌شود.

سپس خط رگرسیونی بین داده‌های فنولوژیک واقعی (سال‌های ۱۹۹۷-۲۰۰۹) و داده‌های شبیه‌سازی شده رسم و شیب خط رسم شده با شیب خط ۱:۱ به‌وسیله آزمون t-student مورد آزمون قرار گرفت تا دقت تخمین مراحل فنولوژیک در سال‌های مختلف به‌دست آید. $b=1$ به‌عنوان فرض صفر (H_0) و $b \neq 1$ به‌عنوان فرض یک (H_1) در آزمون t در نظر گرفته شد. بنابراین چنان‌چه در معادله ۲، فرض صفر پذیرفته شود به‌این معنی است که اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده معنی‌دار نیست و پذیرفته شدن فرض ۱ نیز عکس این موضوع را نشان می‌دهد.

$$\text{Simulated} = a + b \times \text{Observed} \quad (2)$$

پس از اطمینان از اعتبار مدل شبیه‌سازی، با استفاده از داده‌های هواشناسی، مدل برای شهرهای مختلف اجرا و مراحل گل‌دهی و رسیدگی و عملکرد در هر شهر و هر سال به‌دست آمد. سپس روند تغییرات طول دوره پر شدن دانه (فاصله زمانی گل‌دهی تا رسیدگی) و رابطه بین دما و طول دوره پر شدن دانه رابطه بین دما و عملکرد و نیز رابطه بین طول پر شدن دانه و عملکرد از طریق رگرسیون مورد

میانگین سالانه بود. در شهرهای مناطق سردسیر افزایش دمای میانگین سالانه عمدتاً به دلیل افزایش دمای حداقل سالانه بود.

هوای موجود در جو می‌تواند عامل مهمی در ثبات دمایی شهرهای حاشیه دریای خزر باشد (Zahedi et al., 2007). از طرف دیگر، شهرهای واقع در نواحی سردسیر کوهستانی (اردبیل و اراک) بیشترین شیب خط رگرسیون را داشتند که نشان از روند سریع‌تر افزایش دمای

جدول ۳- شیب خط (b)، سطح معنی‌داری (p) و ضریب تبیین (R^2) معادلات رگرسیون بین دماهای میانگین، حداکثر و حداقل سالانه و سال در طی سال‌های ۱۹۹۲ الی ۲۰۱۲ و دمای میانگین، حداقل و حداکثر سال ۱۹۹۲ برای ۱۸ شهر منتخب

Table 3- Slope (b), significance (p) and coefficient of determination (R^2) for regression line between annual maximum, minimum and mean temperature and year, during 1992-2012 and average of annual temperature at base year (1992) for 18 selected cities

شهر City	پارامتر Parameter	تغییرات سالانه دما Annual temperature trends			دمای میانگین در سال پایه (۱۳۷۱) Average of annual temperature at base year (1992) (°C)
		b	P ^۳	R ^۲	
اهواز Ahwaz	دمای حداکثر Max. Temp.	0.145	0.001	0.687	30.9
	دمای حداقل Min. Temp.	0.08	0.001	0.784	24.3
	دمای میانگین Ave. Temp.	0.097	0	0.52	17
اراک Arak	دمای حداکثر Max. Temp.	0.138	0.003	0.613	17.5
	دمای حداقل Min. Temp.	0.094	0.008	0.549	4.7
	دمای میانگین Ave. Temp.	0.116	0.004	0.598	11.1
اردبیل Ardabil	دمای حداکثر Max. Temp.	0.13	0.009	0.558	13
	دمای حداقل Min. Temp.	0.188	0	0.746	1.4
	دمای میانگین Ave. Temp.	0.159	0	0.601	7.2
بیرجند Birjand	دمای حداکثر Max. Temp.	0.107	0.001	0.488	22.8
	دمای حداقل Min. Temp.	0.064	0.005	0.674	7.2
	دمای میانگین Ave. Temp.	0.085	0.001	0.595	15
بجنورد Bojnurd	دمای حداکثر Max. Temp.	0.083	0.011	0.722	17.9
	دمای حداقل Min. Temp.	0.051	0.018	0.686	5.8
	دمای میانگین Ave. Temp.	0.067	0.007	0.653	11.8
گرگان Gorgan	دمای حداکثر Max. Temp.	0.121	0	0.544	21.5
	دمای حداقل Min. Temp.	0.031	0.285	0.467	11.2
	دمای میانگین Ave. Temp.	0.076	0.006	0.672	16.4
همدان Hamadan	دمای حداکثر Max. Temp.	0.131	0.003	0.524	16

	دمای حداقل	0.068	0.033	0.241	1.72
	Min. Temp.				
	دمای میانگین	0.1	0.006	0.67	8.8
	Ave. Temp.				
	دمای حداکثر	0.096	0.001	0.465	23.4
	Max. Temp.				
کرمان Kerman	دمای حداقل	0.093	0	0.6	6.3
	Min. Temp.				
	دمای میانگین	0.096	0	0.578	14.8
	Ave. Temp.				
	دمای حداکثر	0.089	0.054	0.602	20.4
	Max. Temp.				
کرمانشاه Kermanshah	دمای حداقل	0.084	0.001	0.48	5.5
	Min. Temp.				
	دمای میانگین	0.086	0.006	0.769	13
	Ave. Temp.				
	دمای حداکثر	0.119	0.002	0.438	22.3
	Max. Temp.				
خرم آباد Khoramabad	دمای حداقل	0.095	0.003	0.524	6.6
	Min. Temp.				
	دمای میانگین	0.107	0.001	0.463	14.4
	Ave. Temp.				
	دمای حداکثر	0.104	0.012	0.317	19.7
	Max. Temp.				
مشهد Mashhad	دمای حداقل	0.092	0	0.808	7.6
	Min. Temp.				
	دمای میانگین	0.098	0.001	0.759	13.6
	Ave. Temp.				
	دمای حداکثر	0.132	0	0.52	15.2
	Max. Temp.				
ارومیه Orumieh	دمای حداقل	0.021	0.521	0.525	3.7
	Min. Temp.				
	دمای میانگین	0.088	0.016	0.598	9.5
	Ave. Temp.				
	دمای حداکثر	0.059	0.077	0.172	19.7
	Max. Temp.				
پارس آباد Parsabad	دمای حداقل	0.074	0.003	0.514	8.7
	Min. Temp.				
	دمای میانگین	0.066	0.018	0.687	14.2
	Ave. Temp.				
	دمای حداکثر	0.141	0	0.65	21.5
	Max. Temp.				
سمنان Semnan	دمای حداقل	0.012	0.649	0.42	11.6
	Min. Temp.				
	دمای میانگین	0.076	0.007	0.558	16
	Ave. Temp.				
	دمای حداکثر	0.139	0.001	0.475	16.5
	Max. Temp.				
تبریز Tabriz	دمای حداقل	0.064	0.055	0.399	6.1
	Min. Temp.				
	دمای میانگین	0.101	0.006	0.664	11.3
	Ave. Temp.				

زابل Zabol	دمای حداکثر Max. Temp.	0.158	0	0.581	28
	دمای حداقل Min. Temp.	0.064	0.001	0.47	14.1
	دمای میانگین Ave. Temp.	0.111	0	0.595	21
اصفهان Esfahan	دمای حداکثر Max. Temp.	0.116	0.014	0.444	21.6
	دمای حداقل Min. Temp.	0.068	0.163	0.55	9.3
	دمای میانگین Ave. Temp.	0.091	0.004	0.427	15.4
شیراز Shiraz	دمای حداکثر Max. Temp.	0.101	0.377	0.64	24.2
	دمای حداقل Min. Temp.	-0.05	0.001	0.6	9.2
	دمای میانگین Ave. Temp.	0.068	0.024	0.59	16.7

* $p \leq 0.05$: معنی‌داری در سطح ۹۵٪، $p \leq 0.01$: معنی‌داری در سطح ۹۹٪
 $p \leq 0.05$: is significant in the level of 95%, $p \leq 0.01$: is significant in the level of 95%.

پیش‌بینی کردند؛ اما شیر غلامی و قهرمان (Shirgholami & Ghahraman, 2005) در مطالعه روند تغییرات میانگین دمای سالانه برای دوره ۳۰ ساله منتهی به ۱۹۹۸ تغییرات دمایی زابل را معنی‌دار ندانستند. احتمالاً این اختلاف در نتایج، به‌علت دوره زمانی متفاوت نوع مدل استفاده شده بوده است. خوش‌اخلاق و همکاران (Khoshakhlagh et al., 2011) نیز در مطالعه حداقل‌های سالانه دما تأکید کردند تغییرات زمانی حداقل مطلق دما در نواحی شمال غرب و کوهستانی کشور شدیدتر از ایستگاه‌های مرکز و جنوب کشور بود. مطالعات دیگری نیز حاکی از این است که شدت افزایش دمایی از شمال به جنوب و از شرق به غرب می‌باشد. (Nassiri Mahallati et al., 2006).

مدلسازی مراحل فنولوژیک گندم

برای واسنجی مدل WOFOST در هر ناحیه اقلیمی یک شهر شاخص انتخاب و پارامترهای مدل، با استفاده از داده‌های فنولوژیک واقعی که از یادداشت‌برداری‌های دفترچه آزمایشات به‌نژادی استخراج شدند، به شرح جدول ۴ تغییر نمود. این امر برای به حداقل رساندن RMSE صورت گرفت.

چنان‌که بیشترین شیب خط رگرسیون در دمای حداقل سالانه متعلق به اردبیل (۰/۱۸۸ درجه سانتی‌گراد) بود و اراک نیز در رتبه سوم قرار داشت. احتمالاً ارتفاع از سطح دریا در شهرهای سردسیر واقع در شمال غرب کشور در این روندهای دمایی مؤثرند. رابطه معنی‌دار و معکوس دمای میانگین سالانه با ارتفاع در تحقیق زاهدی و همکاران نیز گزارش شده است (Zahedi et al., 2007). نامبردگان اظهار داشتند که افزایش دمای میانگین سالانه در بیشتر مناطق شمال غرب کشور مشهود بوده است.

بررسی روند دماهای حداکثر سالانه نشان داد که بیشترین شدت تغییرات در شرق کشور و مناطق گرم و خشک جنوب کشور حادث شد. زابل در منطقه نیمه‌بیابانی شرق کشور و اهواز در منطقه گرم جنوب کشور به ترتیب با شدت تغییرات دمای حداکثر سالانه به‌میزان ۰/۱۵۸ و ۰/۱۴۵ درجه سانتی‌گراد به‌ازای هر سال شدیدترین سرعت گرمایش در حداکثر دمای سالانه را به خود اختصاص دادند. این مقدار تغییر در دمای حداکثر، بر میانگین دمای سالانه اهواز و زابل نیز تأثیر بسزایی داشته، به طوری که گرم‌ترین شهر از نظر میانگین دمای ۲۰ ساله، اهواز (۲۷/۳ درجه سانتی‌گراد) و در رتبه بعدی زابل (۲۲/۷ درجه سانتی‌گراد) بود (جدول ۱). حمیدیان‌پور و همکاران (Hamidianpour et al., 2016) افزایش دمای میانگین سالانه در زابل را با استفاده از مدل LARS-WG در پایان قرن ۲۱، حدود ۳/۰۸ درجه سانتی‌گراد

جدول ۴- ضرایب واسنجی مدل WOFOST در شهرهای منتخب نواحی اقلیمی ایران
Table 4- Calibration coefficients for WOFOST in selected cities of climatic zones of Iran

پارامتر	ناحیه ۱ (گرگان)	ناحیه ۲ (اهواز)	ناحیه ۳ (مشهد)	ناحیه ۴ (اراک)
Parameter	Zone1 (Gorgan)	Zone2 (Ahwaz)	Zone3 (Mashhad)	Zone4 (Arak)
TSUM ₁ (°Cd)	2100	2500	1700	1750
TSUM ₂ (°Cd)	900	750	750	800

TSUM₁: مجموع درجه حرارت از جوانه زنی تا گل دهی، TSUM₂: مجموع درجه حرارت از گل دهی تا رسیدگی
TSUM₁: Temperature sum from emergence to anthesis, TSUM₂: temperature sum from anthesis to maturity

نتایج اجرای مدل برای شهر شاخص هر ناحیه و مقدار RMSE% در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس نتایج موجود مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE%) برای مراحل فنولوژیک تعداد روز تا گل دهی و تعداد روز تا رسیدگی هر چهار شهر در دامنه ۱ تا ۱۰ درصد قرار گرفته و لذا مراحل فنولوژیک بسیار خوب تخمین زده شده است.

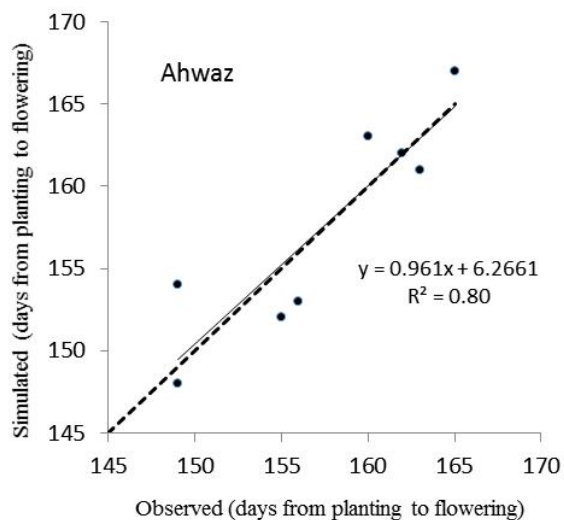
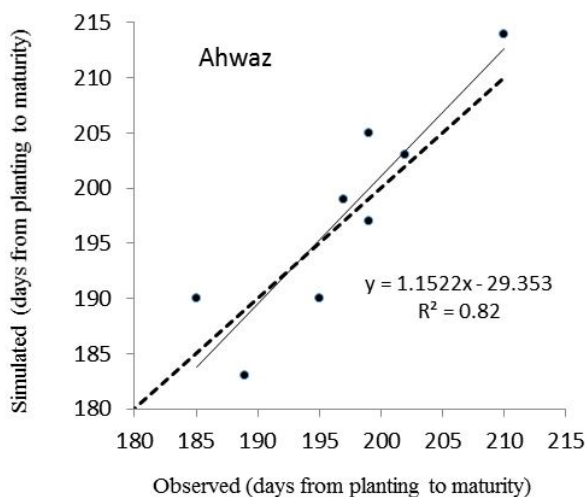
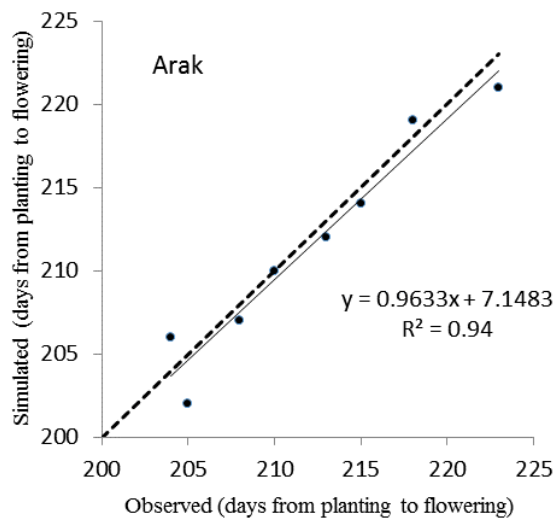
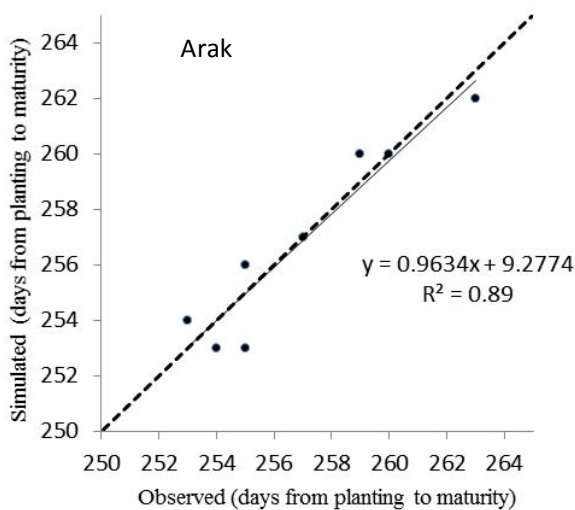
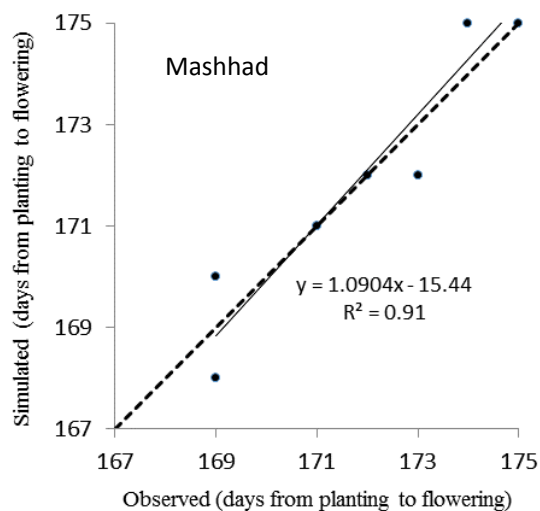
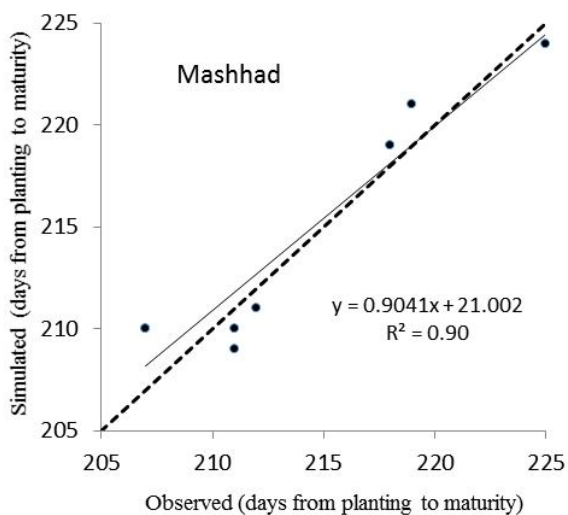
جدول ۵- میانگین هشت ساله مقادیر واقعی و شبیه سازی شده تعداد روز از کاشت تا گل دهی و تعداد روز از کاشت تا رسیدگی و تعیین اعتبار مدل WOFOST بر اساس درصد میانگین مربعات خطا (RMSE%) در چهار شهر منتخب از ایران

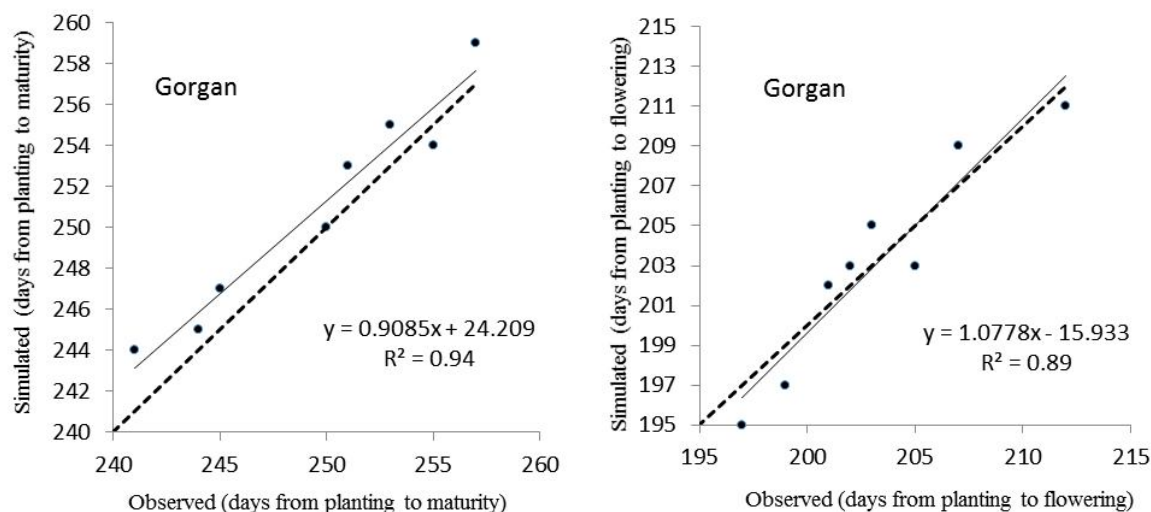
Table 5- Means of eight years for observed and simulated data of days from planting to flowering and days from planting to maturity and validation of WOFOST based on percentage of Root Mean Square Error (RMSE%) for four selected cities of Iran

	ناحیه ۱ (گرگان) Zone 1 (Gorgan)				ناحیه ۲ (اهواز) Zone 2 (Ahwaz)			
	تعداد روز کاشت تا گل دهی		تعداد روز کاشت تا رسیدگی		تعداد روز کاشت تا گل دهی		تعداد روز کاشت تا رسیدگی	
	Days planting to flowering	Days planting to maturity	Days planting to flowering	Days planting to maturity	Days planting to flowering	Days planting to maturity	Days planting to maturity	Days planting to maturity
	مشاهده شده	شبیه سازی شده	مشاهده شده	شبیه سازی شده	مشاهده شده	شبیه سازی شده	مشاهده شده	شبیه سازی شده
	Observed	Simulated	Observed	Simulated	Observed	Simulated	Observed	Simulated
میانگین Mean	201.7	201.6	201.7	201.6	156	153.5	194	192.1
%RMSE	4.22		6.9		9.19		7.8	
	ناحیه ۳ (مشهد) Zone 3 (Mashhad)				ناحیه ۴ (اراک) Zone 4 (Arak)			
	تعداد روز کاشت تا گل دهی		تعداد روز کاشت تا رسیدگی		تعداد روز کاشت تا گل دهی		تعداد روز کاشت تا رسیدگی	
	Days planting to flowering	Days planting to maturity	Days planting to flowering	Days planting to maturity	Days planting to flowering	Days planting to maturity	Days planting to maturity	Days planting to maturity
	مشاهده شده	شبیه سازی شده	مشاهده شده	شبیه سازی شده	مشاهده شده	شبیه سازی شده	مشاهده شده	شبیه سازی شده
	Observed	Simulated	Observed	Simulated	Observed	Simulated	Observed	Simulated
میانگین Mean	171.4	172.2	212.6	213.7	210.7	209.5	257.2	256.5
%RMSE	6.3		7.5		6.5		7.7	

بین مشاهدات و مقادیر پیش بینی شده برای مراحل فنولوژیک گندم آبی در چهار شهر مورد مطالعه با شیب خط ۱:۱ اختلاف معنی داری ندارد.

مقایسه نتایج شبیه سازی شده از تعداد روز تا گل دهی و تعداد روز تا رسیدگی با مقادیر واقعی و نتایج آزمون t-student نشان داد که فرض صفر برای ضریب b معادله رگرسیون برآزش داده شده قابل قبول بوده است. این بدان معنی است که شیب خط رگرسیون





شکل ۱- تعیین اعتبار مدل برای پیش بینی تعداد روز تا گل‌دهی (راست) و تعداد روز تا رسیدگی (چپ) در چهار شهر منتخب اقلیم‌های ایران
 Fig. 1- Validation of model for days to flowering (Right) and days to maturity (Left) for four selected cities of Iran

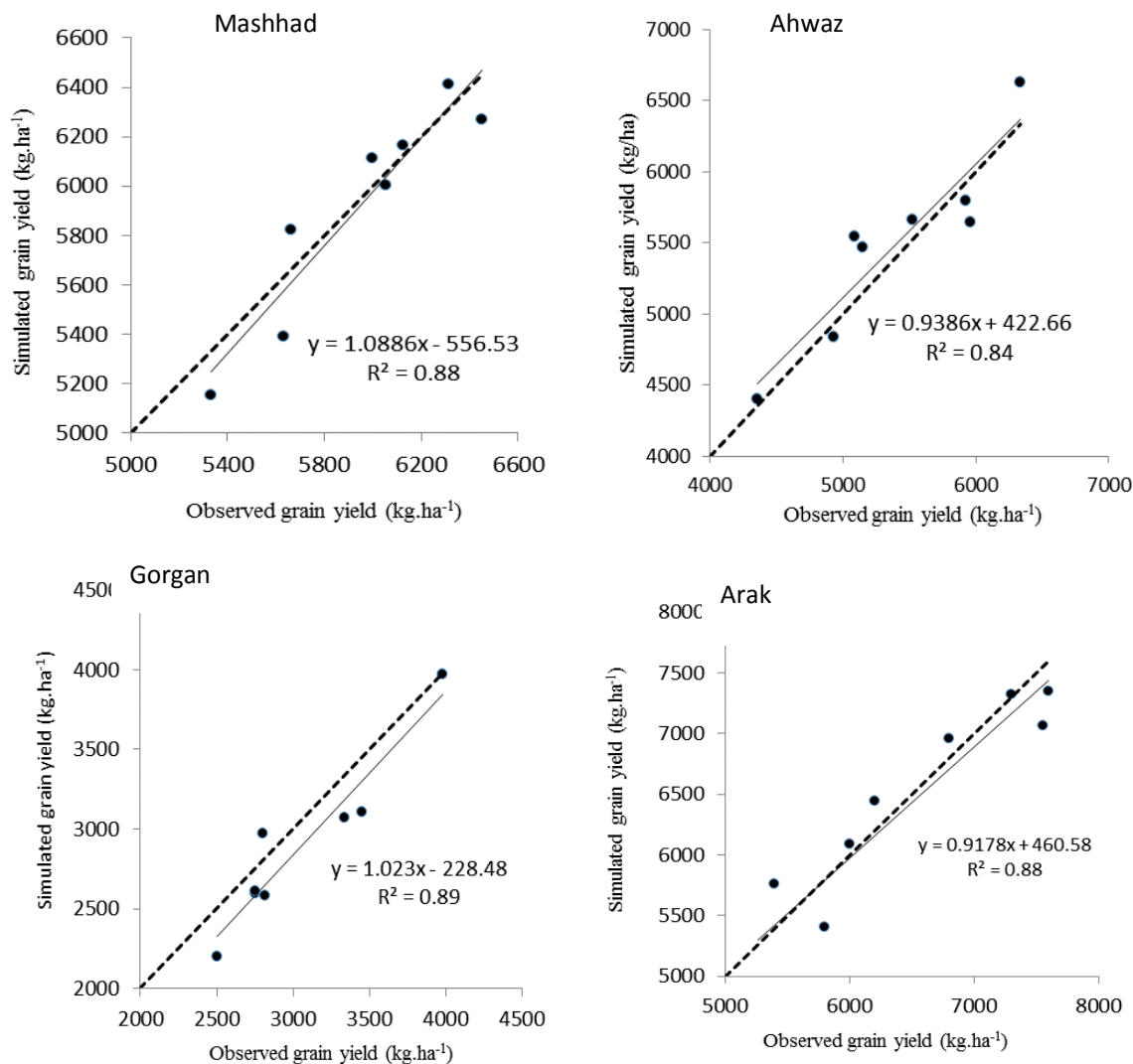
خط توپر برای خط رگرسیون و خط مقطع برای خط ۱:۱ نمایش داده شده است.
 Solid line represent regression lines and dash line represent 1:1 line.

میانگین درصد مجذور مربعات خطا در هر چهار شهر شاخص نواحی اقلیمی کشور در شبیه‌سازی عملکرد گندم آبی در محدوده بین ۱۰ تا ۲۰ درصد قرار گرفت و مقادیر آن برای شهرهای اهواز، مشهد، اراک و گرگان به ترتیب ۱۳/۱، ۱۰/۸۶، ۱۰/۱۳ و ۱۷/۴۲ درصد بود. این مقادیر نشان از برآورد خوب عملکرد دانه گندم با مدل WOFOST داشت. مقایسه شیب خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده با خط ۱:۱ در مورد عملکرد دانه گندم آبی در هر چهار شهر مورد مطالعه نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین شیب خط رگرسیون و شیب خط ۱:۱ وجود نداشت. بنابراین، مدل واسنجی شده از اعتبار کافی برای شبیه‌سازی عملکرد گندم آبی برخوردار بود.

اعتبارسنجی مدل WOFOST برای تخمین عملکرد گندم دیم ایران نیز حاکی از دقت بالای این مدل داشت و مقدار RMSE آن به میزان ۰/۰۴۷ تن در هکتار حدود ۷٪ میانگین عملکرد مشاهده شده گندم دیم گزارش شده است (Nassiri et al., 2006).

نصیری محلاتی و همکاران (Nassiri Mahallati et al., 2006) در اعتبارسنجی مدل WOFOST اظهار داشتند که این مدل عملکرد گندم دیم ایران را با دقت خوبی تخمین می‌زند. این محققین گزارش کردند که شیب خط رگرسیون و نمودار ۱:۱ غیرمعنی‌دار شد و مقدار RMSE به میزان ۰/۰۴۷ تن در هکتار حدود ۷٪ میانگین عملکرد مشاهده شده گندم دیم بود.

شخار و همکاران (Shekhar et al., 2008) نیز مدل WOFOST را برای بررسی مراحل فنولوژیک، برخی شاخص‌ها فیزیولوژیک و عملکرد دانه و کاه گندم در هندوستان مورد بررسی قرار داد. ایشان با اعلام RMSE% به مقدار ۱۰٪ برای جوانه‌زنی، ۸/۸٪ برای گرده‌افشانی، صفر برای رسیدگی، ۵٪ برای عملکرد دانه و ۱۹/۲٪ برای عملکرد کاه، در مجموع اعتبار مدل را برای شبیه‌سازی پارامترهای گندم، بسیار خوب توصیف کردند. ایشان تأکید کردند که WOFOST مراحل فنولوژیک گندم را با دقت بیشتری نسبت به عملکرد و شاخص‌های فیزیولوژیک تخمین می‌زند.



شکل ۲- تعیین اعتبار مدل برای پیش‌بینی عملکرد گندم آبی در چهار شهر منتخب از اقلیم‌های مختلف کشور

Fig. 2- Validation of Model for simulation wheat grain yield for four selected cities of Iran,

خط توپر برای خط رگرسیون و خط مقطع برای خط ۱:۱ نمایش داده شده است.

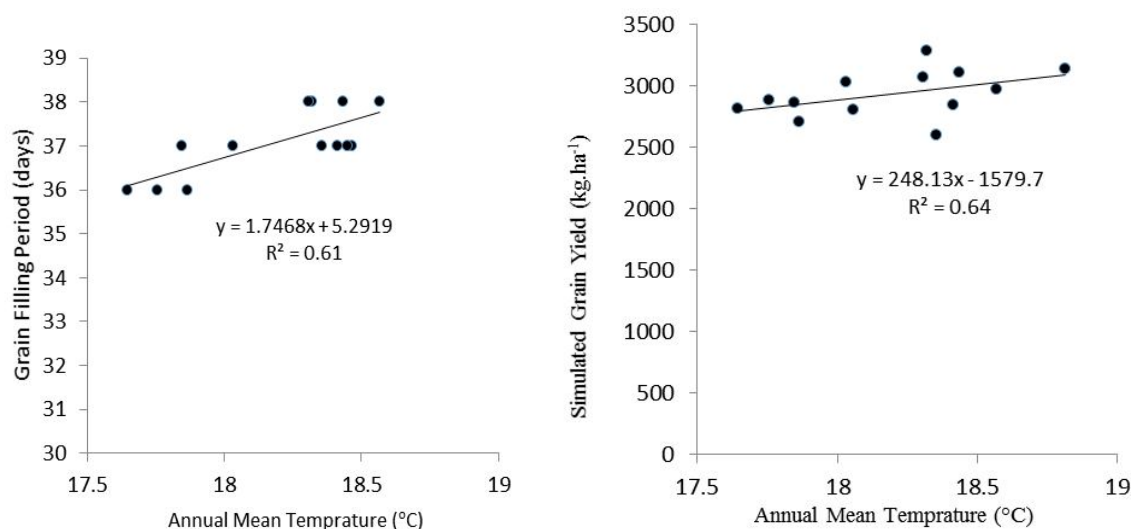
Solid lines represent regression line and dash line represent 1:1 line.

توجه به خروجی مدل WOFOST مشخص شد که با توجه به گرمایش سالانه معادل ۰/۰۷ درجه سانتی‌گراد (جدول ۳) طول مدت پر شدن دانه (فاصله گل‌دهی تا رسیدگی) افزایش داشته است که مقدار آن ۱/۷ روز به‌ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش میانگین دمای سالانه بود (شکل ۳).

بررسی روند تغییرات مراحل فنولوژیک و عملکرد گندم در نواحی اقلیمی متفاوت

ناحیه ۱: اقلیم گرم و مرطوب سواحل دریای خزر

شبیه‌سازی مراحل فنولوژیک و عملکرد در گرگان به‌عنوان شهر شاخص این ناحیه دقت بالایی نشان داد. بر این اساس مراحل فنولوژیک گندم در گرگان از سال ۲۰۱۲-۱۹۹۲ شبیه‌سازی و با



شکل ۳- تغییرات طول پر شدن دانه (راست) و عملکرد دانه (چپ) گندم با افزایش دمای میانگین سالانه در شرایط گرگان
 Fig. 3- Trends of grain filling period (right) and grain yield (left) of wheat related to annual mean temperature rise of Gorgan

کارایی صورت می‌گیرد و با توجه به شرایط بارندگی مناسب، عدم وجود تنش آبی و تعادل نسبی دمای شب و روز، مسئله تنش دمایی و افزایش تنفس مطرح نیست. هرچند به نظر می‌رسد مقدار گرمایش اقلیم در سال‌های اخیر بیشتر شده است، اما هنوز محدوده دمایی مناسب برای گندم در طول دوره پر شدن دانه مهیا می‌باشد. نتایج تحقیق کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2016) نیز نشان داد که تغییر اقلیم در شمال و قسمت‌هایی از شرق کشور کمترین اثرات منفی را داشته است. در پارس‌آباد مغان نیز افزایش عملکرد به مقدار ۳۲۲ کیلوگرم به‌ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش مشاهده شد (جدول ۶) و روند مشابه گرگان را نشان داد.

عملکرد پتانسیل دانه گندم با افزایش میانگین دمای سالانه با شیب خط ملایمی افزایش می‌یابد (۲۴۸ کیلوگرم به‌ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش دما)، (شکل ۳).
 با در نظر گرفتن اینکه میانگین دمای سالانه در این ناحیه در محدوده ۱۷/۶ تا ۱۸/۸ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته (شکل ۳) و با توجه به اینکه حداقل دمای سالانه در این منطقه با شیب خط کمی افزایش یافته است (جدول ۳)، می‌توان افزایش مختصر طول دوره پر شدن دانه را در ناحیه خزری به تسریع زمان گل‌دهی ناشی از کاهش دوره رشد رویشی گندم نسبت داد. احتمالاً در شرایط اقلیم دریای خزر در محدوده زمانی دوره پر شدن دانه، انتقال مواد با حداکثر

جدول ۶- شیب خط رگرسیون بین طول دوره پر شدن دانه با افزایش دما (روز بر درجه سانتی‌گراد)، عملکرد دانه با افزایش دما (کیلوگرم بر درجه سانتی‌گراد) و عملکرد دانه با طول دوره پر شدن دانه گندم (کیلوگرم بر روز) برای پارس‌آباد مغان (اقلیم گرم و مرطوب سواحل دریای خزر) در طی سال‌های ۱۳۷۱-۹۱

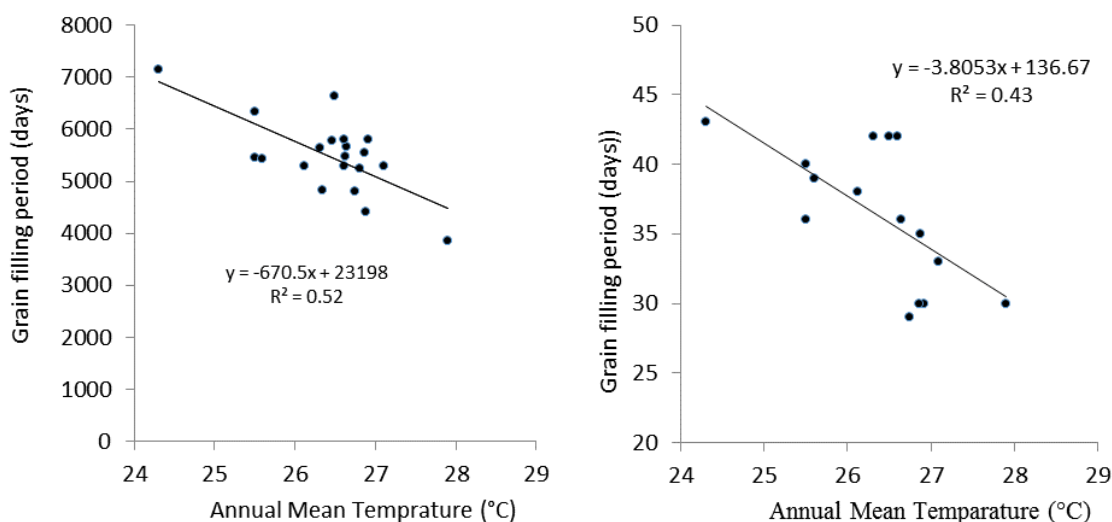
Table 6- Slop of regression line between simulated grain filling period and temperature rise (day.°C⁻¹), grain yield and temperature rise (kg.°C⁻¹) and grain yield and grain filling period (kg.day⁻¹) for Parsabad moghan (Northern Warm and Humid climate) during 1992-2012

شهر City	شیب خط رگرسیون بین طول دوره پر شدن دانه با افزایش دما Slop of regression line between grain filling period and temperature rise	شیب خط رگرسیون بین عملکرد شبیه‌سازی شده دانه با افزایش دما Slop of regression line between simulated grain yield and temperature rise	شیب خط رگرسیون بین عملکرد شبیه‌سازی شده دانه با طول دوره پر شدن دانه Slop of regression line between Simulated grain yield and grain filling period
پارس‌آباد مغان Parsabad Moghan	3.4	322.0	124.4

ناحیه ۲: اقلیم گرم و خشک جنوب

اهواز به‌عنوان شهر شاخص اقلیم جنوب در شبیه‌سازی مراحل گل‌دهی و رسیدگی (شکل ۱) و عملکرد پتانسیل (شکل ۲) دقت

نسبتاً خوبی را نشان داد. افزایش دمای میانگین سالانه (جدول ۳) منجر به کاهش طول دوره پر شدن دانه به‌میزان ۳/۸ روز به‌ازای هر درجه سانتی‌گراد، در شرایط اقلیم گرم و خشک اهواز شد (شکل ۴).

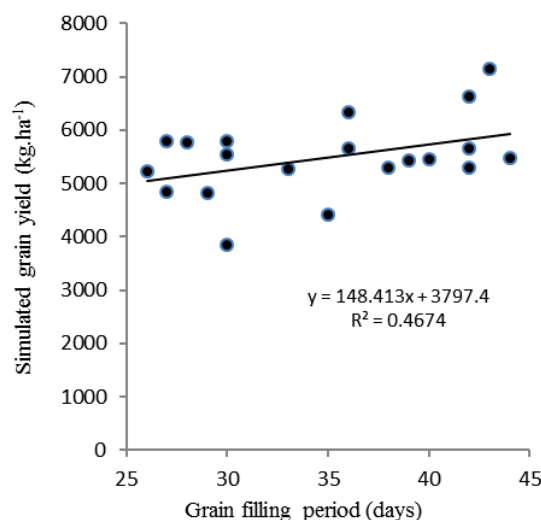


شکل ۴- تغییرات طول پر شدن دانه گندم (راست) و عملکرد دانه (چپ) گندم با افزایش دمای میانگین سالانه در شرایط اهواز
Fig. 4- Trends of grain filling period (right) and grain yield (left) related to annual mean temperature rise of Ahwaz

در بررسی تأثیر اقلیم بر دوره رشدی گندم در ناحیه گرم و خشک جنوب توجه به این نکته بسیار حائز اهمیت است که دامنه تغییرات دمای میانگین سالانه در اهواز بین ۲۴/۳ تا ۲۷/۹ درجه سانتی‌گراد بوده است (شکل ۲) که نسبت به دمای مطلوب رشد گیاه گندم نسبتاً تنش‌زا محسوب می‌گردد (Radmehr, 1997). در بین شهرهای مورد مطالعه بیشترین دمای میانگین سالانه، حداکثر سالانه و حداقل سالانه به‌ترتیب با مقادیر ۲۶/۳، ۳۳/۴ و ۱۹/۳ درجه سانتی‌گراد به اهواز اختصاص داشته است (جدول ۱) و روند تغییرات دما در هر سه پارامتر، به‌طور معنی‌داری افزایش داشته است (جدول ۳). دمای محدودکننده رشد برای گندم زمستانه نیز ۳۰ درجه سانتی‌گراد (Eyshi et al., 2014) گزارش شده است و دمای اهواز در مرحله پر شدن دانه بالاتر از این مقدار بوده است (Modhej et al., 2006) که از طریق تأثیر بر باروری گرده‌ها و کاهش تعداد دانه موجب کاهش عملکرد شده است (Eyshi et al., 2014). همچنین به نظر می‌رسد می‌توان دلیل کاهش دوره پر شدن دانه در اقلیم گرم و خشک جنوب را علاوه بر تکمیل سریع‌تر درجه روزهای مورد نیاز

در مراحل گل‌دهی و رسیدگی، به حادث شدن تنش‌های شدید گرمایی در زمان پر شدن دانه نیز نسبت داد. برخورد با دمای بالاتر از حد مطلوب می‌تواند از طریق افزایش تنفس، کاهش فتوسنتز، کاهش تعداد سنبله در واحد سطح، تعداد دانه در سنبله و وزن دانه (Modhej et al., 2006)، کاهش تعداد دانه در مترمربع (Delghandi et al., 2014) منجر به کاهش عملکرد بشود. رابطه کاهشی عملکرد دانه به‌مقدار ۱۴۸ کیلوگرم به‌ازای هر روز کاهش طول دوره رشدی گندم در شرایط اهواز نیز در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

دلغندی و همکاران (Delghandi et al., 2014) با بررسی مراحل فنولوژیک و عملکرد گندم در اهواز در دو دوره ۲۰۱۵-۲۰۴۵ و ۲۰۷۰-۲۱۰۰، ضمن تأیید افزایش دما در هر دو دوره مطالعاتی، اعلام کردند که طول دوره رسیدگی یک تا پنج روز برای دوره اول و هفت تا ۲۱ روز برای دوره دوم نسبت به ۳۰ ساله اخیر کاهش یافت. همچنین عملکرد گندم نیز به‌مقدار چهار و ۱۵ درصد به‌ترتیب برای دو دوره تحت مطالعه کاهش نشان داد.



شکل ۵- روند تغییرات عملکرد دانه گندم با تغییر دوره پر شدن دانه در شرایط اهواز
Fig. 5- Trends of wheat grain yield related to changes in grain filling period in Ahwaz

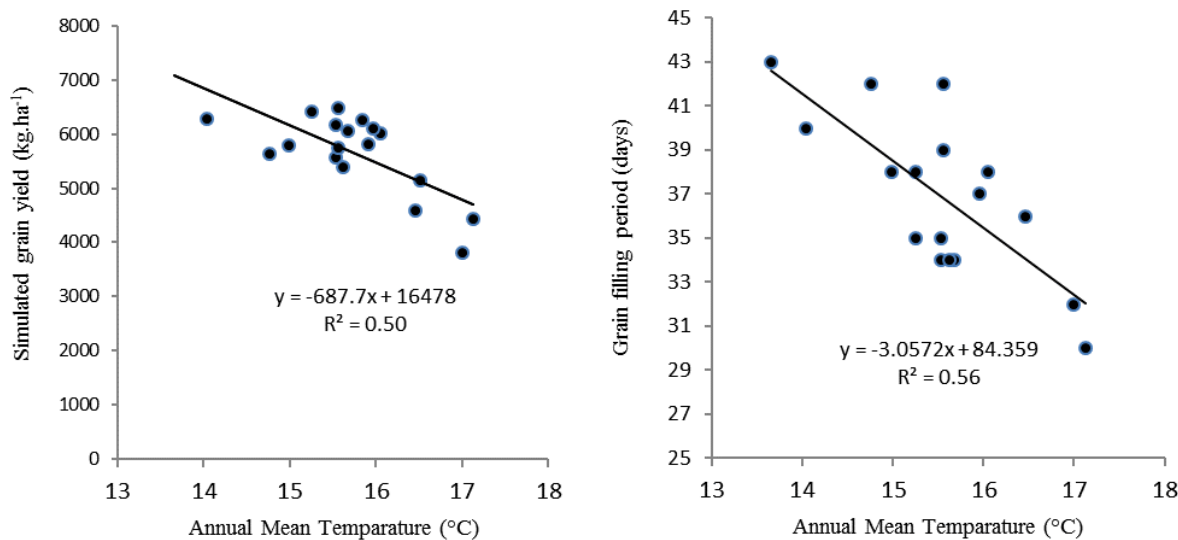
پتانسیل مد نظر قرار گیرد، به طوری که با کاهش تنفس شبانه گندم خصوصاً در طول دوره پر شدن دانه منجر به افزایش عملکرد شود. بنابراین افزایش عملکرد ۸۸ کیلوگرمی به ازای هر درجه افزایش دما چندان دور از انتظار نیست (جدول ۷).
شهرستان‌های زابل و بیرجند با توجه به دامنه دمای بالا و اقلیم نیمه بیابانی آن از روند تغییرات این ناحیه اقلیمی، اما با شیب خط رگرسیون کمتر پیروی کرده است (جدول ۷).

مطالعه شهرهای واقع در ناحیه ۲ اقلیمی شامل زابل، بیرجند و شیراز نیز تا حدودی همین روند را نشان دادند. طول دوره پر شدن دانه در شیراز احتمالاً به دلیل دامنه دمایی پایین تر و دمای متعادل تر شبانه روز، با شیب ملایم‌تری کاهش می‌یابد (کاهش ۰/۲۵ روز به ازای هر درجه افزایش دما) (جدول ۷). عدم معنی داری (در سطح ۹۵ درصد) افزایش میانگین دمای سالانه (جدول ۳) نیز مؤید اقلیم نسبتاً پایدار این منطقه می‌باشد. هم‌چنین کاهش دمای حداقل سالانه در اقلیم شیراز (جدول ۳) می‌تواند دلیلی برای افزایش عملکرد

جدول ۷- شیب خط رگرسیون بین طول دوره پر شدن دانه با افزایش دما (روز بر درجه سانتی‌گراد)، عملکرد دانه با افزایش دما (کیلوگرم بر درجه سانتی‌گراد) و عملکرد دانه با طول دوره پر شدن دانه گندم (کیلوگرم بر روز) برای شیراز، زابل و بیرجند (اقلیم گرم و خشک جنوب) در طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۲

Table 7- Slop of regression line between simulated grain filling period and temprature rise (day.°C⁻¹), grain yield and temprature rise (kg.°C⁻¹) and grain yield and grian filling period (kg.day⁻¹) for Shiraz, Zabol and Birjand (Southern Warm and Dry climate) during 1992-2012

شهر City	شیب خط رگرسیون بین طول دوره پر شدن دانه با افزایش دما Slop of regression line between grain filling period and temprature rise	شیب خط رگرسیون بین عملکرد شبیه‌سازی شده دانه با افزایش دما Slop of regression line between simulated grain yield and temprature rise	شیب خط رگرسیون بین عملکرد شبیه‌سازی شده دانه با طول دوره پر شدن دانه Slop of regression line between Simulated grain yield and grian filling period
شیراز Shiraz	-0.25	88.54	152.42
زابل Zabol	-0.38	-268.59	54.72
بیرجند Birjand	-1.6	-302.51	81.2



شکل ۶- تغییرات طول پر شدن دانه گندم (راست) و عملکرد دانه (چپ) با افزایش دمای میانگین سالانه در شرایط مشهد
 Fig. 6- Trends of grain filling period (right) and grain yield (left) related to annual mean temperature rise of Mashhad

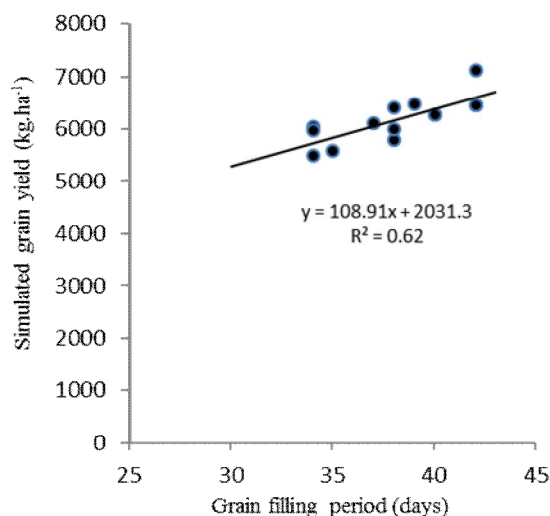
بارندگی و تبخیر و تعرق تعیین کننده است (Koocheki & Kamali, 2010)، اما انتظار می رود نقش دما علاوه بر کاهش طول دوره پر شدن دانه، با افزایش میزان تبخیر و تعرق و با ایجاد تنش نیز موجب کاهش عملکرد دانه شود.

کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2001) نیز کاهش ۲۶ روزه را در طول دوره رشدی گندم در شبیه سازی برای سال ۱۴۰۰ گزارش کردند. آن ها کاهش طول دوره رشد گندم را عمدتاً ناشی از کاهش طول دوره رویشی گیاه اعلام کردند و گزارش کردند که طول دوره زایشی کمتر تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار گرفت.

بررسی سایر شهرهای این ناحیه اقلیمی نیز به شرح جدول ۷ می باشد؛ و تمام شهرها از روند مشابهی پیروی کردند. کاهش عملکرد با افزایش دما در مشهد به میزان ۶۸۷ کیلوگرم در هکتار (شکل ۶) و در اصفهان به مقدار ۲۴۸ کیلوگرم در هکتار (جدول ۸) به ازای هر درجه سانتی گراد افزایش دما برای شهرهای واقع در مناطق معتدل مقادیر قابل توجهی می باشند. کمترین مقدار کاهش عملکرد در دوره مطالعاتی ۲۰۱۲-۱۹۹۲ نیز در کرمانشاه به میزان ۵۴ کیلوگرم در هکتار به ازای هر درجه سانتی گراد افزایش میانگین دمای سالانه مشاهده شد (جدول ۸).

ناحیه ۳: اقلیم معتدل

بررسی مشهد به عنوان شهر شاخص در اقلیم معتدل نشان داد که طول دوره پر شدن دانه در این شهر با گرم تر شدن دما در طی سال های مورد مطالعه با شیب ۳ روز به ازای هر درجه سانتی گراد افزایش دما، کاهش می یابد (شکل ۶). بنابراین افزایش دمای میانگین سالانه (جدول ۳) که منجر به کاهش دوره پر شدن دانه شد، می تواند به عنوان عاملی جهت کاهش عملکرد در نظر گرفته شود (شکل ۶). با هر روز کاهش طول دوره پر شدن دانه، عملکرد دانه با شیب خط ۱۰۸ کیلوگرم کاهش می یابد (شکل ۷). این امر می تواند ناشی از تجمع سریع تر درجه روزهای رشد گندم در فاصله زمانی گل دهی تا رسیدگی باشد. در این صورت، با وجود اینکه مواد فتوسنتزی به میزان کافی در گیاه وجود داشته است فرصت انتقال مجدد، در این دوره زمانی داده نشده و منجر به کاهش عملکرد دانه شده است. در طی گذار از مرحله رویشی به زایشی، میزان تسهیم مواد فتوسنتزی بین اندام های رویشی و زایشی گیاه (ضرایب تخصیص) متناسب با مراحل نمو گیاه انجام می گیرد (Nassiri Mahallati, 1999) هر چند باید این نکته را در تعیین طول فصل رشد و ظهور مراحل مختلف نمو مدنظر قرارداد که در شرایط اقلیمی متفاوت، مجموعه عواملی شامل میانگین دما، میانگین



شکل ۷- روند تغییرات عملکرد دانه گندم با تغییر دوره پر شدن دانه در شرایط مشهد
 Fig. 7- Trends of wheat grain yield related to changes in grain filling period in Mashhad

جدول ۸- شیب خط رگرسیون بین طول دوره پر شدن دانه با افزایش دما (روز بر درجه سانتی‌گراد)، عملکرد دانه با افزایش دما (کیلوگرم بر درجه سانتی‌گراد) و عملکرد دانه با طول دوره پر شدن دانه گندم (کیلوگرم بر روز) برای کرمان، کرمانشاه، اصفهان، سمنان و خرم‌آباد (اقلیم معتدل) در طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۲

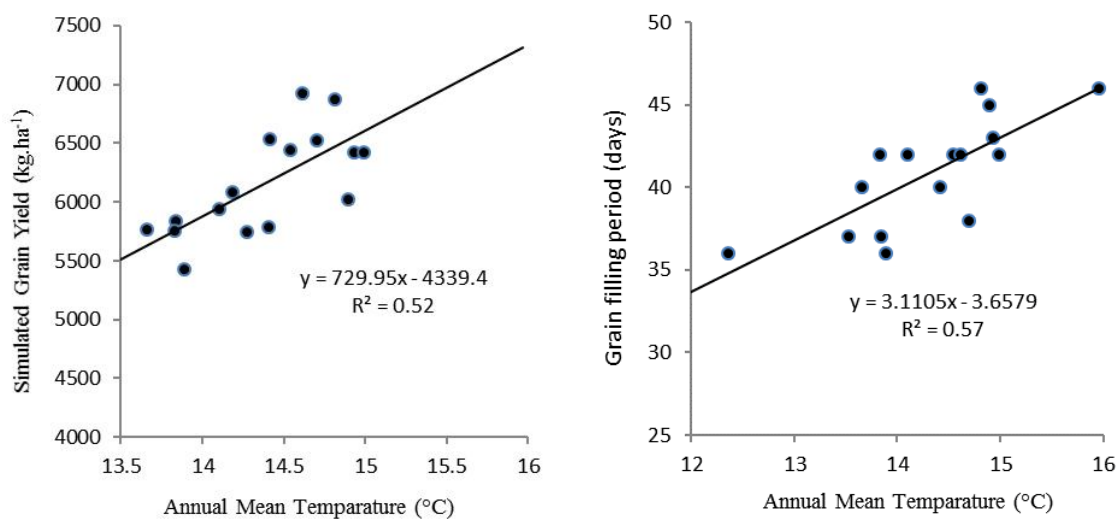
Table 8- Slop of regression line between simulated grain filling period and temprature rise (day.°C⁻¹), grain yield and temprature rise (kg.°C⁻¹) and grain yield and grian filling period (kg.day⁻¹) for Kerman, Kermanshah, Esfahan, Semnan, Khoramabad (Temperates climate) during 1992-2011

شهر City	شیب خط رگرسیون بین طول دوره پر شدن دانه با افزایش دما Slop of regression line between grain filling period and temprature rise	شیب خط رگرسیون بین عملکرد شبیه‌سازی شده دانه با افزایش دما Slop of regression line between simulated grain yield and temprature rise	شیب خط رگرسیون بین عملکرد شبیه‌سازی شده دانه با طول دوره پر شدن دانه Slop of regression line between Simulated grain yield and grian filling period
کرمان Kerman	-2.41	-145.28	56.48
کرمانشاه Kermanshah	-0.2	-54.26	42.57
اصفهان Esfahan	-3.83	-248.92	131.09
سمنان Semnan	-1.84	-102.25	214.22
خرم‌آباد Khoramabad	-1.88	-190.3	55.95

این گرم شدن دمای سالانه برخلاف مناطق گرمسیر و معتدل منجر به گل‌دهی زودتر و رسیدگی دیرتر در این منطقه شده است. به طوری که طول دوره پر شدن دانه در اراک با افزایش دمای میانگین سالانه سیر صعودی نشان داده است (شکل ۸).

ناحیه ۴: اقلیم سردسیر

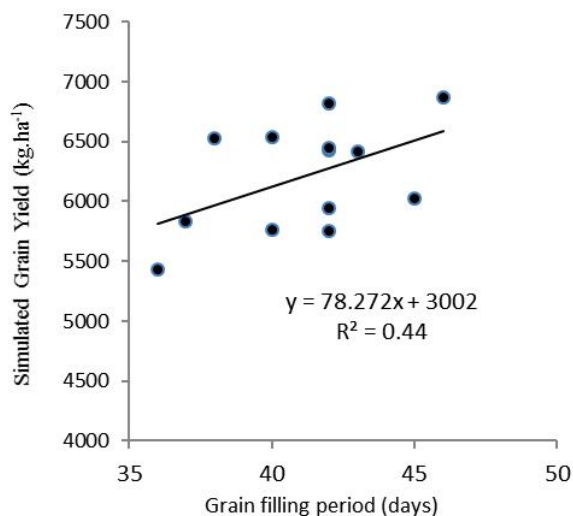
اراک به‌عنوان شهر شاخص در اقلیم سرد کشور در نظر گرفته شد. این شهر با میانگین دمای سالانه ۱۴/۱ و میانگین حداقل دمای ۷/۳، در طی سال‌های ۱۹۹۲ الی ۲۰۱۲ به‌طور معنی‌داری گرم‌تر شده است ($p = 0.004$ برای خط رگرسیون میانگین دمای سالانه).



شکل ۸- تغییرات طول پر شدن دانه گندم (راست) و عملکرد دانه (چپ) با افزایش دمای میانگین سالانه در شرایط اراک
 Fig. 8- Trends of grain filling period (right) and grain yield (left) related to annual mean temperature rise in Arak

دماهای پایین در ابتدای دوره گل‌دهی وجود دارد، به نظر می‌رسد گرمایش دمای میانگین سالانه، مانع بروز این خسارت‌ها شده است و طول دوره پرشدن دانه در محدوده مناسب‌تری از نظر دمایی قرار گرفته است (شکل ۹).

نصیری و همکاران (Nassiri et al., 2006) در پیش‌بینی وقوع اولین یخبندان بهاره و پاییزه در اراک، برای سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ به ترتیب ۴ و ۹ روز تسریع در وقوع یخبندان بهاره و ۹ و ۱۳ روز تأخیر در یخبندان پاییزه را گزارش کردند و افزایش طول فصل رشد را تأیید کردند. با توجه به اینکه در مناطق سردسیر احتمال بروز



شکل ۹- روند تغییرات عملکرد دانه گندم با تغییر دوره پر شدن دانه در شرایط اراک
 Fig. 9- Trends of wheat grain yield related to changes in grain filling period in Arak

خسارت‌ها می‌تواند موجب افزایش عملکرد گندم شود. عملکرد دانه در شرایط اقلیم سرد اراک به تبع این زمان و دمای مناسب، افزایش قابل توجهی (۷۲۹ کیلوگرم به‌ازای هر درجه افزایش دما) را نشان داد (شکل ۸). تمام شهرهایی که از نظر اقلیمی در شرایط سردسیر قرار گرفته بودند، روند مشابهی را نشان دادند (جدول ۹).

هر چند بروز سرما در تمام مراحل رشدی گندم می‌تواند خسارت‌زا باشد، اما بیشترین خسارت سرما در مرحله گل‌دهی اتفاق می‌افتد (Sarmadnia, 1995). سرمای دیررس بهاره می‌تواند از طریق کلروز برگ و اختلال در کلروفیل‌سازی و همچنین عدم تشکیل یا عدم تکامل سنبله در گیاه موجبات کاهش عملکرد را فراهم آورد (Azizi et al., 2010). بنابراین کاهش احتمال بروز این

جدول ۹- شیب خط رگرسیون بین طول دوره پر شدن دانه با افزایش دما (روز بر درجه سانتی‌گراد)، عملکرد دانه با افزایش دما (کیلوگرم بر درجه سانتی‌گراد) و عملکرد دانه با طول دوره پر شدن دانه گندم (کیلوگرم بر روز) برای اردبیل، بجنورد، همدان، ارومیه و تبریز (اقلیم سرد و کوهستانی) در طی سال‌های ۹۱-۱۳۷۱

Table 9- Slope of regression line between simulated grain filling period and temprature rise (day.°C⁻¹), grain yield and temprature rise (kg.°C⁻¹) and grain yield and grian filling period (kg.day⁻¹) for Ardabil, Bojnurd, Hamedan, Orumieh, Tabriz (Temperates climate) during 1992-2011

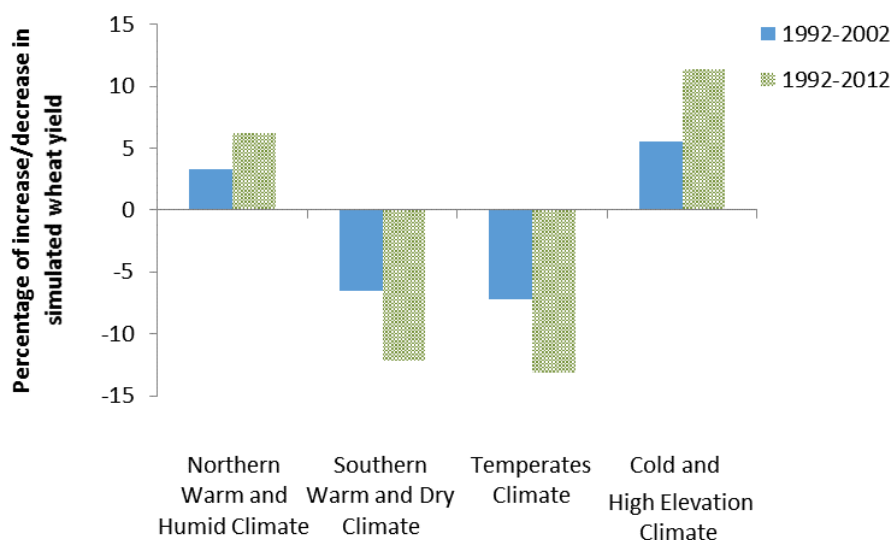
شهر City	شیب خط رگرسیون بین طول دوره پر شدن دانه با افزایش دما Slop of regression line between grain filling period and temprature rise	شیب خط رگرسیون بین عملکرد شبیه‌سازی شده دانه با افزایش دما Slop of regression line between simulated grain yield and temprature rise	شیب خط رگرسیون بین عملکرد شبیه‌سازی شده دانه با طول دوره پر شدن دانه Slop of regression line between Simulated grain yield and grian filling period
اردبیل Ardabil	1.03	29.5	119.25
بجنورد Bojnurd	2.31	245.2	65.1
همدان Hamedan	1.83	109.4	142.6
ارومیه Orumieh	2.45	482.6	102.8
تبریز Tabriz	2.04	214.5	62.8

(Agriculture-Jahad, 2015) جهت وزن دهی میزان تولید آن استفاده شد. نتایج نشان داد میانگین عملکرد پتانسیل گندم در کل کشور در طی یک دهه (۱۹۹۲-۲۰۰۲) به‌میزان ۱/۸ درصد و در طی دو دهه (سال ۱۹۹۲ الی ۲۰۱۲) به‌میزان ۳/۲۸ درصد کاهش داشته است. به نظر می‌رسد با توجه به حجم بالای تولید گندم در مناطق گرم و معتدل، کاهش تولید این مناطق اثر بیشتری نسبت به افزایش تولید گندم در مناطق سرد و خزری نشان داده است. مطالعات روی تغییرات عملکرد گندم در سطح جهانی کاهش بین ۴/۱ تا ۶/۴ درصد (Li et al., 2014)، ۶ درصد (Asseng et al., 2015) و ۵/۵ درصد (Lobell et al., 2011) به‌ازای یک درجه سانتی‌گراد افزایش میانگین دمای سالانه را گزارش کرده‌اند. در مطالعه تأثیرات تغییر اقلیم بر محصولات مهم کشاورزی در ایران، میانگین عملکرد گندم در سال

درصد تغییرات عملکرد پتانسیل گندم در سطح کشور نتایج برآورد مدل WOFOST برای عملکرد گندم در شرایط پتانسیل در اقلیم‌های مختلف کشور در طی یک دهه (۱۹۹۲-۲۰۰۲) حاکی از افزایش ۳/۲۵ و ۵/۵ درصد به‌ترتیب در اقلیم‌های خزری و سرد و کاهش ۶/۵۵ و ۷/۲۵ درصد به‌ترتیب در اقلیم‌های گرم و معتدل بود. هم‌چنین در دوره مطالعاتی ۲۰ ساله (۱۹۹۲-۲۰۱۲) افزایشی معادل ۶/۲۵ و ۱۱/۴۲ درصد به‌ترتیب در اقلیم‌های خزری و سرد و کاهش معادل ۱۲/۱۷ و ۱۳/۱۱ درصد به‌ترتیب در اقلیم‌های گرم و معتدل مشاهده شد (شکل ۱۰). باید در نظر داشت که شهرهای مورد مطالعه در هر اقلیم میزان اثرگذاری متفاوتی را در سهم تولید گندم کشور ایفا می‌کنند و لذا برای تصحیح این نسبت، سهم تولید هر شهر (Ministry of

را جبران نموده است (Koocheki et al., 2016).

۲۰۵۰، ۱۸/۶ درصد کاهش خواهد یافت که عمدتاً به دلیل افزایش دما می‌باشد. به طوری که افزایش CO₂ تنها ۵/۶ درصد از کاهش عملکرد



شکل ۱۰- درصد کاهش/افزایش عملکرد شبیه سازی شده گندم در طی یک دهه (سال ۱۳۹۱) و دو دهه (سال ۱۳۷۱) نسبت به سال پایه (۱۹۹۲)

Fig. 10- Percentage of increase/decrease in simulated wheat yield during one decade (2002) and two decades (2012) related to base year (1992)

C₃ تنش‌زا نیست، احتمالاً می‌توان این کاهش عملکرد را به تسریع در تجمع درجه روز مورد نیاز ارقام گندم آبی و عدم انتقال کامل مواد فتوسنتزی برگ و ساقه به دانه‌ها دانست. به عبارتی چنانچه به هر طریقی (مثلاً اصلاح ارقامی که GDD گل‌دهی تا رسیدگی بیشتری داشته باشند) بتوان این فرصت را به گیاه داد تا انتقال مجدد مواد ذخیره‌ای موجود را تکمیل کند، احتمالاً عملکرد افزایش خواهد یافت. در مناطق سردسیر کوهستانی افزایش دما منجر به افزایش دوره پر شدن دانه شد. این افزایش میانگین دمای سالانه عمدتاً به دلیل افزایش حداقل دمای سالانه بوده است؛ و به نظر می‌رسد با افزایش دما، احتمال برخورد مراحل حساس فنولوژیک، مخصوصاً گل‌دهی، با سرماهای خسارت‌زای دیررس بهاره کاهش یافته است. لذا طولانی‌تر شدن دوره پر شدن دانه و قرار گرفتن دوره رشد زایشی گندم محدوده دمای مناسب در این نواحی منجر به افزایش عملکرد گندم شده است. میانگین عملکرد پتانسیل گندم در کل کشور در طی یک دهه (۸۱-۱۳۷۱) به میزان ۱/۸ درصد و در طی دو دهه (۹۱-۱۳۷۱) به میزان ۳/۲۸ درصد کاهش داشته است.

نتیجه‌گیری

دمای مناطق مختلف ایران در طی دهه‌های گذشته افزایش یافته است. اما تأثیرات این افزایش دما در نقاط مختلف، متفاوت است. در مناطق گرم و مرطوب سواحل دریای خزر، افزایش دما، طول دوره پر شدن و عملکرد را با شدت کمی افزایش داده است. به نظر می‌رسد، بارندگی‌های کافی و رطوبت بالا در این مناطق ثبات نسبی عملکرد را برای ارقام گندم مورد کشت به وجود آورده است و طول دوره پر شدن دانه محدودکننده نبوده است. اما در مناطق گرم و خشک جنوب و نیمه‌بیابانی مرکز و جنوب شرقی، افزایش دما به تدریج با ایجاد تنش در دوره پر شدن دانه از طریق افزایش تنفس نگهداری، کاهش فتوسنتز، کاهش تعداد سنبله در واحد سطح، تعداد دانه در سنبله و وزن دانه منجر به کاهش عملکرد شده است. این تنش‌ها با توجه به دامنه دمایی این نواحی، احتمالاً به دلیل وقوع دماهای حداکثر بالا بوده است. در مناطق معتدل فلات مرکزی با وجود افزایش دما طول دوره پر شدن دانه کاهش یافته است. با توجه به اینکه دامنه دمایی که در این مناطق در دوره پر شدن دانه گندم حادث می‌شود برای گیاهان

References

1. Ainsworth, E.A., and Long, S.P., 2005. What have we learned from 15 years of Free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist* 165: 351–372.
2. Alijani, B., Mahmoudi, P., Salighe, M., and Rigi chahi, A., 2011. Study of annual maximum and minimum tempratures changes in Iran. *Geographical Research* 26(3):101-122. (In Persian with English Summary)
3. Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rotter, R.P., Lobell, D.B., Cammarano, D., Kimball, B.A., Ottman, M.J., Wall, G.W., White, J.W., Reynolds, M.P., Alderman, P.D., Prasad, P.V.V., Aggarwal, P.K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A.J., De Sanctis, G., Doltra, J., Fereres, E., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G., Hunt, L.A., Izaurralde, R.C., Jabloun, M., Jones, C.D., Kersebaum, K.C., Koehler, A.K., Muller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O/Leary, G., Olesen, J.E., Palosuo, T., Priesack, E., Eyshi Rezaei, E., Ruane, A.C., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Stockle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Thorburn, P.J., Waha, K., Wang, E., Wallach, D., Wolf, J., Zhao, Z., and Zhu, Y., 2015. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change* 5: 143-147.
4. Azizi, H., Nezami, A., Khazaei, H., and Nassiri Mahalati, M., 2010. Evaluation of cold tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars under field conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research* 6(2): 342-352. (In Persian with English Summary)
5. Bafkar, A., Boroumandnasab, S., Behzad, M., and Farhadi Bansouleh, M., 2014. Estimation of potential yield of grain maize in Mahidasht, Kermanshah using WOFOST, a crop growth simulation model. *Water and Irrigation Management* 42(4): 799-808. (In Persian Persian with English Summary)
6. Boogaard, H.L., van Diepen, C.A., Roetter, R.P., Cabrera, J.M.C.A. and Laar, H.H.V., 1998. WOFOST 7.1: User's guide for the WOFOST 7.1 crop growth simulation model and WOFOST Control Center 1.5. Technical document / DLO Winand Staring Centre; 52. DLO Winand Staring Centre, Wageningen.
7. Boogaard, H., De Wit, A., te Roller, J., and Van Diepen, C., 2014. WOFOST Control Center 2.1: User's guide for WOFOST Control Center 2.1 and the crop growth simulation model WOFOST 7.1. 7. Wageningen, The Netherlands: Alterra.
8. Bromwich, D.H., Nicolas, J.P., Monaghan, A.J., Lazzara, M.A., Keller, L. M., Weidner, G.A., and Wilson, A.B., 2013. Central West Antarctica among the most rapidly warming regions on Earth. *Nature Geoscience* 6: 139–145.
9. Burkart, S., Manderscheid, R., and Weigel, H.J., 2004. Interactive effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations and plant available soil water content on canopy evapotranspiration and conductance of spring wheat. *European Journal of Agronomy* 21: 401–417.
10. Catalin, L., Bettina, B., Fabio, M., and Anca, L.D., 2009. Adaptation of WOFOST Model from CGMs to Romania conditions. *Journal of Plant Development* 16: 97–102.
11. Cleland, E.E., Chiariello, N.R., Loarie, S.R., Mooney, H.A., and Field, C.B., 2006. Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103(37): 13740-13744.
12. Delghandi, M., Massah-Bovani, A., Ajorlou, M.J., Broomandnasab, S., and Andarzian, B., 2014. Risk assessment of climate change impacts on production and phenology of wheat (Case study: Ahvaz region). *Water and Irrigation Management*. 4: 161-175. (In Persian with English Summary)
13. Eyshi Rezaei, E., Webber, H., Gaiser, T., Naab, J., and Ewert, F., 2014. Heat stress in cereals: Mechanisms and modelling. *European Journal of Agronomy* 64: 98-113.
14. Gharineh, M., Bakhshandeh, A., Andarzian, B., and Fayeizadeh, N., 2016. Agro-climatic zonation of Khouzestan province based on potential yield of irrigated wheat using WOFOST model. *Agroecology* 4(3): 255-264. (In Persian with English Summary)
15. Hamidianpour, M., Baaghideh, M., and Mohsen Abbasnia, M., 2016. Assessment of the precipitation and temperature changes over South East Iran using downscaling of General Circulation Models outputs. *Physical Geography Research Quarterly* 48(1): 107-124. (In Persian with English Summary)
16. <http://climate.nasa.gov/evidence/>
17. IPCC., 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth

- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. doi:10.1017/CBO9781107415324.
18. Kasmai, M., 2006. Climate and Architecture. Nashre Khak. Tehran, Iran, 131 pp. (In Persian)
 19. Khoshakhlagh, F., Gharibi, E., and Shafiei, Z., 2011. The study of the lowest temperature changes in Iran. *Geography and Environmental Planning Journal* 42(2): 199-216. (In Persian with English Summary)
 20. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., and Jafari, L., 2016. Evaluation of climate change effect on agricultural production of Iran: I. Predicting the future agroclimatic conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research* 13(4): 651-664. (In Persian with English Summary)
 21. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., Sharifi, H.R., Zand, E., and Kamali, G.A., 2001. A simulation study for growth, phenology and yield of wheat cultivars under the doubled CO₂ concentration in Mashhad Conditions. *Desert (Biaban)* 6(2): 117-127. (In Persian with English Summary)
 22. Koocheki, A., Nassiri, M., Alizadeh, A., and Ganjali, M., 2009. Modelling the impact of climate change on flowering behaviour of saffron. *Iranian Journal of Field Crops Research* 7(2): 583-594. (In Persian with English Summary)
 23. Koocheki, A., Nassiri, M., Jamali, J.B., and Marashi, H., 2006. Evaluation of the effects of climate change on growth characteristics and yield of rainfed wheat in Iran. *Agricultural Sciences and Technology* 20(7): 82-95. (In Persian with English Summary)
 24. Koocheki, A., Nassiri, M., Soltani, A., Sharifi, H., and Ghorbani, R., 2006. Effects of climate change on growth criteria and yield of sunflower and chickpea crops in Iran. *Climate Research* 30: 247-253
 25. Koocheki, A., Sharifi, H.R., and Zand, E., 1998. The ecological consequences of global climate change. *Jahad Daneshgahi Mashhad Press, Mashhad, Iran.* (In Persian)
 26. Koocheki, A., and Kamali, G., 2010. Climate change and rainfed wheat production in Iran. *Iranian Journal of Field Crops Research* 8(3): 508-520. (In Persian with English Summary)
 27. Koocheki, A., and Nassiri Mahallati, M., 2008. Impacts of climate change and CO₂ concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies. *Journal of Field Crops Research* 6(1): 139-153. (In Persian with English Summary)
 28. Koppen, W.D., 1936. *Das geographische system der klimat.* Handbuch der klimatologie: p. 46.
 29. Li, Y., Zhou, Q., Zhou, J., Zhang, G., Chen, C., and Wang, J., 2014. Assimilating remote sensing information into a coupled hydrology-crop growth model to estimate regional maize yield in arid regions. *Ecological Modelling* 291: 15-27.
 30. Lobell, D.B., Schlenker, W., and Costa-Roberts, J., 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science* 333-616.
 31. Masoudian, S.A.A.F., 2004. Temperature trends in Iran during the last half century. *Geography and Development.* 2(3): 89-106. (In Persian with English Summary)
 32. Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kubler, K., Bissolli, P., Braslavska, O.G., Briede, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, A., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Mage, F., Mestre, A., Nordli, O., Penuelas, J., Pirinen, P., Remisova, V., Scheifinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A.J.H., Wielgolaski, F.E., Zach, S., and Zust, A.N.A., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology* 12: 1969-1976.
 33. Ministry of Agriculture-Jahad., 2015. Year book of Agricultural Statistics. 2013. Available at Website: <http://www.maj.ir/Portal/Home/Default.aspx?CategoryID=c5c8bb7b-ad9f-43dd-8502-cbb9e37fa2ce>. (In Persian)
 34. Modhej, A., 2006. Effect of heat stress after anthesis on grain yield of wheat and barley genotypes. Conference of German Genetics Society and the German Society for Plant Breeding. p. 95.
 35. Moradi, R., Koocheki, A., and Nassiri Mahallati, M., 2014. Effect of climate change on maize production and shifting of planting date as adaptation strategy in Mashhad. *Sustainable Agriculture and Production Science* 23: 111-130. (In Persian)
 36. NASA., 2011. Climate change: How do we know? Online at <http://climate.nasa.gov/evidence/>
 37. Nassiri Mahallati, M., 1999. Modelling potential crop growth processes. *Jahad Daneshgahi Mashhad Press, Mashhad, Iran.* 280 pp. (In Persian)
 38. Nassiri Mahallati, M., Koocheki, A., Kamali, G., and Marashi, H., 2006. Effect of Climate Change on Agroclimatic Indices of Iran. *Agricultural Sciences and Technology* 20(7): 71-82. (In Persian with English Summary)

39. 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: 113-124.
40. Pachauri, R.K., and Reisinger, A., 2007. IPCC Fourth Assessment Report. Summary for Policymakers.
41. Radmehr, M., 1997. Effect of heat stress on physiology of growth and development of wheat. Ferdowsi University Press. Mashhad, Iran. (In Persian)
42. Saidi, A., and Choukan, R., 2000. Summary of research and research achievements of Seed and Plant Improvement Institute. Nashr-e-Amoozesh Press. Tehran, Iran. 140 pp. (In Persian)
43. Sarmadnia, G., 1995. Effect of low temperature on the growth and yield of five winter wheat cultivars. *Journal of Agricultural Science* 26: 1-9.
44. Seed and Plant Improvement Institute., 1995-2010. Annual Report of Cereal Breeding Projects. Cereal Research Department, Karaj, Iran. (In Persian)
45. Shekhar, C., Singh, D., Singh, R., and Rao, V.U.M., 2008. Prediction of wheat growth and yield using WOFOST model. *Journal of Agrometeorology* 10: 400-402.
46. Shirgholami, H., and Ghahraman, B., 2005. Study of time trends in annual mean temperature of Iran. *Water and Soil science. Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 9(1): 24-39. (In Persian with English Summary)
47. Tabari, H., and Hosseinzadeh Talaei, P., 2011. Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran. *Global and Planetary Change* 79: 1-10.
48. Wu, D., Yu, Q., Lu, C., and Hesgsdijk, M., 2006. Quantifying production potentials of winter wheat in north China plain. *European Journal of Agronomy* 24: 226-235.
49. Zahedi, M., Sari Saraf, B., and Jameei, J., 2007. The analysis of spatio-temporal variation of temperature in north-west of Iran. *Geography and Development* 5(10): 183-197. (In Persian with English Summary)



Evaluation of Temperature Changes and Its Impacts on Seed Filling Period and Grain Yield of Wheat (*Triticum aestivum* L.) in Different Regions of Iran (1992-2012)

R. Abbasi Alikamar¹, M. Nassiri Mahallati^{2*} and A. Koocheki²

Submitted: 18-09-2016

Accepted: 11-03-2017

Abbasi Alikamar, R., Nassiri Mahallati, M., and Koocheki, A., 2020. Evaluation of temperature changes and its impacts on seed filling period and grain yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in different regions of Iran (1992-2012). Journal of Agroecology. 12(1):319-343.

Introduction

It is accepted that the global annual average temperature has been increased during recent decades. The climate of Iran is also affected by this global warming. Some studies indicated the increasing of mean annual temperature of Iran between 3.5-4.5°C by 2050. Crop phenology is directly related to temperature, so climate change could significantly change the phenology and yield of crops. Modelling phenology is a way to simulate the timing of phenological stages based on climatic factors. Amongst models, WOFOST is known as a powerful model for simulation of phenological stages and yield of wheat. In this study climate warming of Iran was evidenced. Based on this fact, trends of potential grain yield and time of flowering and maturity of wheat were studied in different climatic zones of Iran during 1992-2012. It is expected that understanding the thermal induced of phenological changes, can lead us to better field management decision making.

Materials and Methods

Weather data of 18 cities from 4 climatic zones of Iran (northern warm and humid (Zone 1), southern warm and dry (Zone 2), temperate (Zone 3) and cold and high elevation (Zone 4)) were analyzed during 1992-2012 and the long-term trends of air temperature were detected by linear regression. The crop growth simulation model WOFOST, was used to simulate the time of flowering and maturity and also the potential grain yield of winter wheat. Calibration and validation of model was conducted in 4 selected cities from each zone using statistical measures. The consequences of temperature on duration of grain filling period and also yield of wheat were determined.

Results and Discussion

Results indicated that the mean annual air temperature was significantly increased in all cities during 1992-2012. The highest increasing rate (regression line slope) belonged to Ardabil (0.159°C.y⁻¹) and the lowest rate was observed in Pars Abad Moghan (0.06°C.y⁻¹). Validation of WOFOST in 4 selected cities from each climatic zone, showed the perfect ability of model in simulating the flowering and maturity time of wheat. Regression analysis showed that the grain filling period was increased in accordance with temperature rise in zone 1 and 4 whereas it was shortened in zone 2 and 3. Grain yield showed the same trends predicted for grain filling period in different climates. Slope of linear regression between temperature and yield was significant except in Gorgan (Zone 1). In all cities the relation between grain filling period and yield was direct and positive.

Conclusion

Although temperature has increased in all climatic zones of Iran, flowering and maturity time and grain yield of wheat has showed different responses. There was a nonsignificant slope of regression line in the north humid climate, which means that the humidity of northern part of Iran (south of Caspian Sea) enhanced stability for this area. Annual mean temperature in southern warm and dry zone of Iran ranged between 24.3-27.9 °C that could be stressful for wheat, and hence resulted in shorter grain filling period and less grain yield. It seems that in temperate zones (such as Mashhad) increasing temperature caused yield reduction due to faster GDD accumulation and lack of time to complete remobilization of photosynthetic materials. On the other hand, in cold

1-Ph.D. Student of Agroecology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

2-Professor, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

(*- Corresponding Author Email: mnassiri@um.ac.ir)

Doi:10.22067/jag.v12i2.58737

areas increasing temperature could reduce the risk of cold stress in flowering time, resulting in longer grain filling period and higher grain yield. According to WOFOST simulation results, during 20 years study (1992-2012), mean potential yield of wheat increased 6.25 and 11.42 percent in northern warm and humid (Zone 1) and cold and high elevation (Zone 4), respectively and decreased 12.17 and 13.11 percent in southern warm and dry (Zone 2) and temperate (Zone 3), respectively. Total mean potential yield of wheat, by consideration of proportion of each zone in total wheat production of Iran, showed reduction of 1.8% and 3.28% during 1992-2001 period (10 years) and 1992-2012 period (20 years), respectively.

Keywords: Climate change, Global warming, Regression, Simulation, WOFOST