

مدلسازی تاثیر تغییر اقلیم بر رفتار گلدهی زعفران (*Crocus sativus* L.)

علیرضا کوچکی^۱، مهدی نصیری محلاتی^۱، امین علیزاده^۱، علی گنجعلی^۲

چکیده

گلدهی زعفران در طی دو مرحله انجام می‌شود و درجه حرارت عامل اصلی کنترل کننده سرعت نمو در هر دو مرحله است. با توجه به شواهد موجود در مورد افزایش درجه حرارت ناشی از گرمایش جهانی، بنظر می‌رسد که رفتار گلدهی این گیاه در مناطق مختلف کشت آن در استانهای خراسان تحت تاثیر تغییرات اقلیمی آینده قرار خواهد گرفت. بمنظور ارزیابی واکنش زعفران به افزایش دما ابتدا مدلی برای شبیه سازی رفتار گلدهی این گونه تهیه شد و سپس سرعت نمو و طول دوره گلدهی آن در پاسخ به ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درجه سانتیگراد افزایش میانگین دمای روزانه نسبت به شرایط فعلی محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت. این مدل سرعت نمو در هر یک از مراحل گلدهی را بر اساس حاصلضرب حداکثر سرعت نمو در درجه حرارت بهینه برای هر مرحله (DR_{m1} و DR_{m2}) و دو تابع درجه حرارت مربوط به این مراحل (ft_1 و ft_2) شبیه سازی می‌کند و طول هر مرحله نموی نیز از عکس سرعت نمو محاسبه می‌گردد. مقدار DR_{m1} و تابع ft_1 از منابع علمی موجود در مورد گلدهی زعفران و در دمای بهینه ۲۳-۲۵ درجه سانتیگراد برای مرحله اول گلدهی زعفران برآورد گردید. مقدار DR_{m2} و ft_2 ، با برازش تابع ۵ پارامتری بتا به داده های سرعت نمو زعفران و درجه حرارت بدست آمدند. این داده ها از مزارع مختلف تولید زعفران در استانهای خراسان رضوی و جنوبی جمع آوری شدند. با استفاده از این داده ها درجه حرارت های حداقل، بهینه و حداکثر برای مرحله دوم گلدهی به ترتیب ۱۵/۵، ۱۸/۰ و ۲۲/۵ درجه سانتیگراد و حداکثر سرعت نمو در دمای بهینه ۰/۲۸۹^{-۱} روز برآورد گردید. نتایج شبیه سازی نشان داد که افزایش میانگین دمای روزانه در محدوده ۰/۵ تا ۲ درجه سانتیگراد باعث کاهش سرعت نمو و در نتیجه افزایش طول هر دو مرحله از گلدهی خواهد شد البته تاثیر افزایش دما برای دو مرحله تقریباً مشابه بود. یافته های این تحقیق حاکی از آن است که طول دوره نمو زعفران به ازای هر ۱ درجه سانتیگراد افزایش میانگین درجه حرارت نسبت به شرایط فعلی حداقل ۳۲ و حداکثر ۳۸ روز افزایش خواهد یافت. بنابراین در صورتی که گرمایش جهانی ناشی از تغییر اقلیم باعث افزایش میانگین درجه حرارت به میزان ۱/۵ تا ۲ درجه سانتیگراد شود، زمان ظهور گل در مناطق تولید زعفران در استانهای خراسان رضوی و جنوبی بسته به شدت گرمایش تا اواخر آذر ماه به تعویق خواهد افتاد.

واژه‌های کلیدی: زعفران، تغییر اقلیم، گلدهی، درجه حرارت، مدلسازی

مقدمه

نمو خود را با این شرایط محیطی تطبیق داده اند. در این رابطه هر گونه تغییر سریع در شرایط آب و هوایی باعث تغییرات قابل توجهی در الگوهای رشد و نمو این گیاهان شده و بسته به شدت تغییرات ممکن است باعث جابجایی مکانی و زمانی آنها و در نهایت حتی حذف آنها از سیستمهای کشاورزی یک منطقه خاص شود (۲۷). در واقع تغییرات اقلیمی می‌تواند مراحل کاشت یک نوع گیاه را

تغییر اقلیم بطور چشمگیری بر فعالیت های کشاورزی تاثیر گذاشته است و ادامه این روند باعث بروز تغییرات قابل ملاحظه ای در فرآیند های رشد و نمو محصولات غذایی و نیز تولید سیستمهای زراعی در مقیاس منطقه ای خواهد شد (۴۰). بطور کلی موجودات زنده و از جمله گیاهان در طی دوران طولانی با محیط خود سازگار شده و مراحل رشد و

تحت تاثیر قرار داده و زمان کاشت آن را بطور قابل ملاحظه ای جابجا کند (مثلا تاریخ کاشت یک محصول بهاره به زمستان تغییر یابد).

چنین موردی هم اکنون در مورد گندم بهاره در عرضهای شمالی بالا در کانادا در حال وقوع است (۴۴). و یا به علت تغییر درجه حرارت، محل کاشت یک گیاه خاص از منطقه ای به منطقه دیگر تغییر یابد که در این ارتباط جابجایی ذرت از قسمت های جنوبی اروپا به نواحی شمالی از جمله دانمارک و نروژ را می توان ذکر کرد (۱۹). بروز چنین پدیده هایی در مورد برخی از گیاهان زراعی و باغی در حال انجام بوده و در سطح جهان بر اساس منابع علمی مستند به تایید رسیده است.

در طی دو دهه گذشته با قطعیت یافتن پدیده گرمایش جهانی به دلیل افزایش گازهای گلخانه ای و تغییرات اقلیمی ناشی از آن، توجه محققین به مطالعه پی آمدهای این پدیده از ابعاد مختلف معطوف شده است. در این میان به نظر می رسد که کشاورزی بیش از سایر فعالیت های بشر تحت تاثیر تغییر اقلیم قرار خواهد گرفت (۲۳). بدون تردید درجه حرارت مهمترین عامل محیطی کنترل کننده بسیاری از فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاهان از جمله فتوسنتز و تنفس بوده و بعلاوه نمو گیاهان که اصلی ترین مرحله آن گلدهی می باشد نیز توسط درجه حرارت محیط تنظیم می شود (۶، ۱۸). به این ترتیب افزایش درجه حرارت الگوهای گلدهی گیاهان را بشدت تحت تاثیر قرار خواهد داد (۱۳، ۳۶). این تاثیر در مورد بسیاری از گونه های گیاهی مورد مطالعه قرار گرفته و به تایید رسیده است (۲۲، ۱۵) به همین دلیل در سالهای اخیر محققین مختلف مطالعات وسیعی را بمنظور کمی کردن این ارتباط آغاز کرده اند تا از این طریق بتوان با پیش بینی درجه حرارت های آینده در مقیاس منطقه ای، مراحل فنولوژیکی گیاهان را تعیین نمود (۴۳). با این وجود، چنین مطالعاتی برای گیاهان ویژه ای که در برخی از مناطق دنیا کشت می شوند گزارش نشده است که نمونه بارز آن زعفران در ایران است.

در حال حاضر بیش از ۹۵٪ از زعفران جهان در ایران تولید می شود که بخش اعظم آن مربوط به نواحی مرکزی و جنوبی استان خراسان می باشد (۲۹). تولید این گیاه ویژه به دلیل مزیت نسبی بالای آن نقش عمده ای در اقتصاد

کشاورزی استان دارد. در طی سالهای اخیر گزارشاتی مبنی بر کاهش عملکرد گل زعفران در مناطق مختلف خراسان ارائه شده است. عوامل متعددی از قبیل سن مزرعه (۲۴) اندازه بنه (۵، ۱۷) روش کاشت و تراکم (۳۲) فواصل آبیاری (۱۱) و آبیاری تابستانه (۲) بر عملکرد گل زعفران موثرند با این وجود درجه حرارت عامل اصلی کنترل کننده رفتار گلدهی این گیاه می باشد (۲۵، ۳۸، ۳۹). از سوی دیگر پیش بینی های انجام شده در ایران افزایش درجه حرارت را در طی دو دهه آینده برای اکثر مناطق کشور از جمله استان های خراسان تایید می کند (۳۰) و تاثیر این تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل های شبیه سازی برای برخی از گیاهان زراعی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است (۴، ۳۱). به دلیل هبستگی بسیار قوی بین رفتار گلدهی زعفران و درجه حرارت محیط به نظر می رسد که تغییرات آینده اقلیمی الگوهای گلدهی این گیاه را تحت تاثیر قرار دهد.

گلدهی زعفران در طی ماههای مهر و آبان انجام می گیرد. بعد از این دوره و در طی زمستان گیاه وارد مرحله رشد رویشی شده و برگهای جدید ظاهر می شوند. با پایان زمستان بنه های جدید بر روی کورم های مادری تشکیل شده و خشک شدن برگها آغاز می گردد. با خشک شدن کامل برگها در فروردین و اردیبهشت دوره خواب آغاز خواهد شد. این دوره که در طی آن هیچگونه فعالیتی انجام نمی شود در حدود ۴۰ روز ادامه می یابد. در فاصله دو هفته پس از اتمام خواب بر روی جوانه متورم شده بنه ظاهر شده و تا شهریور ماه تقریباً تمامی اندام های گل کامل می شوند. در این شرایط ظهور گلها در سطح خاک مستلزم قرار گرفتن کورم ها در معرض دوره با درجه حرارت پایین می باشد. با شروع پاییز و کاهش دما این شرایط نیز بطور طبیعی فراهم شده و گلدهی از اواخر مهر ماه آغاز می شود. با وجودیکه چرخه زندگی زعفران در تمامی مناطق تولید آن مشابه است ولی بسته به شرایط اقلیمی منطقه اختلافات قابل توجهی در زمان وقوع مراحل نمو این گیاه وجود دارد (۲۹، ۳۴، ۱۲). گلدهی معمولاً در پاییز (نیمه مهر تا نیمه آبان) انجام شده و درجه حرارت مطلوب برای گلدهی ۱۷-۱۵ درجه سانتیگراد است (۳۹). البته گل انگیزی مدتها قبل از گلدهی و بسته به درجه حرارت محیط از اواخر بهار تا نیمه تابستان وقوع می یابد و دمای مطلوب آن ۲۷-۲۳ درجه سانتیگراد می باشد

آغاز شده و در طی آن پس از سپری شدن دوره‌ای با درجه حرارت‌های پایین، گلها ظاهر خواهند شد. مولینا و همکاران (۳۸) نشان دادند که دمای مطلوب برای این دوره ۱۷ درجه سانتیگراد بوده و طول آن در دمای بهینه ۴۰ روز می‌باشد. این مدل مراحل گلدهی زعفران را از صفر تا ۲ شبیه سازی می‌کند، بطوریکه صفر پایان دوره خواب، ۱ نشان دهنده اتمام مرحله اول گلدهی و ۲ نشان دهنده ظهور گل می‌باشد. طول دوره نمو (d) عبارتست از فاصله زمانی بین دو مرحله متوالی نموی بر حسب روز و سرعت نمو عکس طول دوره می‌باشد (معادله ۱):

$$DR = \frac{1}{d} \quad (1)$$

که در آن DR سرعت نمو ($^{-1}$ روز) است. مرحله نمو با انتگرال گیری از سرعت نمو محاسبه می‌شود. سرعت نمو به شدت تابع درجه حرارت بوده و در نتیجه حداکثر سرعت نمو در دمای بهینه نمو (T_o) حاصل خواهد شد. بنابراین هر گونه تغییر در درجه حرارت سرعت نمو را نسبت به حداکثر آن تحت تاثیر قرار می‌دهد. در مدل تاثیر درجه حرارت بر سرعت نمو زعفران از طریق دو تابع دما محاسبه شده است (معادله ۲):

$$DR_1 = DR_{m1} \cdot ft_1 \quad (2)$$

$$DR_2 = DR_{m2} \cdot ft_2$$

که در آن ft_1 و ft_2 به ترتیب تابع دما در مراحل اول و دوم گلدهی و DR_m حداکثر سرعت نمو می‌باشند. با تقسیم کردن هر دو تابع درجه حرارت بر حداکثر مقدار تابع، بصورت نسبی بیان شده و در نتیجه مقدار آنها بین صفر و یک تغییر کند.

ft_1 بصورت تابعی خطی از دمای روزانه (T_a)، درجه سانتیگراد) در مرحله اول گلدهی (T_{o1})، درجه سانتیگراد) تعریف شد (معادله ۳):

$$ft_1 = T_{o1} - b \cdot T_a \quad (3) \quad \begin{matrix} 1 & T_a = T_{o1} \\ & T_{o1} < T_a < T_{cl} \\ 0 & T_a \geq T_{cl} \end{matrix}$$

بر این اساس چنانچه درجه حرارت روزانه برابر با دمای بهینه (T_{o1})، درجه سانتیگراد) باشد مقدار تابع معادل ۱ شده و در نتیجه نمو با حداکثر سرعت (DR_m) صورت می‌گیرد، افزایش دما به بالاتر از دمای بهینه مقدار تابع را کمتر از یک

(۳۸). زمان گل‌انگیزی نیز از دمای محیط تبعیت کرده و برای مثال در آذربایجان در ماه مارس (۷) در کشمیر در ماه جولای (۲۰) در اسپانیا در مارس تا آوریل (۲۸، ۳۹) و در ایران بسته به منطقه تولید از شیب درجه حرارت تبعیت کرده و از اواخر اردیبهشت تا نیمه خرداد آغاز می‌شود (۱، ۳). از سوی دیگر با وجود سابقه بسیار طولانی کشت زعفران در ایران و جهان، اطلاعات موجود در مورد مکانیزم تنظیم گلدهی این گیاه کامل نمی‌باشد (۲۵، ۲۱) و تحقیق جامعی در مورد تاثیر تغییرات آینده اقلیمی بر رفتار گلدهی این گیاه در ایران انجام نشده است. تاثیر تغییر اقلیم بر فنولوژی گونه‌های مختلف گیاهی که در عمل بصورت تغییر زمان گلدهی بروز می‌کند توسط محققین مختلف گزارش شده است (۸، ۲۶). این اثرات که عمدتاً به دلیل افزایش درجه حرارت می‌باشد جایجایی قابل توجهی را در زمان گلدهی به همراه خواهد داشت. وابستگی شدید گلدهی زعفران به درجه حرارت و شواهد موجود در مورد افزایش دما در مناطق مختلف استان خراسان فرضیه مربوط به تغییر رفتار گلدهی زعفران در شرایط تغییر اقلیم را تقویت می‌کند و هدف اصلی این تحقیق مطالعه رفتار گلدهی این گیاه در پاسخ به تغییرات اقلیمی آینده می‌باشد.

مواد و روش‌ها

ساختار مدل

در این مدل رفتار گلدهی زعفران توسط درجه حرارت تنظیم شده و در طی دو مرحله مجزا ارزیابی می‌گردد. مرحله اول گلدهی که پس از اتمام دوره خواب و از اواخر بهار آغاز می‌شود به درجه حرارت‌های بالا نیاز دارد. این دوره خود شامل ۱۰ ریز مرحله است که تشخیص آنها از طریق بررسی‌های میکروسکوپی میسر بوده و با شکل‌گیری اجزا مختلف گل از یکدیگر متمایز می‌شوند (۱۲، ۳۵). مولینا و همکاران (۳۸) درجه حرارت مطلوب برای تکمیل این مرحله از گلدهی را ۲۳-۲۵ درجه سانتیگراد گزارش کرده و نشان دادند که در شرایط دمای مطلوب طول این دوره ۱۵۰-۱۰۰ روز است. افزایش درجه حرارت در طی این دوره باعث تاخیر در مرحله اول گلدهی شده و در درجه حرارت‌های بالاتر از ۳۰ درجه سانتیگراد گلدهی انجام نخواهد شد. مرحله دوم گلدهی پس از تکمیل مرحله اول

زمانی یک روزه انجام گرفت. برازش مدل‌های رگرسیون با استفاده از نرم افزار Slide Write ver.2.0 انجام شد. داده‌های دراز مدت اقلیمی مربوط به درجه حرارت حداقل و حداکثر روزانه در شهرستان‌های اصلی تولید زعفران استان خراسان از مرکز ملی اقلیم شناسی تهیه گردید. بعلاوه تاریخ گلدهی زعفران از طریق ارزیابی محلی و نیز تکمیل پرسشنامه از ۳۳ مزرعه واقع در شهرستان‌های مختلف در جنوب و مرکز استان‌های خراسان جمع آوری شد (۱).

سناریوی تغییر اقلیم در این تحقیق بر اساس پیش بینی‌های انجام شده در مورد شاخص‌های اقلیمی-کشاورزی ایران تعیین شد. کوچکی و همکاران (۳۰) با استفاده از مدل‌های گردش عمومی میانگین افزایش درجه حرارت در مناطق جنوبی استان خراسان برای سال ۲۰۲۵ میلادی (۱۴۰۴ شمسی) را در محدوده ۱/۶ تا ۱/۹ درجه سانتیگراد برآورد کرده اند. بر این اساس در این پژوهش درجه حرارت فعلی مناطق تحت بررسی به میزان ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درجه سانتیگراد افزایش داده شد و مدل تحت هر یک از شرایط فوق اجرا گردید تا تاثیر افزایش درجه حرارت بر رفتار گلدهی زعفران شبیه سازی شود.

نتایج و بحث

پیش بینی طول دوره اول گلدهی

سرعت نمو در مرحله اول گلدهی زعفران بر اساس تابع ft_1 محاسبه گردید (شکل ۱) و بر این اساس طول این دوره در شهرستان‌های تحت بررسی در محدوده ۱۰۲ تا ۱۲۷ و با میانگین ۱۱۲ روز تعیین شد بنابراین پایان اولین مرحله گلدهی زعفران بسته به منطقه تولید از اوایل مهر ماه تا اوایل آبان ماه متغیر بوده و میانگین آن نیمه ماه مهر می‌باشد. تعیین زمان دقیق شروع مرحله اول گلدهی یعنی پایان دوره خواب و زمان اتمام آن (کامل شدن فیزیولوژیکی گل‌ها) مستلزم مطالعات میکروسکوپی می‌باشد (۲۱). مولینا و همکاران (۳۸) با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی طول این دوره را در دمای مطلوب نمو بین ۹۰ تا ۱۲۰ روز و در میانگین تیمارهای دمایی آزمایش خود ۱۵۰ روز گزارش کردند. در مطالعه حاضر زمان شروع این دوره (پایان مرحله

کرده و سرعت نمو نیز متناسب با آن کاهش می‌یابد، نهایتاً در دمای حداکثر نمو (T_{cl} ، درجه سانتیگراد) مقدار تابع برابر صفر خواهد شد. مقادیر T_{cl} و T_{ol} از نتایج مولینا و همکاران (۳۸) که با آزمایش در شرایط کنترل شده تعیین شده است استخراج گردید.

در مرحله دوم گلدهی، سرعت نمو تابع درجه حرارت‌های کاردینال (حداقل، حداکثر و بهینه) برای ظهور گل‌ها بوده و لذا ft_2 بصورت معادله ۴ تعریف گردید:

$$0. \quad T_a \leq T_b$$

$$ft_2 = \exp(\mu) \cdot (T_a - T_b)^\alpha \cdot (T_{c2} - T_a)^\beta \quad T_b < T_a < T_{c2} \quad (۴)$$

$$0. \quad T_a \geq T_{c2}$$

که در آن T_b و T_{c2} به ترتیب دمای حداقل و حداکثر نمو (درجه سانتیگراد) در مرحله ۲ و μ ، α و β ضرایب مدل ۵ پارامتری بتا می‌باشند. مقدار تابع در دمای کمتر از T_b و بیشتر از T_{c2} صفر بوده و در فاصله این دو درجه حرارت بصورت تابع بتا تغییر می‌کند بطوریکه در دمای بهینه به حداکثر خود می‌رسد و در نتیجه سرعت نمو نیز حداکثر خواهد شد (معادله ۲). مقادیر T_b و T_{c2} به دو طریق در مدل تعریف گردید. ابتدا این مقادیر از نتایج مولینا و همکاران (۳۸) در شرایط کنترل شده برای مرحله دوم گلدهی استخراج شد. در ادامه تابع بتا (معادله ۵) به داده‌های درجه حرارت و تاریخ گلدهی که از مناطق مختلف کشت زعفران جمع آوری شده بود برازش داده شد و درجه حرارت‌های حداقل و حداکثر محاسبه شدند.

$$DR_2 = \exp(\mu) \cdot (T_a - T_b)^\alpha \cdot (T_{c2} - T_a)^\beta \quad (۵)$$

چنانچه مشتق تابع بتا برابر صفر باشد درجه حرارت بهینه برای مرحله دوم گلدهی زعفران از معادله ۶ بدست خواهد آمد و حداکثر سرعت نمو در این مرحله با جایگذاری T_{o2} در معادله ۵ تعیین گردید (معادله ۷)

$$T_{o2} = \frac{(\alpha \cdot T_c) + (\beta \cdot T_b)}{\alpha + \beta} \quad (۶)$$

$$DR_{m2} = \exp(\mu) \cdot \alpha^\alpha \cdot \beta^\beta \cdot \left(\frac{T_c - T_b}{\alpha + \beta} \right)^{\alpha + \beta} \quad (۷)$$

مدل در محیط مترجم شبیه سازی (FST) نوشته شد و انتگرال گیری از سرعت نمو به روش رونه کوتا و با فواصل

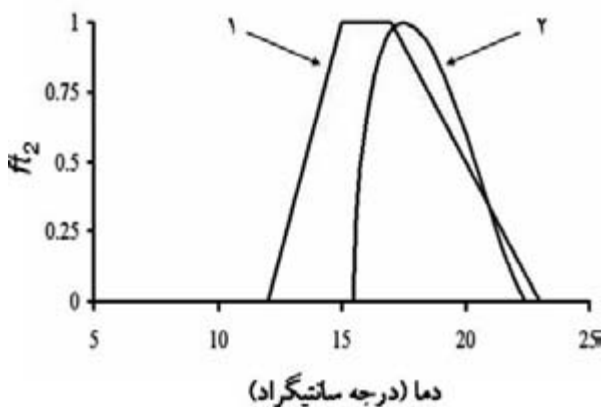
شده است.

تابع بتا در تعیین درجه حرارت‌های کاردینال گیاهان مختلف (۴۵) و نیز زعفران (۱۰) مورد استفاده قرار گرفته است. درجه حرارت‌های کاردینال پیش بینی شده در این مطالعه با مقادیری که توسط مولینا و همکاران (۳۸) برای این مرحله گزارش شده، تا حدودی اختلاف دارد.

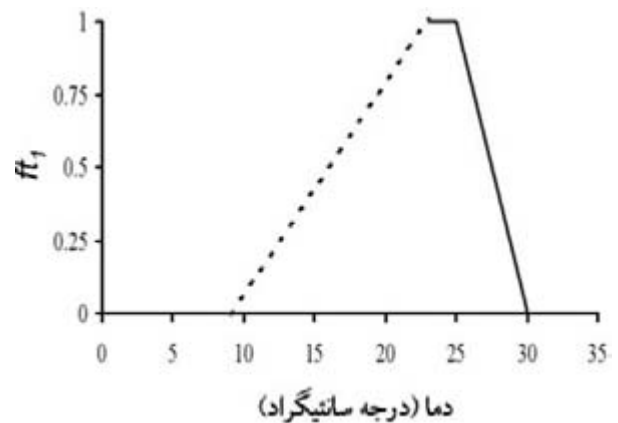
این محققین دمای بهینه برای مرحله دوم گلدهی زعفران را ۱۷-۱۵ و دمای حداکثر این مرحله را ۲۳ درجه سانتیگراد گزارش کردند در حالیکه در تحقیق حاضر دمای بهینه (T_{o2}) در محدوده ۱۹/۵-۱۶ و دمای حداکثر (T_{c2}) در حدود ۲۲/۵ درجه سانتیگراد برآورد شده است (جدول ۱). در شکل ۳

جدول ۱: مقادیر پیش بینی شده ضرایب تابع بتا، T_b و T_{c2} به ترتیب درجه حرارت‌های حداقل و حداکثر در مرحله دوم گلدهی، T_{o2} درجه حرارت بهینه برای این مرحله و حداکثر سرعت نمو در دمای بهینه می باشد که به ترتیب از معادلات ۵، ۶ و ۷ بدست آمده اند، مقادیر داخل پارانتر انحراف معیار ضرایب می باشند.

ضریب	(انحراف معیار)
	-۶/۰۹۲ (۲/۷۲)
T_b	۱۵/۴۹ (۱/۱۶)
	-۰/۵۶۳ (۱/۱۰)
T_{c2}	۲۲/۴۱ (۱/۷۰)
	۱/۳۵۵ (۱/۷۳)
T_{o2}	۱۷/۸۹ (۱/۶۲)
DR_{m2}	-۰/۰۲۸۹ (-۰/۰۰۴)



شکل ۳: تغییرات تابع درجه حرارت (f_{t2}) در مرحله دوم گلدهی زعفران؛ مقادیر تابع از نسبت سرعت نمو در هر درجه حرارت به حداکثر سرعت نمو در دمای بهینه محاسبه شده است، منحنی ۱ بر اساس داده‌های مولینا و همکاران و منحنی ۲ بر اساس داده‌های این تحقیق محاسبه شده است (برای توضیح بیشتر به متن مراجعه شود).

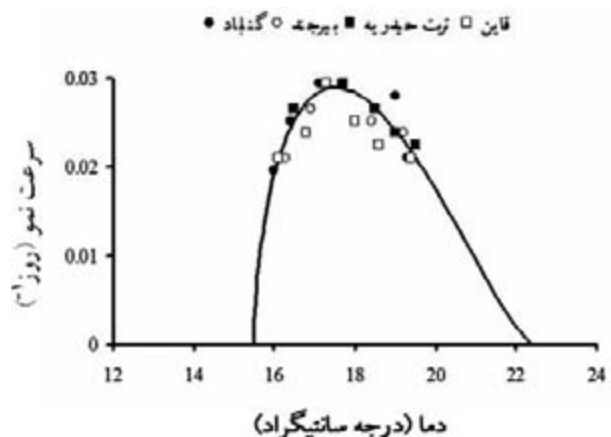


شکل ۱: تغییرات تابع درجه حرارت (f_{t1}) در مرحله اول گلدهی زعفران؛ مقادیر تابع بر اساس نسبت سرعت نمو در هر درجه حرارت به حداکثر سرعت نمو در دمای بهینه محاسبه شده است (برای جزئیات به متن مراجعه شود).

خواب) با توجه به نتایج مطالعات قبلی (۱) آخر خرداد ماه، و پایان این دوره بر اساس حداکثر سرعت نمو در دمای بهینه (۱۱/۰ روز^{-۱}) آخر شهریور ماه در نظر گرفته شد.

درجه حرارت‌های کاردینال و طول دوره دوم گلدهی

برازش مدل ۵ پارامتری بتا (معادله ۵) به داده‌های جمع آوری شده از ۴ شهرستان واقع در مناطق اصلی تولید زعفران در استان‌های خراسان رضوی و جنوبی نشان داد (شکل ۲) که این تابع برازش مطلوبی به داده ها دارد ($r^2 = 0.79^{**}$). پیش بینی درجه حرارت‌های حداقل، حداکثر و بهینه برای مرحله دوم گلدهی زعفران بوسیله تابع بتا در جدول ۱ ارائه



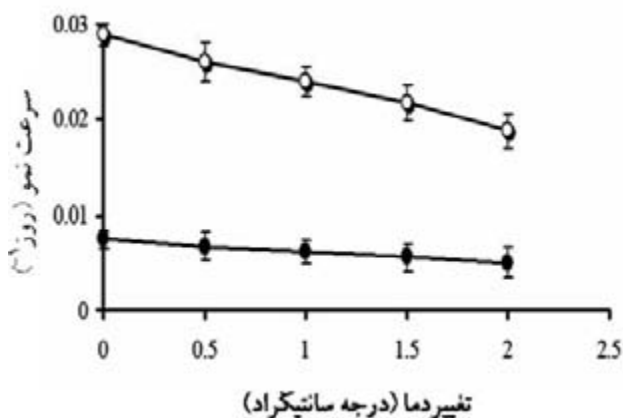
شکل ۲: رابطه بین سرعت نمو و درجه حرارت در مرحله دوم گلدهی زعفران، درجه حرارت‌های کاردینال برای این مرحله با برازش تابع بتا به داده های مربوط به شهرستان های مختلف محاسبه شده است.

نمو برای این مرحله ۳۴ روز و حداکثر طول این دوره در حدود ۵۰ روز تعیین گردید (شکل ۴). مولینا و همکاران (۳۸) طول دوره دوم گلدهی زعفران در دمای بهینه را ۴۰ روز گزارش کرده اند که با یافته‌های این تحقیق قابل مقایسه است در حالیکه بهدانی و همکاران (۱۰) طول این دوره را در دمای مطلوب ۲۳ روز برآورد کردند.

تاثیر تغییر اقلیم بر سرعت نمو

نتایج شبیه سازی نشان داد که با افزایش درجه حرارت سرعت نمو زعفران در هر دو مرحله از گلدهی بطور چشمگیری کاهش می‌یابد (شکل ۵). البته حداکثر میزان کاهش سرعت نمو به ازای ۲ درجه سانتیگراد افزایش میانگین دمای روزانه در مرحله دوم گلدهی (۳۵٪) تا حدودی بیشتر از کاهش آن در مرحله اول نمو (۳۲٪) می‌باشد.

تغییرات شبیه سازی شده تابع ft_2 (شکل ۶) نشان می‌دهد که با افزایش میانگین دمای روزانه مقادیر تابع از مقدار بهینه ($ft_2 = 1$) فاصله گرفته و با افزایش درجه حرارت به میزان ۱ تا ۲ درجه سانتیگراد به ترتیب به ۰/۸ و ۰/۶۵ خواهد رسید. بنابر این افزایش درجه حرارت ناشی از تغییر اقلیم باعث خواهد شد که بتدریج مرحله دوم گلدهی در مناطق تولید زعفران با درجه حرارت‌های بالاتر از دمای بهینه مواجه شده و در نتیجه سرعت نمو بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد.

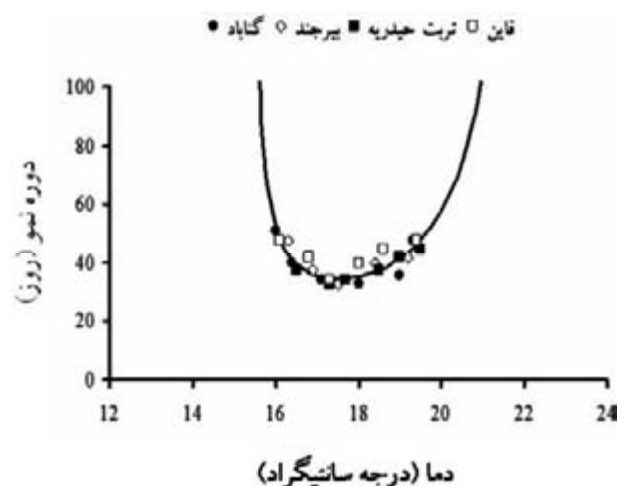


شکل ۵: مقادیر شبیه سازی شده سرعت نمو در مرحله اول (دایره توپر) و مرحله دوم (دایره تو خالی) گلدهی زعفران در شرایط افزایش میانگین دمای روزانه به میزان ۰/۵ تا ۲ درجه سانتیگراد نسبت به دمای فعلی، خطوط عمودی انحراف معیار مربوط به شهرستانهای تحت بررسی را نشان می‌دهد.

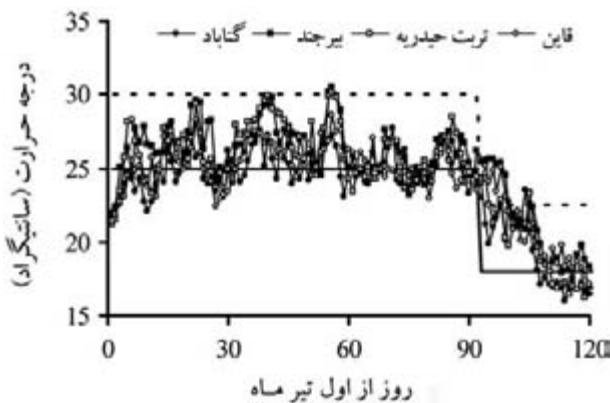
تابع درجه حرارت در مرحله دوم گلدهی (ft_2) بر اساس داده‌های این تحقیق با تابع حاصل از داده‌های مولینا و همکاران (۳۸) مقایسه شده است.

بهدانی و همکاران (۱۰) با استفاده از تابع بتا درجه حرارت‌های بهینه و حداکثر برای این مرحله از گلدهی زعفران را به ترتیب ۲۳/۱ و ۲۹ درجه سانتیگراد گزارش کرده اند. به نظر می‌رسد که اختلافات موجود در مطالعات مختلف تا حد زیادی به شرایط اجرای آزمایش و نوع داده‌های مورد استفاده بستگی دارد (۶). مطالعه مولینا و همکاران (۳۸) در شرایط کنترل شده و با استفاده از درجه حرارت ثابت در طی مراحل نمو انجام شده و داده‌های مطالعه بهدانی و همکاران (۱۰) درجه حرارت‌های شهریور ماه را نیز شامل بوده است. در مطالعه حاضر داده‌های مورد استفاده از شرایط مزرعه‌ای استخراج شده و در نتیجه پاسخ گلدهی به تغییرات روزانه درجه حرارت نیز در آن نهفته است بعلاوه پایان مرحله اول گلدهی بر اساس پیش بینی مدل تعیین شده و لذا درجه حرارت‌های بالای شهریور ماه در آن بکار نرفته است. بنابراین با توجه به انطباق بهتر تابع بتا با داده‌های مزرعه‌ای در این تحقیق پیش بینی سرعت نمو و طول دوره دوم گلدهی زعفران بر اساس این تابع (شکل ۳، منحنی ۲) انجام گرفت.

بر اساس مقادیر سرعت نمو محاسبه شده برای مناطق مختلف تولید زعفران، طول دوره دوم گلدهی در دمای بهینه



شکل ۴: رابطه بین طول دوره نمو و درجه حرارت در مرحله دوم گلدهی زعفران، طول این مرحله با معکوس کردن مقادیر سرعت نمو در شهرستانهای مختلف محاسبه شده است.



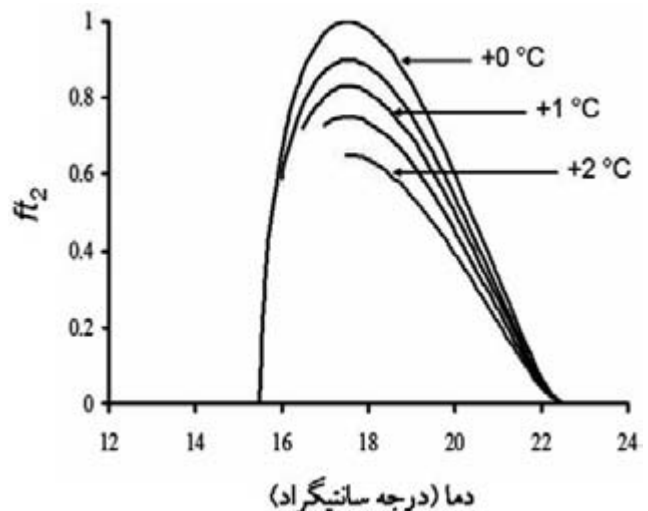
شکل ۷: میانگین دراز مدت (۱۲ ساله) درجه حرارت روزانه در مناطق مختلف کشت زعفران در استان‌های خراسان رضوی و جنوبی. پیش بینی مدل نشان می‌دهد که مرحله اول گلدهی زعفران از اول تیر ماه آغاز شده و در درجه حرارت بهینه پس از ۹۰ روز کامل خواهد شد، مرحله دوم گلدهی زعفران نیز در دمای بهینه پس از ۳۴ روز تکمیل می‌شود. خطوط پیوسته و منقطع به ترتیب درجه حرارت‌های بهینه و حداکثر را برای هر یک از مراحل گلدهی زعفران نشان می‌دهند.

زعفران به ازای هر ۱ درجه سانتیگراد افزایش میانگین درجه حرارت نسبت به شرایط فعلی حداقل ۳۲ و حداکثر ۳۸ روز افزایش خواهد یافت (شکل ۸-الف).

بر اساس نتایج این تحقیق هر ۱ درجه سانتیگراد افزایش درجه حرارت در مرحله دوم گلدهی طول این دوره را حداقل ۹ و حداکثر ۱۸ روز افزایش خواهد داد (شکل ۸-ب). نتایج همچنین نشان می‌دهد که به ازای هر یک درجه سانتیگراد افزایش

دمای روزانه، میانگین طول دوره اول و دوم گلدهی زعفران به ترتیب ۱۵/۹ و ۱۴/۱ روز افزایش می‌یابد. بنابراین به نظر می‌رسد که تاثیر افزایش درجه حرارت ناشی از تغییر اقلیم بر دو مرحله گلدهی زعفران تقریباً یکسان خواهد بود. شبیه سازی تغییرات طول دوره دوم نمو زعفران (شکل ۹) نشان داد که در صورت افزایش میانگین دمای روزانه به میزان بیش از ۱ درجه سانتیگراد، طول این دوره در تمامی مناطق کشت زعفران در استان‌های خراسان بیشتر از ۵۰ روز خواهد بود.

تاثیر گرمایش بر فنولوژی گیاهان بسته به خصوصیات گونه و موقعیت جغرافیایی منطقه متغیر می‌باشد (۴۱). در مناطق واقع در عرض‌های شمالی بالا نظیر شمال اروپا، کانادا و روسیه گرمایش ناشی از تغییر اقلیم باعث خواهد شد تا

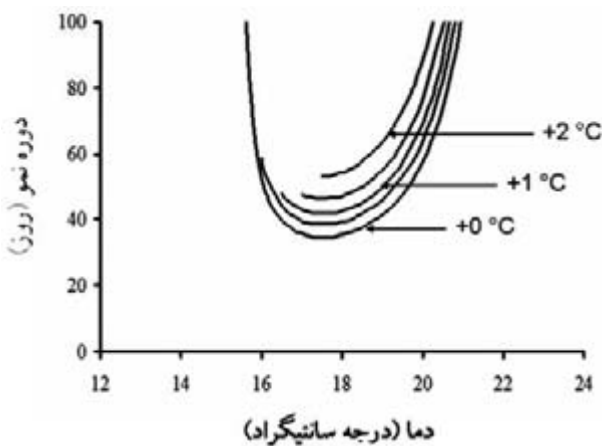


شکل ۶: مقادیر شبیه سازی شده تابع درجه حرارت در مرحله دوم گلدهی زعفران (ft_2) در شرایط افزایش میانگین دمای روزانه به میزان ۰/۵ تا ۲ درجه سانتیگراد، نسبت به دمای فعلی. مقادیر تابع با احتساب تاثیر گرمایش بر سرعت نمو در مرحله اول گلدهی (ft_1) برآورد شده است.

نتایج مطالعات مختلف نشان داده است که تغییر اقلیم و افزایش درجه حرارت ناشی از آن باعث افزایش طول فصل رشد در اکثر مناطق جهان خواهد شد (۳۷، ۱۴). از سوی دیگر با افزایش درجه حرارت در فاصله بین دمای پایه تا دمای بهینه، سرعت نمو گیاهان افزایش یافته و در درجه حرارت‌های بالاتر از دمای بهینه سرعت نمو کاهش می‌یابد (۶، ۲۷). بنابراین ارزیابی تاثیر گرمایش بر فنولوژی گیاهان مستلزم آگاهی از درجه حرارت‌های کاردینال نمو و شدت افزایش دما خواهد بود. در شکل ۷ میانگین دراز مدت درجه حرارت روزانه از آغاز مرحله اول گلدهی زعفران برای مناطق مختلف کشت این محصول در استان‌های خراسان ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در تمامی شهرستانها میانگین درجه حرارت فعلی بالاتر از دمای بهینه برای هر دو مرحله گلدهی زعفران می‌باشد. بنابراین کاهش سرعت نمو به دلیل افزایش درجه حرارت ناشی از تغییر اقلیم قابل انتظار بوده و پیش بینی مدل نیز این فرضیه را تایید می‌کند.

تاثیر تغییر اقلیم بر طول دوره نمو

افزایش درجه حرارت ناشی از تغییر اقلیم طول دوره نمو زعفران را که در واقع عکس سرعت نمو می‌باشد افزایش می‌یابد. نتایج شبیه سازی نشان داد که طول کل دوره نمو



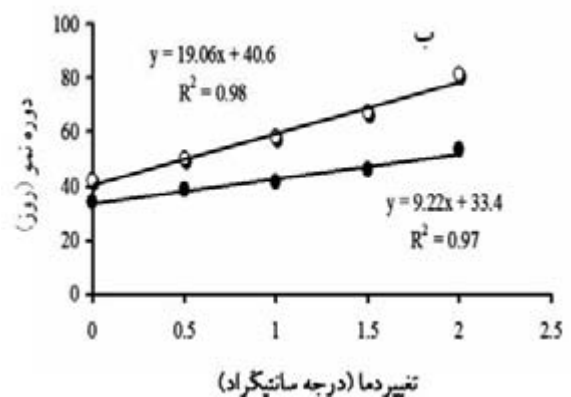
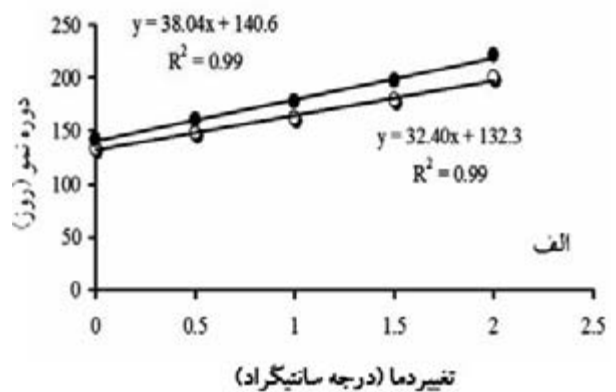
شکل ۹: مقادیر شبیه سازی شده طول دوره دوم گلدهی زعفران در شرایط افزایش میانگین دمای روزانه به میزان ۰/۵ تا ۲ درجه سانتیگراد، نسبت به دمای فعلی. طول دوره با احتساب تاثیر گرمایش بر سرعت نمو در مرحله اول گلدهی برآورد شده است.

رشد گیاهان است متفاوت بوده و افزایش درجه حرارت ناشی از تغییر اقلیم باعث خواهد شد تا میانگین دمای روزانه به بالاتر از درجه حرارت بهینه نمو افزایش یافته و تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مراحل نمو گیاهان ایجاد شود (۴۲) که در این ارتباط می‌توان به گزارشات مربوط به برنج و گندم (۲۲) و سویا (۸) اشاره کرد. در ایران نیز کوچکی و نصیری (۴) نشان دادند که افزایش درجه حرارت بهار و تابستان به میزان ۲ درجه سانتیگراد اختلالاتی را در الگوهای گلدهی و زمان پر شدن دانه در گندم به همراه خواهد داشت.

تاثیر افزایش درجه حرارت بر رفتار گلدهی زعفران به دلیل ویژگی‌های خاص رشد و نمو آن پیچیده است. در واقع زعفران زمانبندی دوره خواب و فعالیت بیولوژیکی خود را طوری با رژیم حرارتی سالانه تنظیم کرده است که انطباق مراحل نمو با شرایط نامناسب محیطی حداقل شده و حداکثر استفاده از فصل رشد ممکن گردد و این مکانیزم باعث سازگاری دقیق ژنوتیپ‌های بومی زعفران به شرایط اقلیمی محلی شده است (۳۳). بروز تغییرات سریع اقلیمی این سازگاری را دگرگون کرده و رفتار گلدهی این گیاه را دچار اختلال خواهد ساخت.

جمع بندی

شبیه سازی تاثیر افزایش درجه حرارت بر گلدهی زعفران نشان داد که افزایش دما به میزان ۰/۵ تا ۲/۰ درجه



شکل ۸- تاثیر افزایش درجه حرارت بر (الف) طول دوره گلدهی زعفران (مجموع مراحل اول و دوم) و (ب) طول دوره دوم گلدهی، دایره‌های توپر و توخالی به ترتیب حداقل و حداکثر طول دوره را نشان می‌دهند. شبیه سازی بر اساس افزایش درجه حرارت به میزان ۰/۵ تا ۲ درجه سانتیگراد نسبت به شرایط فعلی انجام شده است.

فصل رشد در بهار زودتر آغاز شده و در نتیجه زمان وقوع مراحل فنولوژی گیاهان تغییر یابد (۹، ۱۹، ۴۰). با وجودیکه مطالعات مربوط به تاثیر افزایش درجه حرارت بر زمانبندی مراحل فنولوژی گیاهان عمدتاً بر روی پوشش‌های طبیعی انجام شده است (۱۶) ولی تاثیر گرمایش ناشی از تغییر اقلیم بر جابجا شدن مراحل نمو گیاهان زراعی و درختان میوه نیز به اثبات رسیده است. برای مثال زمان

گلدهی سیب و گیلاس در آلمان به ازای هر ۱ درجه سانتیگراد افزایش درجه حرارت ۵ تا ۷ روز تغییر خواهد کرد. چنین تغییراتی در مورد مراحل نمو چاودار زمستانه و چغندر قند نیز گزارش شده است (۱۵).

این وضعیت در مناطق واقع در عرضهای جغرافیایی پایین که در شرایط فعلی بالا بودن دمای تابستان محدود کننده

جدول ۲- تاریخ‌های پیش‌بینی شده برای گلدهی زعفران در مناطق مختلف تولید در استانهای خراسان در شرایط افزایش میانگین دمای روزانه به میزان ۰/۵ تا ۲ درجه سانتیگراد نسبت به شرایط فعلی، محاسبات با احتساب تاثیر درجه حرارت بر هر دو مرحله گلدهی انجام شده است.

تاریخ پیش‌بینی شده گلدهی		افزایش دما
حداکثر	حداقل	(درجه سانتیگراد)
۱۰ آبان	۲۸ مهر	۰/۵
۲۳ آبان	۱۲ آبان	۱/۰
۷ آذر	۲۵ آبان	۱/۵
۲۲ آذر	۹ آذر	۲/۰

قدردانی

بودجه این تحقیق از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد (طرح پژوهش) تامین گردید که بدینوسیله سپاسگزاری می‌شود.

سانتیگراد نسبت به شرایط فعلی، سرعت نمو را در هر دو مرحله گلدهی کاهش و در نتیجه طول هر دو مرحله را افزایش خواهد داد. کوچکی و همکاران (۳۰) با بررسی شرایط اقلیمی آینده ایران بوسیله مدل‌های گردش عمومی نشان دادند که مناطق جنوبی استان‌های خراسان در سالهای ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ میلادی به ترتیب با ۱/۵ و ۲/۳ درجه سانتیگراد افزایش میانگین درجه حرارت مواجه خواهند بود. یافته‌های این تحقیق نشان داد که مهمترین پی‌آمد این افزایش دما تغییر در زمان گلدهی زعفران است که بسته به میزان افزایش درجه حرارت تا اواخر آذر ماه به تاخیر خواهد افتاد (جدول ۲).

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از مناطق کشت زعفران در شرایط اقلیمی فعلی جمع‌آوری شده و پیش‌بینی رفتار گلدهی زعفران از طریق مدل‌سازی صورت گرفته است. انجام مطالعات دقیق در محیط‌های کنترل شده اطلاعات بیشتری را در مورد پاسخ گلدهی زعفران به افزایش درجه حرارت فراهم خواهد ساخت.

منابع

- ۱- بهدانی، م. ع. ۱۳۸۴. پهنه بندی اکولوژیکی و پایش نوسانات عملکرد زعفران در خراسان. ۱۳۸۴. پایان نامه دکتری زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۲- صادقی، ب. ۱۳۷۶. تاثیر آبیاری تابستانه بر عملکرد زعفران. نشریات سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران. مرکز خراسان.
- ۳- کمالی، غ. ۱۳۶۸. مطالعات بیوکلیمایی زعفران در جنوب خراسان. سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران. مرکز خراسان.
- ۴- کوچکی، ع. م. و نصیری، ۱۳۸۷. تاثیر تغییر اقلیم همراه با افزایش غلظت CO₂ بر عملکرد گندم در ایران و ارزیابی راهکارهای سازگاری. پژوهشهای زراعی ایران، ۱(۶): ۱۵۳-۱۳۹.
- ۵- مشایخی، ک. و ن. لطیفی. ۱۳۷۶. بررسی اثر وزن پیاز بر گلدهی زعفران. مجله علوم کشاورزی ایران. ۲۸(۱): ۱۰۵-۹۷.
- 6-Atkinson, D. and J. R. Porter, 1996. Temperature, plant development and crop yields. Trends in Plant Sciences, 4: 119-124.
- 7-Azizbekova, N.S.H., and E.L., Milyaeva, 1999. Saffron cultivation in Azerbaijan. In: Negbi, M. (Ed.), Saffron: *Crocus sativus* L. Harwood Academic Publishers, Australia, pp. 63-71.
- 8-Baker J.T., and L.H., Allen. 1993. Contrasting crop species responses to CO₂ and temperature: rice, soybean and citrus. Vegetatio 104/105: 239-260.
- 9-Beaubien, E., and B., Freeland, 2000. Spring phenology trends in Alberta, Canada: links to ocean temperature. International Journal of Biometeorology, 44: 53-59.
- 10-Behdani, M. A., M. Nassiri and A. Koocheki, 2004. Modeling saffron flowering time across a temperature gradient. Acta Horticulturae, 650: 215-218.
- 11-Behdani, M.A., M., Nassiri Mahallati and A. Koocheki, 2008. Evaluation of irrigation management of saffron at agroecosystem scale in dry regions of Iran. Asian Journal of Plant Sciences, 7(1): 22-25.
- 12-Benschop, M., 1993. Crocus. In: De Hertogh, A., Le Nard, M. (Eds.), The Physiology of Flower Bulbs. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, pp. 257-272.
- 13-Bradley, N.L., Leopold, A.C., Ross, J., and W., Huffaker, 1999. Phenological changes reflect climate change in Wisconsin. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 96, 9701-9704.

- 14-Chmielewski, F.M., and T., Rötzer, 2002. Annual and spatial variability of the beginning of growing season in Europe in relation to air temperature changes. *Climate Research*, 19 (1): 257–264.
- 15-Chmielewski, F.M., A., Müller, and E., Bruns, 2003. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 117: 112–123.
- 16-Defila, C., and B., Clot, 2001. Phytophenological trends in Switzerland. *Int. J. Biometeorol.* 45, 203–207.
- 17-DeMastro, G. and C. Ruta, 1993. Relation between corm size and saffron (*Crocus sativus* L.) flowering. *Acta Horticulturae*, 344: 512–517.
- 18-Ellis, R.H., Hadley, P., Roberts, E.H. and R.J., Summerfield, 1990. Quantitative relations between temperature, crop development and growth. In: M.T. Jackson, B.V. Ford-Lloyd and M.L. Parry (Eds.), *Climate change and plant genetic resources*. Belhaven Press, London, UK, 85-115.
- 19-Ewert, F., M.D.A., Rounsevell, I., Reginster, M.G., Metzger and R., Leemans, 2005. Future scenarios of European agricultural land use. I. Estimating changes in crop productivity. *Agriculture Ecosystems and Environment* 107: 101–116.
- 20-Farooq, S. and K. Koul, 1983. Changes in gibberellins like activity in corms of saffron plant (*Crocus sativus* L.) during dormancy and sprouting. *Journal of Plant Biochemistry*, 178: 685-691.
- 21-Fernandez, J.A., 2004. Biology, biotechnology and biomedicine of saffron. *Recent Res. Dev. Plant Sci.* 2, 127–159.
- 22-Fulu, T., Y., Masayuki, X., Yinlong, H., Yousay and Z., Zhao, 2006. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138: 82–92.
- 23-Gregory, P.J., J.S.I., Ingram and M., Brklacich, 2005. Climate change and food security. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 360: 2139–2148.
- 24-Gresta, F., Lombardo, G.M., Siracusa, L., and G., Ruberto, 2008. Saffron, an alternative crop for sustainable agricultural systems. A review. *Agronomy and Sustainable Development*, 28: 95–112.
- 25-Gresta, F., G., Avola, G.M., Lombardo L. Siracusa, and G. Ruberto, 2009. Analysis of flowering, stigmas yield and qualitative traits of saffron (*Crocus sativus* L.) as affected by environmental conditions. *Scientia Horticulturae* 119 320–324
- 26-Holden, N. M., Brereton, A. J., Fealy, R., and J. Sweeney. 2003. Possible change in Irish climate and its impact on barely and potato yields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116: 181-196.
- 27-Horie, T., J.T., Baskar and H., Nakagawa, 2000. Crop ecosystem responses to climate change: Rice. In: Reddy, K.R., Hodges, H.F. (Eds.), *Climate change and Global crop productivity*. CABI Publishing, Wallingford, Oxon, pp. 81–106.
- 28-Juana, J.A., H.L., Cícolesb, R.M., Munozb, and M.R., Picornella, 2009. Yield and yield components of saffron under different cropping systems. *Industrial Crops and Products* 30: 212–219.
- 29-Kafi, M., M.H. Rashed, A. Koocheki and A. Mollafilabi, 2002. Saffron (*Crocus sativus* L.), production and processing. Center of excellence for agronomy, Faculty of Agriculture Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
- 30-Koocheki, A., Nassiri, M., Kamali, G.A., and H. Shahandeh. 2006. Potential impacts of climate change on agroclimatic indicators in Iran. *Arid land Research and Management*, 20: 245-259.
- 31-Koocheki, A., Nassiri, M., Soltani, A., Sharifi, H., and R. Ghorbani. 2006. Effects of climate change on growth criteria and yield of sunflower and chickpea crops in Iran. *Climate Research*, 30: 247-253.
- 32-Koocheki, A., M., Behdani, and M., Nassiri. 2006. Agronomic attributes of saffron yield at agroecosystem scale in Iran. *Journal of Applied Horticulture*, 8(2): 121-124.
- 33-Koocheki, A. 2004. Indigenous knowledge in agriculture with particular reference to saffron production in Iran. *Acta Horticulturae*. 650: 175-182.
- 34-Koul, K.K., S., Farooq, 1984. Growth and differentiation in the shoot apical meristem of the saffron plant (*Crocus sativus* L.). *Journal of Indian Botanical Society*, 63: 153–160.
- 35-Le Nard, M., A., De Hertog, 1993. Bulb growth, development and flowering. In: De Hertog, A., Le Nard, M. (Eds.), *The Physiology of Flower Bulbs*. Elsevier, Amsterdam, (Chapter 4), pp. 29–43.
- 36-Menzel, A. 2000. Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996. *International Journal of Biometeorology*, 44: 76–81.
- 37-Menzel, A., and P. Fabian. 1999. Growing season extended in Europe. *Nature*. 397: 659.
- 38-Molina, R.V., M. Valero1, Y. Navarro1, J.L. Guardiola, A. Garcí'a-Luis, 2005. Temperature effects on flower formation in saffron (*Crocus sativus* L.). *Scientia Horticulturae*, 103: 361–379.
- 39-Molina, R.V., García-Luis, A., Coll, V., Ferrer, C., and M., Valero, 2004. Flower formation in the saffron *Crocus sativus* L.). The role of temperature. *Acta Horticulture* 650, 39–47.
- 40-Parry, M., C., Rosenzweig, A., Inglesias, M., Livermore and G., Gischer, 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global and Environmental Change*, 14: 53–67.
- 41-Reddy K.R., Hodges H.F., and J.M., McKinion, 1995. Cotton crop responses to a changing environment. In:

- Rosenzweig C, Jones JW, Allen LH Jr., eds. Climate change and agriculture: analysis of potential international impacts. Madison, WI: American Society of Agronomy. ASA Special Pub. No. 59, 3±30.
- 42-Sivakumar, M.V.K., H.P., Das and O., Brunini, 2005. Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi-arid tropics. *Climatic Change*, 70: 31–72.
- 43-Sparks, T.H., Jeffree, E.P., and C.E.,Jeffree, 2000. An examination of the relationship between flowering times and temperature at the national scale using long-term phonological records from the UK. *Int. J. Biometeorol.* 44, 82–87.
- 44-Wheaton, E.E. 1994. Impacts of a Variable and Changing Climate on the Canadian Prairie Provinces: A Preliminary Integration and Annotated Bibliography. SRC Publication No. E-2900-7-E-93. Saskatchewan Research Council, Saskatoon.
- 45-Yin, X. 1996. Quantifying the effects of temperature and photoperiod on phonological development to flowering in rice. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 173 pp.

Modelling the impact of climate change on flowering behaviour of Saffron (*Crocus sativus* L.)

A. Koocheki¹, M. Nassiri¹, A. Alizadeh¹, A. Ganjali²

Abstract

Flowering in saffron take places in two separate stages, both triggered by temperature as the main driving force. Based on the existing evidence about the temperature rise due to global warming it seems that flowering behaviour of saffron could be affected by future climate change in production areas. In order to study the flowering responses of saffron to temperature rise a model for simulation of flowering behaviour was developed. Using this model development rate and duration at each flowering stage in response to 0.5, 1.0, 1.5 and 2 °C increase in mean daily temperature above the current records was simulated. In the model development rate (DR) is calculated based on maximum DR at optimum temperature (DR_{m1} , DR_{m2}) multiplied by a specific temperature function for each stage (ft_1 , ft_2). Duration of each flowering stage was then estimated as the reciprocal of the calculated development rates. The value of DR_{m1} and ft_1 was estimated from evidences in the literature at optimum temperature of 23-25 °C. DR_{m2} and ft_2 was calculated by fitting 5-parameter β function to the saffron development rate and temperature data were collected from farmers fields located in production areas. Using these data the minimum, optimum and maximum temperatures for the second stage of flowering was estimated as 15.5, 18.0 and 22.5 °C, respectively with maximum development rate of 0.0289 day⁻¹. Simulation results indicated that the effect of temperature rise on reducing development rate was similar for both flowering stages and hence flowering duration will be increased by 32 to 38 days per 1 °C increase in mean daily temperature. Therefore, temperature rise by 1.5-2.0 °C due to climate change results in postponing time of flower emergence until early to late December in the main saffron production regions of Khorasan provinces.

Keywords: Saffron, climate change, flowering, temperature, modelling