

تأثیر تغییر اقلیم بر کشاورزی ایران: ۲- پیش‌بینی تولید محصولات زراعی و راهکارهای سازگاری

علیرضا کوچکی^{۱*} - مهدی نصیری محلاتی^۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۷/۰۲

چکیده

شواهد موجود نشان می‌دهد تغییر جهانی اقلیم بسیاری از متغیرهای اقلیمی کشاورزی ایران را در چند دهه آینده تحت تأثیر قرار خواهد داد. با این حال مطالعات اندکی در مورد پی‌آمدهای آن بر تولید گیاهان زراعی در سطح ملی انجام شده است. در این تحقیق عملکرد گندم، ذرت، نخود و چغندر قند به‌عنوان ۴ گونه مهم زراعی در شرایط اقلیمی سال ۲۰۵۰ میلادی با مقادیر فعلی مقایسه و تغییرات آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. شرایط اقلیمی سال هدف براساس یک سناریوی استاندارد به‌وسیله مدل گردش عمومی GFDL برآورد شد و نتایج به‌عنوان داده‌های آب و هوایی در مدل سوکروز که قبلاً به‌وسیله داده‌های آزمایشی برای گونه‌های تحت بررسی تعیین اعتبار شده بود مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین عملکرد گندم، ذرت، نخود و چغندر در سال هدف در مناطق مختلف کشور به‌ترتیب ۱۸/۶، ۱۹/۱، ۶/۶ و ۲۰ درصد کاهش خواهد یافت. این کاهش عمدتاً به دلیل افزایش دما بوده و افزایش غلظت دی‌اکسید کربن تنها در حدود ۵/۶ درصد از اثرات منفی دمای بالا را جبران می‌کند. آنالیز رگرسیون بر روی نتایج نشان داد که عملکرد گیاهان تحت بررسی به‌ازای هر ۱°C افزایش دما در طی کل دوره رشد بین ۹ تا ۱۷ درصد کاهش می‌یابد. البته در مورد گندم و ذرت کاهش عملکرد تا حد زیادی تابع میزان افزایش دما در طی دوره پر شدن دانه خواهد بود. افزایش دما، طول کل دوره رشد و نیز طول دوره پر شدن دانه را در گیاهان دانه‌ای کاهش خواهد داد. نتایج حاکی از این بود که در ذرت و گندم کاهش طول دوره پر شدن دانه و در نخود و چغندر کاهش طول دوره رسیدگی (کاشت تا برداشت) عامل اصلی کاهش عملکرد می‌باشد. با توجه به مقدار ضریب تبیین بین متغیرهای مختلف، به‌طور متوسط در حدود ۶۰ درصد از تغییرات عملکرد ۴ محصول تحت بررسی با افزایش دما توصیف می‌شود و به همین دلیل تغییرات مکانی عملکرد این محصولات در مناطق مختلف کشور با الگوی مکانی تغییرات دما در سال ۲۰۵۰ منطبق است. بنابراین راهکارهای سازگاری به شرایط اقلیمی سال هدف باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که اثرات سوء دماهای بالا به‌ویژه در مراحل حساس رشد را کاهش دهند. ارزیابی روش‌های سازگاری از طریق شبیه‌سازی نشان داد که تغییر تاریخ کاشت و افزایش مقاومت به گرما روش‌های مؤثری برای سازگاری به شرایط اقلیمی آینده در محصولات تحت بررسی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات عملکرد، راهکارهای سازگاری، طول دوره رشد، گرمایش جهانی

مقدمه

خواهد داشت با این حال اغلب مطالعات تجربی انجام شده متوجه کشورهای توسعه یافته می‌باشد (Kang et al., 2003). مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر تولید محصولات زراعی مستلزم برآورد وضعیت اقلیمی آینده است. این برآوردها در حال حاضر به‌وسیله مدل‌های گردش عمومی (GCMs) و براساس سناریوهای مختلف انجام می‌گیرد و تلفیق این نتایج با مدل‌های شبیه‌سازی رشد امکان پیش‌بینی عملکرد گیاهان زراعی را در شرایط اقلیمی آینده فراهم می‌سازد (Carson, 1999). گیاهان زراعی از طریق افزایش فتوسنتز و کاهش هدایت روزنه‌ای به افزایش غلظت CO₂ پاسخ می‌دهند و سایر اثرات افزایش غلظت این گاز بر گیاه و اکوسیستم

با مطمئن‌تر شدن محققین از اینکه بالا رفتن غلظت گازهای گلخانه‌ای موجب افزایش دمای کره زمین خواهد شد (Kenter et al., 2006) نگرانی‌هایی در مورد اثرات بالقوه این تغییرات بر تولید محصولات زراعی به‌وجود آمده است. از آنجا که کشورهای در حال توسعه به شدت به کشاورزی وابسته‌اند، تأثیر گرمایش جهانی بر تولیدات این کشورها مخاطرات جدی از نظر امنیت غذایی به همراه

۱ - استاد گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

(Email: akooch@um.ac.ir)

*- نویسنده مسئول:

مدل گردش عمومی شاخص‌های اقلیمی کشاورزی ایران را برای سال ۲۰۵۰ میلادی (۱۴۳۰ شمسی) پیش‌بینی کرده و نشان دادند که میانگین دمای سالانه مناطق مختلف کشور تا سال هدف بین ۳/۵ تا ۴/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد در حالی‌که میانگین بارش سالانه بین ۷ تا ۱۴ درصد کاهش خواهد یافت. به‌علاوه این تغییرات از غرب به شرق و از شمال به جنوب کشور شدیدتر خواهد بود. بدون تردید بروز این تغییرات قابل توجه اقلیمی، پی‌آمدهایی را بر تولید محصولات زراعی در کشور به‌دنبال دارد که در مقیاس ملی کمتر مورد بررسی قرار گرفته و از سوی دیگر روش‌های مقابله با این شرایط نیز به‌درستی مطالعه نشده است. بنابراین هدف از اجرای این پژوهش ارزیابی تأثیر تغییرات آینده اقلیمی بر تولید برخی محصولات زراعی و ارائه راهکارهایی برای سازگاری به شرایط آینده می‌باشد.

مواد و روش‌ها

داده‌های اقلیمی: آمار درازمدت هواشناسی شامل مقادیر ماهانه دما حداقل، حداکثر و بارش برای دوره ۴۰ ساله (۱۹۶۵-۲۰۰۵) مربوط به شهرستان‌های اراک، اردبیل، اصفهان، اهواز، آبادان، ایلام، ارومیه، بوم، بوشهر، بندرعباس، بندرانزلی، تبریز، تربت حیدریه، تهران، خرم‌آباد، خوی، رامسر، زاهدان، زنجان، سنج، ساری، سبزوار، سمنان، شاهرود، شهرکرد، شیراز، قزوین، قم، کرمان، کرمانشاه، گرگان، مشهد، همدان و یزد از بانک داده‌های سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. این ایستگاه‌ها به نحوی انتخاب شده‌اند که پوشش کاملی از نقاط مختلف اقلیمی ایران را فراهم ساخته و معرف وضعیت عمومی کشور باشند. پیش‌بینی شاخص‌های اقلیمی براساس سناریوی A1f (تداوم وضع فعلی^۱) با استفاده از دو مدل گردش عمومی GFDL و GISS برای سال ۲۰۵۰ میلادی (۱۴۳۰ شمسی) انجام شد که جزئیات آن توسط کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2015) توصیف شده است.

شبیه‌سازی رشد و نمو و عملکرد محصولات زراعی: جهت پیش‌بینی رشد و تولید چهار محصول زراعی شامل گندم (*Triticum aestivum*)، نخود (*Pisum sativum*)، چغندر قند (*Beta vulgaris*) و ذرت از مدل SUCROS (Van Laar et al., 1997) استفاده شد. سوکروز یک مدل عمومی است که ماده خشک، مراحل فنولوژیکی و عملکرد محصولات زراعی را براساس داده‌های روزانه آب و هوایی با فواصل یک روزه شبیه‌سازی می‌کند. مراحل نمو متناسب با سرعت نمو که خود تابعی از دما است محاسبه شده و توزیع ماده خشک بین اندام‌ها براساس مرحله نمو تعیین می‌گردد. جزئیات مدل SUCROS توسط خودریان و فان لار (Goudiraan and van

ناشی از تغییر در این دو فرآیند بنیادی است) (Goudiraan, 1996; Pidgeon et al., 2001). براساس برآوردهای مجمع بین‌دول تغییر اقلیم در غلظت‌های ۵۰۰ تا ۵۵۰ ppm گازکربنیک میانگین افزایش فتوسنتز برای گیاهان C₃، ۳۵-۳۰ درصد و برای گیاهان C₄، ۲۵-۱۰ درصد است. البته افزایش عملکرد کمتر از این مقدار بوده و برای گیاهان زراعی C₃ و C₄ به‌ترتیب بین ۲۵-۱۰ و ۱۰-۰ درصد می‌باشد (IPCC, 2007). افزایش مقاومت روزنه‌ای نیز با کاهش تعرق موجب افزایش کارایی مصرف آب و در نتیجه عملکرد بالاتر در گیاهان زراعی خواهد شد (Asseng et al., 2004). این اثرات مثبت تابع شرایط رشد گیاهان زراعی می‌باشد برای مثال تویئلو و همکاران (Tubiello et al., 2000) نشان دادند که واکنش گندم به تغییر اقلیم در شرایط دیم یا آبی و تیز در شرایط کوددهی کم یا زیاد متفاوت می‌باشد.

با وجودی‌که نقش حاصلخیزکننده CO₂ بر بهبود رشد گیاهان به اثبات رسیده است، ولی افزایش دما ناشی از گرمایش جهانی این تأثیر مثبت را خنثی خواهد کرد (Long et al., 2004). البته افزایش دما در مناطق واقع در عرض‌های شمالی که با محدودیت طول فصل رشد مواجه هستند مطلوب خواهد بود در حالی‌که افزایش دما در مناطق گرم و خشک تولید را به‌شدت محدود می‌سازد. به‌عنوان مثال در دانمارک سطح زیر کشت ذرت (*Zea mays*) از ۱۱ هزار هکتار در سال ۱۹۹۳ به ۱۲۰ هزار هکتار در سال ۲۰۰۵ افزایش یافته که ناشی از افزایش دما در طی دوره رشد این گیاه و در نتیجه مناسب شدن شرایط تولید می‌باشد (Kjellsrom, 2005). در مقابل جونز و تورنتون (Jones and Thornton, 2003) پیش‌بینی کرده‌اند که عملکرد ذرت در آفریقا و آمریکای لاتین تا سال ۲۰۵۰ میلادی در حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد که ارزش آن معادل ۲ میلیارد دلار آمریکا است. شواهد آزمایشی نشان می‌دهد که تسریع مراحل فنولوژی مهم‌ترین پی‌آمد افزایش دما در گیاهان است. منزل و همکاران (Menzel et al., 2006) با مطالعه ۵۴۲ گونه گیاهی در ۲۶ کشور اروپا که شامل ۱۲۵ هزار سری زمانی بود دریافتند که در فاصله سال‌های ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۰ میلادی در ۷۸ درصد موارد سرعت نمو به دلیل بالا رفتن دما افزایش یافته و طول مراحل کوتاه‌تر شده است. کوتاه‌تر شدن طول دوره رشد ناشی از افزایش دما در اغلب گیاهان زراعی باعث کاهش عملکرد می‌شود زیرا تابش کمتری جذب شده و زمان کمتری برای تجمع ماده خشک در اختیار گیاه خواهد بود (Fulco and Senthold, 2006). باید توجه داشت که تأثیر توأم افزایش غلظت CO₂ و دما بر عملکرد گیاهان زراعی پیچیده بوده و بسته به موقعیت جغرافیایی متفاوت می‌باشد، بنابراین درک دقیق وضعیت تولید محصولات زراعی در شرایط اقلیمی آینده مستلزم انجام مطالعات در مقیاس منطقه‌ای و ملی می‌باشد.

کوچکی و همکاران (Koocheki et al., 2015) با استفاده از دو

استفاده شد (معادله ۲):

$$\Phi_p = \frac{(C_e - \Gamma)(C_{350} + 2\Gamma)}{(C_e + 2\Gamma)(C_{350} - \Gamma)} \quad (2)$$

که در آن Φ_p نسبت سرعت فتوسنتز در غلظت‌های بالای CO_2 نسبت به غلظت فعلی، C_{350} غلظت فعلی (۳۵۰ ppm)، C_e غلظت افزایش یافته (ppm) و Γ نقطه جبران CO_2 می‌باشد که خود وابسته به دما بوده و از معادله ۳ محاسبه می‌شود:

$$\Gamma = \frac{(163 - T)}{(5 - 0.1T)} \quad (3)$$

که در آن T دما ($^{\circ}\text{C}$) است. به این ترتیب با ضرب کردن مقدار Φ_p در A (معادله ۱) سرعت فتوسنتز در هر غلظت CO_2 به دست خواهد آمد. مقدار Φ_p در غلظت فعلی CO_2 برابر ۱ بوده و با افزایش غلظت بالا می‌رود، البته دما نیز بر آن مؤثر است و در دماهای بالا مقدار Φ_p با افزایش غلظت CO_2 کاهش خواهد یافت (شکل ۱). واکنش فتوسنتز به افزایش غلظت CO_2 در گونه‌های C_3 که با معادلات ۲ و ۳ بیان شد برای گونه‌های C_4 نظیر ذرت کاربرد ندارد زیرا پاسخ این گیاهان به غلظت‌های بالای CO_2 به مراتب کمتر از گونه‌های C_3 می‌باشد. در این مطالعه براساس برآوردهای IPCC (Kenter *et al.*, 2006) مقدار ثابتی معادل ۱۰ درصد به سرعت فتوسنتز ذرت اضافه شد.

در مدل سوکروز افزایش دما علاوه بر تأثیر بر سرعت نمو، حداکثر سرعت فتوسنتز در اشباع نوری (A_m) را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. در شکل ۲ توابع مربوط به واکنش A_m به تغییرات دما برای چهار گونه تحت بررسی در این مطالعه نشان داده شده است.

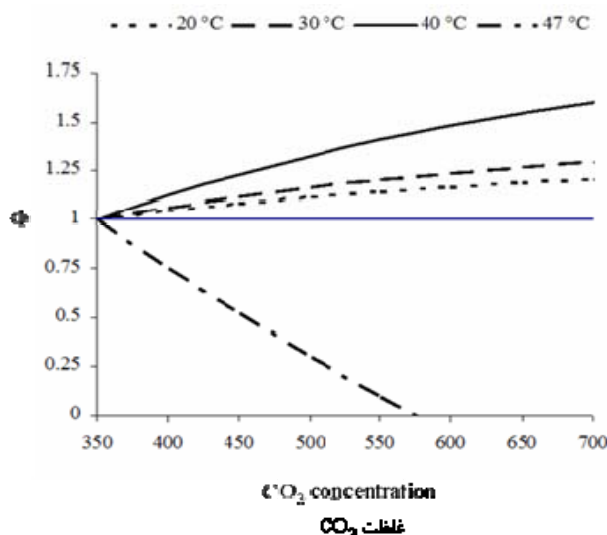
(Laar, 1993) ارائه شده است. لازم به ذکر است که نسخه اصلی مدل سوکروز برای شبیه‌سازی رشد گندم بهاره تهیه شده و در مورد گندم پاییزه لازم است تا دستورهای مربوط به بهاره شدن (ورنالیزاسیون) به آن اضافه شود که روش و معادلات مربوط به آن توسط کوچکی و نصیری (Koocheki and Nassiri, 2008) ارائه شده است. پارامترها و توابع لازم برای گندم، ذرت، نخود و چغندرقد از فایل داده‌های مربوط به محصولات زراعی در مدل WOFOST استخراج گردید. زیرا به دلیل تشابه ساختاری این داده‌ها در مدل SUCROS نیز قابل استفاده می‌باشند (van Ittersum *et al.*, 2003; Koocheki and Nassiri, 2008).

در مدل SUCROS سرعت فتوسنتز تک برگ توسط معادله ۱ توصیف شده است:

$$A = A_m (1 - \exp(-\varepsilon I_a / A_m)) \quad (1)$$

که در آن A سرعت فتوسنتز ناخالص (کیلوگرم CO_2 بر هکتار برگ بر هکتار زمین)، A_m حداکثر سرعت فتوسنتز در اشباع نوری (کیلوگرم CO_2 بر هکتار برگ بر هکتار زمین)، ε کارایی مصرف نور اولیه (کیلوگرم CO_2 بر هکتار سطح برگ بر هکتار زمین به‌ازای ژول در متر مربع در ثانیه) و I_a تابش جذب شده (ژول در متر مربع در ثانیه) می‌باشد.

محققین روش‌های مختلفی را برای توصیف واکنش گیاهان به CO_2 به کار برده‌اند که بسته به ساختار مدل موجب تصحیح فتوسنتز یا کارایی مصرف نور می‌شوند و انواع این روش‌ها توسط توبیئلو و اورت (Tubiello and Ewert, 2002) مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه برای توصیف تأثیر CO_2 بر فتوسنتز از روش ارائه شده توسط راینگا و همکاران (Reyenga *et al.*, 1999)



شکل ۱- مقادیر شبیه‌سازی شده Φ براساس معادلات ۲ و ۳ در غلظت ۳۵۰ تا ۷۰۰ ppm گاز کربنیک و تأثیر دما بر آن

Figure 1- Simulated values of Φ based on Equations 2 and 3 at CO_2 concentration of 350-700 ppm as affected by temperature

نتایج و بحث

سنجش اعتبار مدل

نتایج نشان داد که مدل سوکروز قابلیت مطلوبی در شبیه‌سازی عملکرد و مراحل نمو گیاهان تحت بررسی دارد. در شکل ۳ مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده عملکرد با هم مقایسه شده‌اند و مدل در مورد هر چهار گونه زراعی برآوردهای قابل قبولی داشت. مقایسه آماری بین پیش‌بینی مدل و مشاهدات (جدول ۱) نیز نشان داد که مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE%) برای عملکرد ذرت، گندم، نخود و چغندر قند به ترتیب ۵/۸، ۴/۸، ۹/۵ و ۵/۵ درصد بود که همگی کمتر از ۱۰ درصد و مطلوب می‌باشند. البته در پیش‌بینی مراحل نمو گونه‌ها قابلیت مدل کمتر بود ولی حداکثر مقدار RMSE% از ۱۲/۹ درصد تجاوز نکرد. به‌علاوه در مورد تمام متغیرهایی که تعیین اعتبار بر روی آنها انجام شد تفاوت معنی‌داری بین شب و عرض از مبدأ خط رگرسیون بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهدات و خط ۱:۱ مشاهده نشد (جدول ۱).

مدل سوکروز در مطالعات قبلی نیز جهت پیش‌بینی رشد و نمو عملکرد محصولات زراعی با نتایج مطلوبی به‌کار رفته است (Bannayan and Crout, 1999; Easterling, 2007) خودریان (Goudiraan and van Laar, 1993) و ولف (Wolf, 2002) مدل سوکروز را پس از تعیین اعتبار برای مطالعات تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای مورد استفاده قرار داده‌اند. کوچکی و نصیری (Koocheki and Nassiri, 2008) نیز توانایی مدل سوکروز را در پیش‌بینی عملکرد و مراحل فنولوژی گندم در ایران گزارش کرده‌اند.

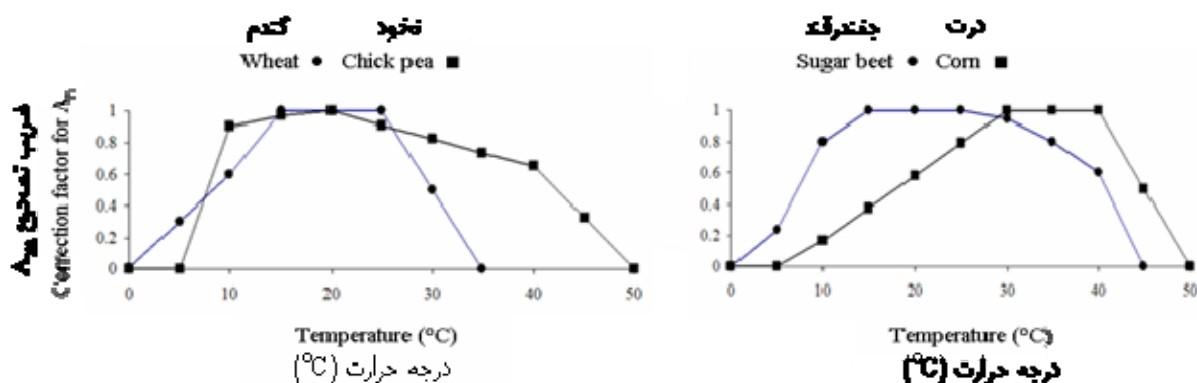
لازم به ذکر است که در مدل علاوه بر فتوسنتز، تنفس نیز طبق قاعده Q_{10} تابع دما بوده و در نتیجه نهایتاً فتوسنتز خالص کانوپی برای غلظت CO_2 و دما تصحیح می‌شود. برای اجرای مدل به داده‌های روزانه دما حداکثر و حداقل و نیز میزان تابش خورشیدی نیاز است که مقادیر آنها در شرایط فعلی و شرایط تغییر اقلیم برای مناطق مورد مطالعه محاسبه شد (Koocheki et al., 2015).

واسنجی و تعیین اعتبار مدل: مدل SUCROS پیش از به‌کارگیری در مطالعه تغییر اقلیم ابتدا واسنجی و سپس تعیین اعتبار شد. واسنجی عبارتست از تعیین پارامترها و ضرایب مدل تا حصول پیش‌بینی مطلوب از مراحل فنولوژی و عملکرد و سایر خصوصیات تحت بررسی. این عمل معمولاً با اجرای مدل، تصحیح پارامترها و ضرایب جهت اصلاح نتایج نادرست و تکرار آن تا دستیابی به نتیجه مطلوب انجام می‌شود بنابراین قبل از تعیین اعتبار مدل اجرای مرحله واسنجی آن ضروری است. همانگونه که ذکر شد پارامترها و ضرایب مدل از فایل داده‌های گیاهی مدل WOFOST برای گیاهان تحت بررسی استخراج شد البته برخی از این مقادیر در طی مرحله واسنجی تصحیح گردید. مدل پس از واسنجی براساس داده‌های حاصل از آزمایش‌هایی که در شرایط بهینه رشد هر محصول اجرا شده بود، تعیین اعتبار گردید.

قابلیت مدل در پیش‌بینی عملکرد و مراحل نمو گونه‌های زراعی تحت بررسی با محاسبه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی شد (معادله ۴):

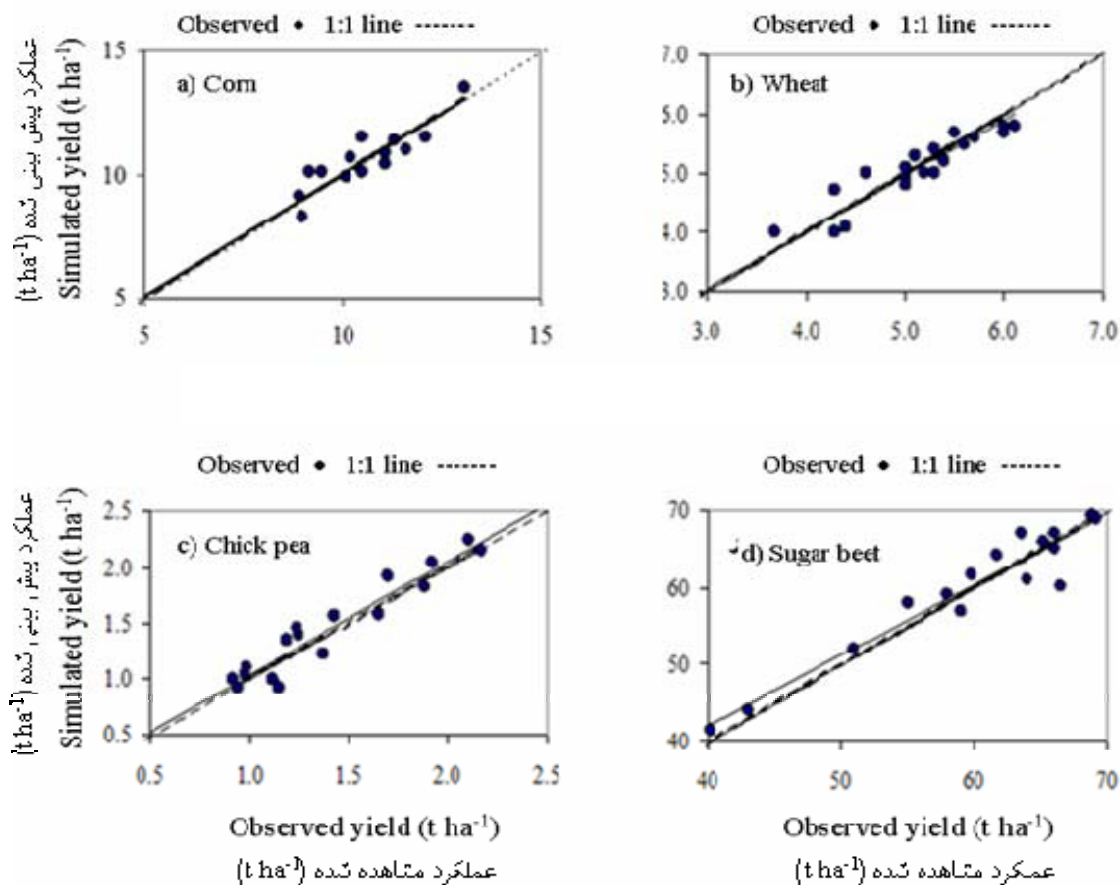
$$RMSE(\%) = \sqrt{\sum (O_i - P_i)^2 / n} \cdot \frac{100}{O} \quad (4)$$

که در آن O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده، n تعداد مشاهدات و \bar{O} میانگین مشاهدات می‌باشد.



شکل ۲- توابع تعریف شده در مدل سوکروز برای توصیف تأثیر دما بر سرعت فتوسنتز برگ، ضریب تصحیح در محور Y نسبت A_m در دمای بهینه به مقدار آن در دماهای مختلف می‌باشد

Figure 2- The function defined in SUCROS model for describing the effect of temperature on leaf assimilation rate, correction factor indicates the ratio of A_m at optimum temperature to its value at different temperatures



شکل ۳- رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و مقادیر پیش‌بینی شده عملکرد ذرت، گندم، نخود و چغندر قند به وسیله مدل سوکروز و مقایسه آن با خط ۱:۱

Figure 3- Comparison between observed and simulated yields of wheat, corn, chick pea and sugar beet. Regression and 1:1 lines are shown for each crop. Details of validation results are given in Table 1

به ترتیب در ذرت، گندم، نخود و چغندر قند به میزان ۳/۷، ۶/۹، ۴/۶ و ۷/۳ درصد خشی کرد که در میانگین معادل ۵/۶ درصد و در مقایسه با کاهش عملکرد ناشی از دما ناچیز می‌باشد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی (شکل ۴) به‌وضوح نشان می‌دهد که نقش مثبت CO_2 در ذرت (C_4) کمتر از گونه‌های C_3 است. اختلاف در واکنش گونه‌های C_3 و C_4 به افزایش غلظت CO_2 در مطالعات مختلف گزارش شده است. یانگ و همکاران (Yang et al., 2006) بیان داشتند که افزایش عملکرد ناشی از غلظت‌های بالای CO_2 کمتر از واکنش فتوسنتز بوده و برای گیاهان زراعی C_3 و C_4 به ترتیب بین ۱۰-۲۵ و ۰-۱۰ درصد می‌باشد.

تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد

به‌منظور تفکیک تأثیر افزایش دما و اثر مثبت افزایش غلظت CO_2 مدل سوکروز برای هر محصول دو مرتبه به اجرا درآمد. در اجرای نخست تنها افزایش دما برای سال هدف در مدل تعریف شد و در اجرای دوم تأثیر توأم دو عامل بر عملکرد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملکرد ۴ محصول تحت بررسی در هر دو شرایط کاهش خواهد یافت (شکل ۴) و به‌طور کلی بیشترین میزان کاهش عملکرد مربوط به چغندر قند و کمترین آن مربوط به نخود خواهد بود. به‌علاوه اثرات منفی دما به‌مراتب شدیدتر از نقش حاصلخیزکننده CO_2 می‌باشد. افزایش غلظت CO_2 تأثیر منفی دماهای بالا را

جدول ۱- نتایج تعیین اعتبار مدل سوکروز بر اساس مقادیر جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد آن (RMSE%) و نیز عرض از مبدأ (a)، شیب (b) و ضریب تبیین (r^2) خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده و پیش‌بینی شده

Table 1- Results of validation of SUCROS model based on the values of root mean square error (RMSE) and its percentage (RMSE%) together with intercept (a), slope (b) and coefficient of determination (r^2) for regression line between observed and simulated yields

	n	\bar{X}	RMSE	RMSE (%)	Regression coefficients		
					a	b	r^2
Corn							
عملکرد دانه Grain yield (t/ha)	14	9.8	0.57	5.8	0.18	0.98	0.96
روز تا رسیدگی Days to maturity	8	132	12.3	9.3	2.12	1.03	0.94
روز تا گلدهی Days to flowering	8	69	7.3	10.5	3.6	1.12	0.92
Wheat							
عملکرد دانه Grain yield (t/ha)	19	5.2	0.75	4.8	0.19	0.95	0.97
روز تا رسیدگی Days to maturity	12	276	26.9	9.7	3.11	0.91	0.94
روز تا گلدهی Days to flowering	12	219	23.6	10.7	4.15	1.18	0.90
Chick pea							
عملکرد دانه Grain yield (t/ha)	17	1.51	0.14	9.6	0.012	1.02	0.91
روز تا رسیدگی Days to maturity	9	118	13.2	11.2	3.12	1.15	0.90
روز تا گلدهی Days to flowering	9	73	9.4	12.9	4.11	1.21	0.85
Sugar beet							
عملکرد ریشه Tuber yield (t/ha)	18	59	3.27	5.5	5.58	0.91	0.92
روز تا رسیدگی Days to maturity	18	188	19	10.1	2.11	1.14	0.87

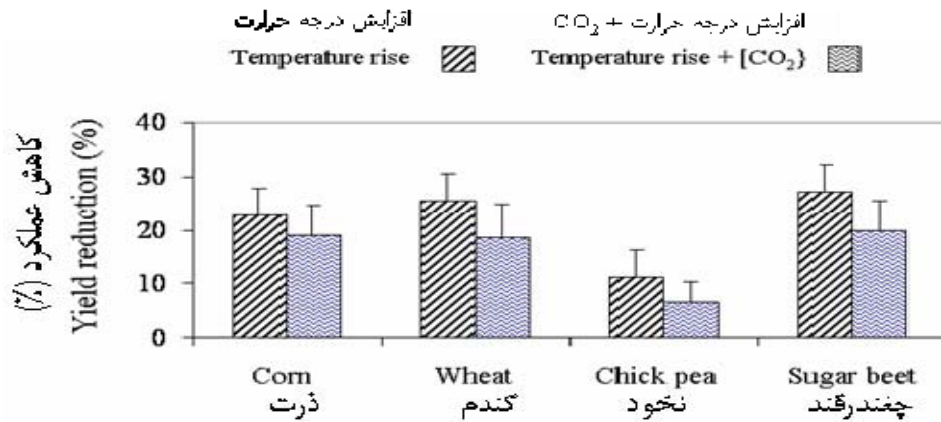
نتایج این محققین نشان داد که افزایش غلظت CO_2 تنها ۴ درصد از اثرات منفی افزایش دما و کاهش بارش را جبران خواهد کرد. نتایج مال و همکاران (Mall *et al.*, 2004) در مورد تأثیر تغییر اقلیم بر تولید سویا در هندوستان نیز حاکی از آن است که کاهش عملکرد ناشی از افزایش دما از طریق تأثیر مثبت CO_2 جبران نخواهد شد. لانگ و همکاران (Long *et al.*, 2006) براساس شواهد آزمایشی بیان داشتند که نقش حاصلخیزکننده CO_2 در تولید گیاهان به مراتب کمتر از مقداری است که انتظار می‌رود.

در شکل ۵ تغییرات عملکرد ۴ محصول زراعی تحت بررسی در این تحقیق در شرایط اقلیمی سال ۲۰۵۰ میلادی در مناطق اصلی کشت این گیاهان در کشور که براساس آمار سطح زیر کشت و میزان تولید آنها تعیین شده (Ministry of Jihad e Agriculture, 2011) ارائه شده است. نتایج ارائه شده در نقشه‌های پیش‌بینی (شکل ۵)

اورت و همکاران (Ewert *et al.*, 2002) براساس نتایج مدل‌های شبیه‌سازی اظهار داشتند افزایش دما و کاهش رطوبت خاک اگرچه عملکرد گیاهان زراعی را تا سال ۲۰۵۰ میلادی کاهش خواهد داد ولی غنی‌سازی ناشی از افزایش غلظت گاز کربنیک این اثرات را تا حد زیادی جبران خواهد کرد. به نظر می‌رسد که این اثرات منطقه‌ای بوده و در مناطق معتدله شمالی افزایش دمای تابستان و بهار به دلیل طولانی‌تر کردن فصل رشد در ترکیب با غلظت CO_2 یک مزیت محسوب شود ولی در آب و هوای نیمه خشک افزایش دمای این فصول بسیار نامطلوب بوده و بروز تنش گرما و خشکی تولید را محدود خواهد کرد (Rosenzweig and Tubiello, 1997). فولکو و سنتولد (Fulco and Senthold, 2006) براساس سناریوی افزایش شدید غلظت CO_2 پیش‌بینی کردند که تا سال ۲۰۷۰ میلادی عملکرد گندم در بخش‌هایی از استرالیا تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

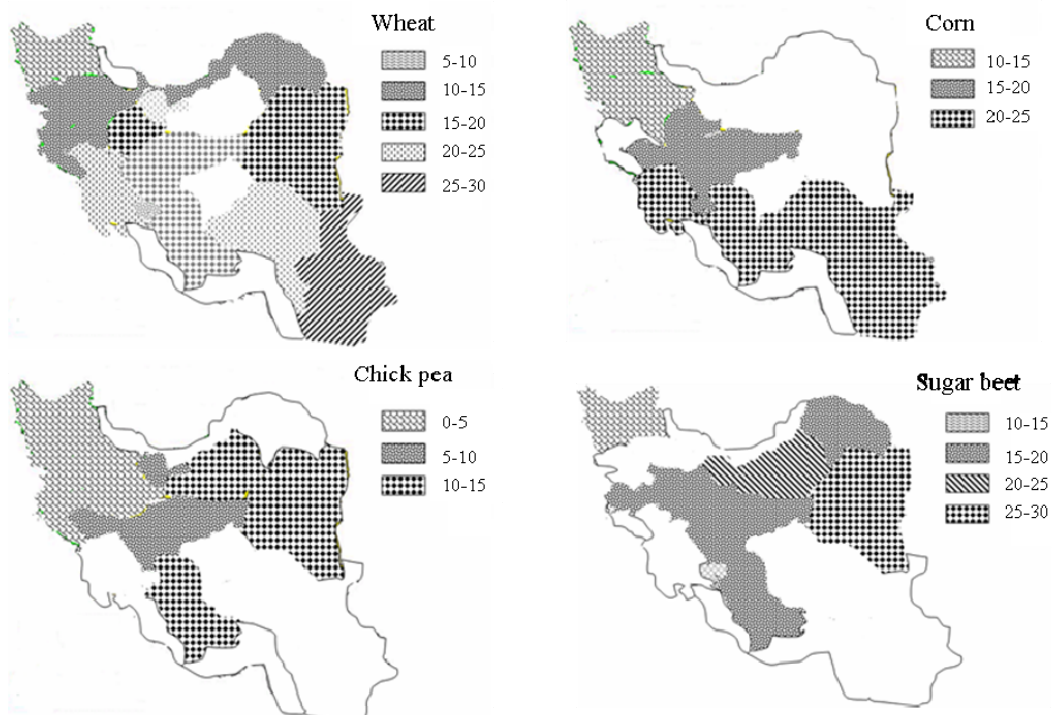
عملکرد گندم ۳۰-۵ درصد، ذرت ۲۵-۱۰ درصد، نخود ۱۵-۰ درصد و چندرگند ۳۰-۱۰ درصد کاهش می‌یابد.

نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۵۰ میلادی و براساس سناریوی AIF (تداوم وضع فعلی و انتشار زیاد CO₂) مجمع بین‌الدول تغییر اقلیم،



شکل ۴- پیش‌بینی میزان کاهش عملکرد ۴ محصول زراعی برای سال ۲۰۵۰ میلادی نسبت به عملکرد فعلی، جهت برآورد عملکرد هر محصول مدل سوکروز یک بار تنها با اثر گرمایش و یک بار با اثر توأم افزایش دما و غلظت CO₂ اجرا شده است. خطوط عمودی انحراف معیار مربوط به مناطق مختلف کشور می‌باشند

Figure 4- Predicted yield reduction in the studied crops for the year 2050 compared to current yields, yield are predicted using SUCROS model under temperature rise and temperature rise + increased CO₂ concentration. Vertical bars show SE of gions



شکل ۵- پیش‌بینی میزان کاهش عملکرد (%) در سال ۲۰۵۰ میلادی نسبت به شرایط فعلی برای ۴ محصول زراعی در مناطق اصلی کشت آنها در کشور

Figure 5- Predicted yield reduction (%) for year 2050 compared to current conditions for wheat, corn, chick pea and sugar beet in main cropping regions across the country

عملکرد و موقعیت جغرافیایی محل مطالعه می‌باشد، کاهش عملکرد محصولات زراعی در مناطق گرم و خشک جهان نقطه مشترک همه مطالعات است. البته پیش‌بینی‌هایی نیز در مورد افزایش عملکرد در شرایط تغییر اقلیم وجود دارد که عمدتاً مربوط به کانادا، شمال آمریکا و اروپای شمالی می‌باشند (Ewert *et al.*, 2002) یعنی مناطقی که در شرایط فعلی دماهای پایین محدودکننده رشد محصولات زراعی است.

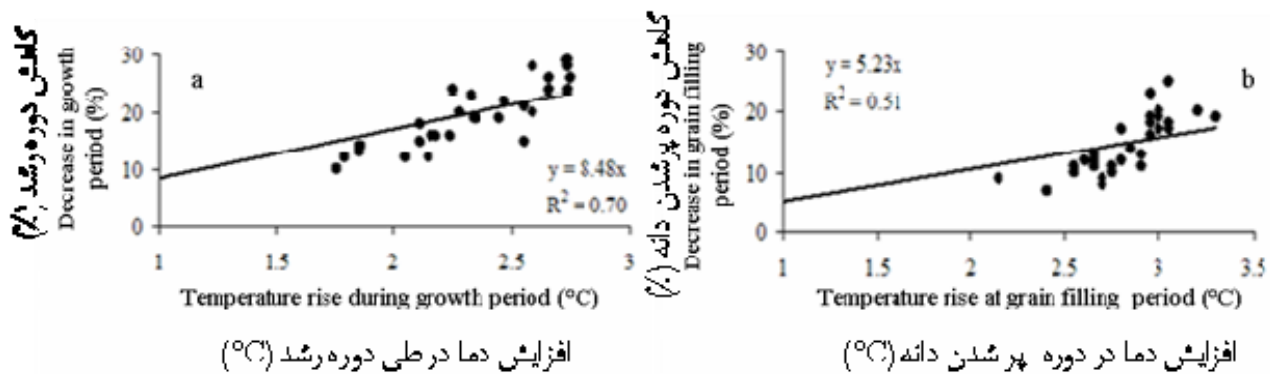
توزیع کاهش عملکرد ۴ محصول تحت بررسی در این تحقیق در سطح کشور (شکل ۵) تا حد زیادی با الگوی مکانی افزایش دما در سال هدف که توسط کوچکی و همکاران (Koocheki *et al.*, 2015) توصیف شده انطباق دارد به طوری که شدت کاهش عملکرد از غرب به شرق و از شمال به جنوب کشور افزایش می‌یابد. بنابراین به نظر می‌رسد که افزایش دما مهمترین عامل مؤثر بر کاهش عملکرد محصولات زراعی در کشور است.

تغییر اقلیم و طول مراحل نمو

افزایش دما ناشی از گرمایش جهانی باعث کوتاه‌تر شدن طول دوره رشد در هر ۴ گونه تحت بررسی در این تحقیق شد، البته شدت تأثیر بین گونه‌ها متفاوت بود. براساس پیش‌بینی‌های انجام شده به وسیله مدل گردش عمومی GFDL (Koocheki *et al.*, 2015) تا سال ۲۰۵۰ میلادی میانگین افزایش دما در طی دوره رشد گندم (کاشت تا رسیدگی) در مناطق تحت بررسی $2/3^{\circ}\text{C}$ در بازه‌ای بین $1/8^{\circ}\text{C}$ تا $2/8^{\circ}\text{C}$ خواهد بود و برآورد میانگین افزایش دما برای مرحله گلدهی گندم $2/6^{\circ}\text{C}$ (۲ تا $3/1^{\circ}\text{C}$) و برای مرحله پر شدن دانه $2/8^{\circ}\text{C}$ ($2/2^{\circ}\text{C}$ تا $3/3^{\circ}\text{C}$) می‌باشد.

این افزایش دما باعث خواهد شد تا در سال هدف در مناطق مختلف کشور کل دوره رشد گندم به طور متوسط $19/4$ درصد و دوره پر شدن دانه $14/3$ درصد کاهش یابد. البته دامنه این تغییرات بسیار وسیع بوده و برای مثال در مورد کل دوره رشد گندم بین ۱۰ تا ۲۹ درصد برآورد شد. بررسی رابطه بین افزایش دما و طول کل دوره رشد نشان داد که در گندم به‌ازای هر 1°C افزایش در میانگین دمای دوره رشد، طول این دوره در حدود $8/5$ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۶-a). با توجه به تفاوت بین تعداد روزهای کاشت تا رسیدگی در مناطق مختلف، این کاهش در حدود ۱۹ روز به‌ازای هر 1°C افزایش دما در طی دوره رشد خواهد بود. طول دوره پر شدن دانه نیز با افزایش دما کاهش می‌یابد که مقدار آن $6/5$ درصد یا تقریباً ۴ روز به‌ازای هر 1°C افزایش دما در طی دوره پر شدن دانه است (شکل ۶-b).

شواهد متعدد نشان داده است که تا سال ۲۰۳۰ میلادی عملکرد محصولات زراعی در مقیاس جهانی به دلیل پی‌آمدهای تغییر اقلیم بین ۵ تا ۱۰ درصد کاهش خواهد یافت و این کاهش در مورد گندم، ذرت و برنج به دلیل حساسیت آنها بیشتر است (Kang *et al.*, 2003). پیش‌بینی‌های اردا و همکاران (Erda *et al.*, 2005) نیز نشان داده است که در طی ۲۰ تا ۸۰ سال آینده تغییر اقلیم با احتساب اثرات مثبت افزایش CO_2 ، عملکرد گندم، برنج و ذرت را در مقیاس جهانی تا ۳۷ درصد کاهش خواهد داد. مطالعات انجام شده در مقیاس منطقه‌ای نیز اغلب حاکی از کاهش عملکرد محصولات زراعی در کشورهای مختلف است. کوچکی و نصیری (Koocheki and Nassiri, 2008) با شبیه‌سازی عملکرد گندم به وسیله مدل سوکروز میزان کاهش عملکرد در سال ۲۰۵۰ را براساس سناریوی انتشار متوسط IPCC، بین ۱۳ تا ۲۸ درصد در مناطق مختلف کشور گزارش کردند. تفاوت عمده تحقیق قبلی با مطالعه حاضر سناریوهای اقلیمی و روش توصیف واکنش فتوسنتز به افزایش غلظت CO_2 می‌باشد. لازم به ذکر است که کاهش عملکرد گندم در کشور در سال ۲۰۵۰ در حدود ۳۵ درصد برآورد شده (Koocheki *et al.*, 2015) که به مراتب بیشتر از گندم آبی می‌باشد. توبیئلو و همکاران (Tubiello *et al.*, 2000) در مطالعه‌ای که به وسیله مدل CROPSYT بر روی برخی گیاهان زراعی در ایتالیا انجام شد پیش‌بینی کردند که با دو برابر شدن غلظت CO_2 ، افزایش دما به میزان ۴ درجه سانتی‌گراد و ۱۰ درصد افزایش بارش عملکرد گندم، ذرت، سویا، جو و سورگوم در این کشور به ترتیب ۲۰، ۲۵، ۳۵، ۳۰ و ۵۰ درصد کاهش خواهد یافت. تائو و همکاران (Tao *et al.*, 2009) کاهش عملکرد ذرت در استان هنان چین را برای سال‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ میلادی به ترتیب معادل $9/7$ ، $15/7$ و $24/7$ درصد پیش‌بینی کرده‌اند. انور و همکاران (Anwar *et al.*, 2007) با شبیه‌سازی عملکرد گندم در جنوب غربی استرالیا نشان دادند که براساس دو سناریوی زیاد و متوسط انتشار CO_2 عملکرد گندم در سال ۲۰۷۰ میلادی بیش از ۲۹ درصد کاهش می‌یابد. ژیونگ و همکاران (Xiong *et al.*, 2007) نیز با استفاده از مدل CERES-MAIZE و براساس دو سناریوی تغییر اقلیم کاهش عملکرد ذرت در شمال چین را تا نیمه قرن حاضر حدود ۲۵ درصد برآورد کردند. نتایج ارائه شده توسط ازدوقان (Özdoğan, 2011) که براساس سناریوهای مختلف تغییر اقلیم انجام شده نیز حاکی از آن است که عملکرد گندم در شمال غربی کشور ترکیه تا نیمه قرن حاضر بین ۵ تا ۳۰ درصد کاهش خواهد یافت. علی‌رغم تفاوت‌های موجود بین پیش‌بینی‌ها که ناشی از عوامل مختلف از جمله سناریوی تغییر اقلیم، مدل شبیه‌سازی استفاده شده برای پیش‌بینی



شکل ۶- رابطه بین افزایش دما در کل دوره رشد (a) و در مرحله پر شدن دانه (b) با طول مراحل رشد در گندم. داده‌ها مربوط به مناطق مختلف کشت گندم در کشور می‌باشند، میزان افزایش دما در هر ایستگاه نتیجه پیش‌بینی مدل گردش عمومی برای سال ۲۰۵۰ میلادی می‌باشد و طول مراحل رشد در سال هدف و در هر منطقه به‌وسیله مدل سوکروز برآورد شده است

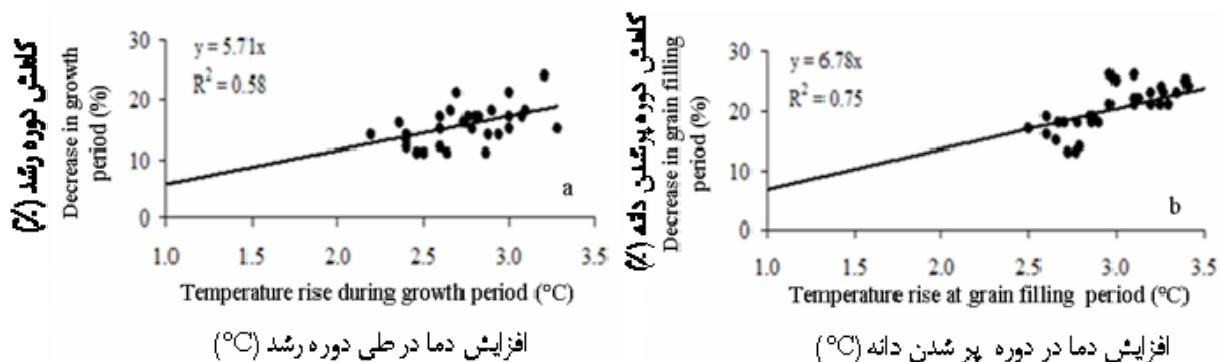
Figure 6- Relation between temperature rise during the whole growth period (a) and in grain filling period (b) and length of growth stages in wheat. Data points obtained for different regions across the country, change in temperature is predicted by GCM for year 2050 and length of growth stages for the target year is estimated by SURCOS model

میلادی در مناطق مختلف کشور بین ۱/۲ تا ۲/۴°C و میانگین آن در حدود ۱/۸°C پیش‌بینی شد. این افزایش دما باعث خواهد شد میانگین طول دوره کاشت تا رسیدگی نخود در حدود ۱۴ درصد کاهش یابد که معادل ۷ درصد (تقریباً ۶ روز) به‌ازای هر ۱°C افزایش دما می‌باشد (شکل ۸).

در مورد چغندر قند نیز افزایش میانگین دما در طی کل فصل رشد برای سال هدف ۲/۸°C پیش‌بینی شد که باعث کاهش معادل ۱۵ درصد در طول دوره کاشت تا رسیدگی این گیاه می‌شود. رابطه رگرسیون بین این دو متغیر (شکل ۸) نشان داد که با هر ۱°C افزایش دما در طی دوره رشد، طول این دوره ۴ درصد (معادل ۹ روز) کوتاه‌تر خواهد شد.

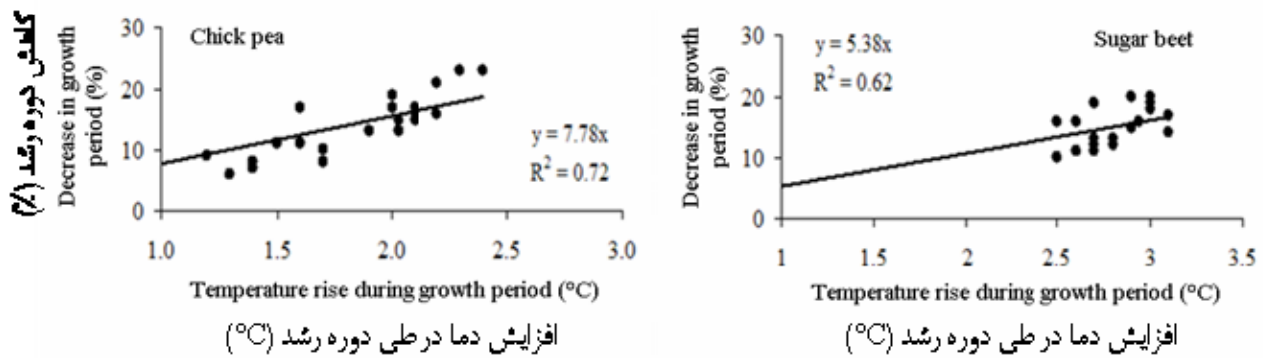
میانگین افزایش دما سال هدف در طی کل دوره رشد (کاشت تا رسیدگی) ذرت به ۲/۸°C در بازه ۲/۲-۳/۳°C خواهد رسید. این افزایش دما باعث خواهد شد که در این گیاه میانگین طول دوره رشد ۱۵/۷ درصد و طول دوره پر شدن دانه تا ۱۸ درصد کاهش یابد. ارزیابی رابطه بین دو متغیر نشان داد هر ۱°C افزایش میانگین دما در طی دوره رشد، باعث ۵/۷ کاهش در طول دوره کاشت تا رسیدگی ذرت می‌شود (شکل ۷-ا) که تقریباً معادل ۸/۵ روز به‌ازای هر ۱°C افزایش دما می‌باشد. به‌علاوه طول دوره پر شدن دانه در ذرت نیز در واکنش به افزایش دما کاهش می‌یابد و میزان آن با هر ۱°C افزایش دما در طی دوره پر شدن دانه در حدود ۶/۳ درصد برآورد شد (شکل ۷-ب).

دامنه افزایش دما در طی کل دوره رشد نخود برای سال ۲۰۵۰



شکل ۷- رابطه بین افزایش دما در کل دوره رشد (a) و در مرحله پر شدن دانه (b) با طول مراحل رشد در ذرت. داده‌ها مربوط به مناطق مختلف کشت ذرت در کشور می‌باشند، میزان افزایش دما در هر ایستگاه نتیجه پیش‌بینی مدل گردش عمومی برای سال ۲۰۵۰ میلادی می‌باشد و طول مراحل رشد در سال هدف و در هر منطقه به‌وسیله مدل سوکروز برآورد شده است

Figure 7- Relation between temperature rise during the whole growth period (a) and in grain filling period (b) and length of growth stages in corn. Data points obtained for different regions across the country, change in temperature is predicted by GCM for year 2050 and length of growth stages for the target year is estimated by SURCOS model



شکل ۸- رابطه بین افزایش دما و طول مراحل رشد در نخود و چغندر قند. داده‌ها مربوط به مناطق مختلف کشت این محصولات در کشور می‌باشند، میزان افزایش دما در هر ایستگاه نتیجه پیش‌بینی مدل گردش عمومی برای سال ۲۰۵۰ میلادی می‌باشد و طول مراحل رشد در سال هدف و در هر منطقه به وسیله مدل سوکروز برآورد شده است

Figure 8- Relation between temperature rise and length of growth stages in chick pea and sugar beet. Dtat points obtained for different regions across the country, change in temperature is predicted by GCM for year 2050 and length of growth stages for the target year is estimated by SURCOS model

تأثیر افزایش دما بر عملکرد

نتایج نشان داد که در هر چهار محصول تحت بررسی با افزایش دما عملکرد کاهش یافت. در گندم افزایش میانگین دما در طی کل دوره رشد تا 1°C تأثیری بر عملکرد نداشت ولی در بالاتر از این دما، عملکرد دانه به میزان $14/5$ درصد به‌ازای هر 1°C افزایش دما کاهش خواهد یافت (شکل ۹-ا). تأثیر افزایش دما بر عملکرد در مراحل گلدهی و پر شدن دانه شدیدتر است و براساس نتایج این تحقیق در سال هدف هر 1°C افزایش میانگین دما در طی این دو مرحله، عملکرد دانه را به‌ترتیب $16/2$ و $19/8$ درصد کاهش خواهد داد (شکل ۹-ب و ۹-ج).

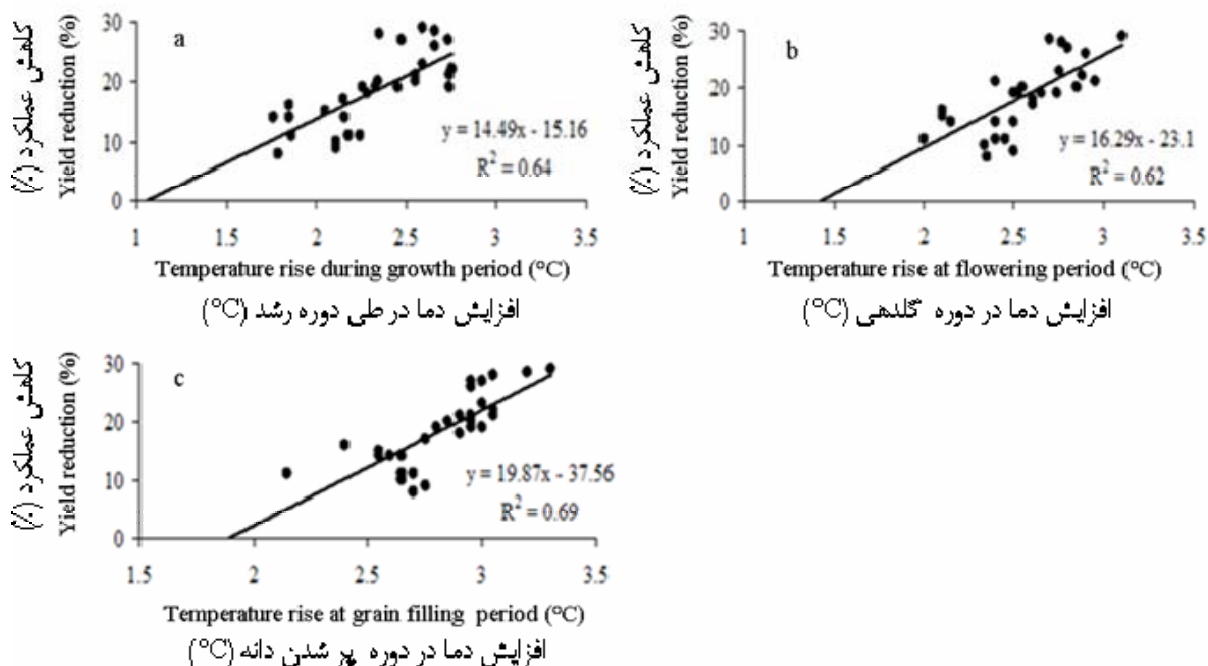
ضرایب معادلات رگرسیون نشان می‌دهد که کاهش عملکرد در مرحله گلدهی از دمای بالاتر از $1/5^{\circ}\text{C}$ و در مرحله پر شدن دانه از دمای بیشتر از $1/8^{\circ}\text{C}$ آغاز خواهد شد.

افزایش دما در طی کل دوره رشد تا دمای $1/6^{\circ}\text{C}$ و در طی دوره پر شدن دانه تا $1/7^{\circ}\text{C}$ تأثیری بر عملکرد ذرت نداشت ولی نتایج نشان داد که چنانچه میانگین دمای دوره کاشت تا رسیدگی و مرحله پر شدن دانه از مقادیر فوق بالاتر برود عملکرد به‌ترتیب $16/8$ و $14/8$ درصد به‌ازای هر 1°C افزایش دما کاهش می‌یابد (شکل ۱۰-ا و ۱۰-ب).

عملکرد نخود تا $1/1^{\circ}\text{C}$ و چغندر قند تا $1/6^{\circ}\text{C}$ افزایش میانگین دما در کل دوره رشد تغییر چشمگیری نداشت ولی به‌ازای هر 1°C افزایش دما به بالاتر از این مقادیر، عملکرد نخود $8/9$ و عملکرد چغندر قند $15/8$ درصد کاهش یافت (شکل ۱۱).

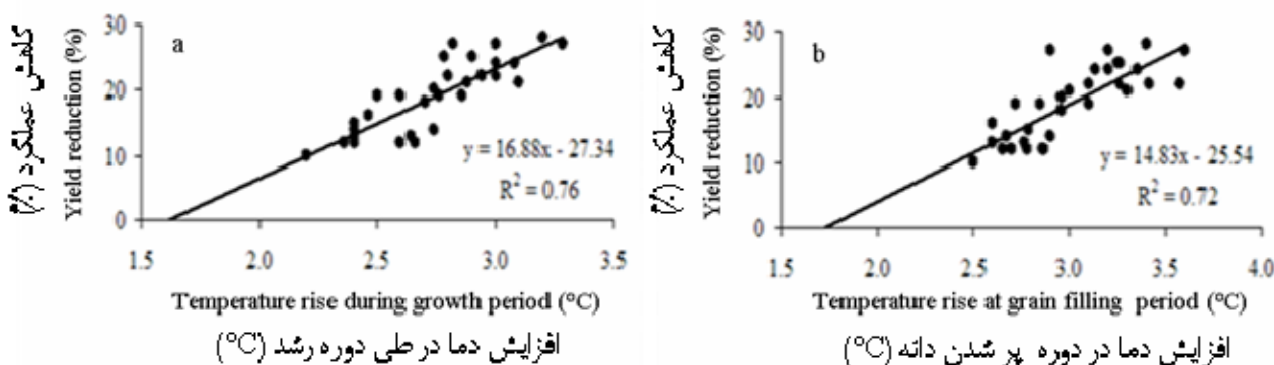
از آنجا که تاکنون شواهدی قطعی مبنی بر تأثیر مستقیم افزایش غلظت CO_2 بر تسریع مراحل فنولوژی گیاهان در اختیار نمی‌باشد (Craufurd and Wheeler, 2009) به‌نظر می‌رسد که تغییر طول مراحل رسیدگی که در این مطالعه نیز مشهود می‌باشد عمدتاً تابع افزایش دما است. ضرایب تبیین ارائه شده در شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ نشان می‌دهد که ۶۰ تا ۷۰ درصد از تغییرات پیش‌بینی شده در طول دوره رشد گیاهان تحت بررسی توسط دما در طی دوره رشد کنترل می‌شود.

نتایج بسیاری از تحقیقات نشان داده است که در شرایط تغییر اقلیم مراحل نمو بسیاری از گیاهان زراعی کوتاه‌تر خواهد شد که البته میزان آن به گونه گیاهی و شدت تغییرات اقلیمی بستگی دارد. ژیاو و همکاران (Xiao et al., 2008) نشان دادند که در طی چند دهه اخیر طول کل دوره رشد گندم بهاره در مناطق نیمه خشک چین به‌ازای هر 1 درجه سانتی‌گراد افزایش دما بین 8 تا 10 روز کوتاه‌تر شده است. پیش‌بینی‌های یو و همکاران (You et al., 2009) نشان داده است که در بخش عمده‌ای از چین طول دوره رشد گندم تا پایان قرن حاضر به دلیل افزایش دما بین 20 تا 30 روز کاهش خواهد یافت. سادراس و مونزون (Sadras and Monzon, 2006) با بررسی رابطه بین عملکرد گندم و تغییرات دما در طی یک دوره 30 ساله ($1971-2000$) در استرالیا و آرژانتین نشان دادند که به‌ازای هر 1 درجه سانتی‌گراد افزایش میانگین دما طول دوره رسیدگی گندم 7 روز کاهش می‌یابد که عمدتاً به‌دلیل کاهش طول دوره سبز شدن تا گلدهی بوده و فاصله گلدهی تا رسیدگی تقریباً بدون تغییر مانده است. تائو و همکاران (Tao et al., 2009) نیز کوتاه‌تر شدن طول دوره رشد ذرت در جنوب چین را برای سال‌های 2020 ، 2050 و 2080 میلادی به‌ترتیب 14 ، 25 و 35 درصد پیش‌بینی کرده‌اند.



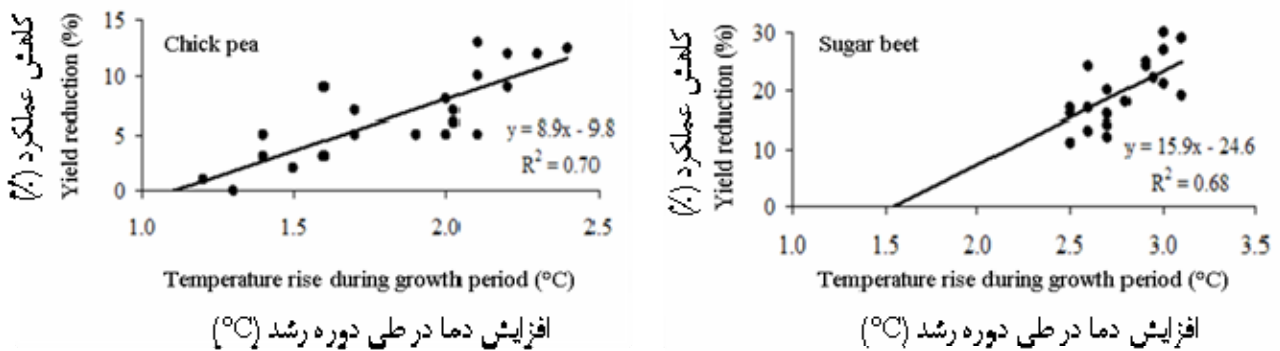
شکل ۹- رابطه بین افزایش دما در کل دوره رشد (a)، مرحله گلدهی (b) و پر شدن دانه (c) با میزان کاهش عملکرد در گندم. داده‌ها مربوط به مناطق مختلف کشت گندم در کشور می‌باشند، میزان افزایش دما در هر ایستگاه نتیجه پیش‌بینی مدل گردش عمومی برای سال ۲۰۵۰ میلادی می‌باشد و کاهش عملکرد در سال هدف و در هر منطقه به‌وسیله مدل سوکروز برآورد شده است

Figure 9- Relation between temperature rise during the whole growth period (a), flowering stage (b) and in grain filling period (c) and yield reduction in wheat. Dtat points obtained for different regions across the country, change in temperature is predicted by GCM for year 2050 and yield reduction for the target year is estimated by SURCOS model



شکل ۱۰- رابطه بین افزایش دما در کل دوره رشد (a) و در مرحله پر شدن دانه (b) با میزان کاهش عملکرد در ذرت. داده‌ها مربوط به مناطق مختلف کشت ذرت در کشور می‌باشند، میزان افزایش دما در هر ایستگاه نتیجه پیش‌بینی مدل گردش عمومی برای سال ۲۰۵۰ میلادی می‌باشد و کاهش عملکرد در سال هدف و در هر منطقه به‌وسیله مدل سوکروز برآورد شده است

Figure 10- Relation between temperature rise during the whole growth period (a) and during the grain filling period (b) and yield reduction in corn. Dtat points obtained for different regions across the country, change in temperature is predicted by GCM for year 2050 and yield reduction for the target year is estimated by SURCOS model



شکل ۱۱- رابطه بین افزایش دما و میزان کاهش عملکرد در نخود و چغندر قند. داده‌ها مربوط به مناطق مختلف کشت این دو محصول در کشور می‌باشند، میزان افزایش دما در هر ایستگاه نتیجه پیش‌بینی مدل گردش عمومی برای سال ۲۰۵۰ میلادی می‌باشد و کاهش عملکرد در سال هدف و در هر منطقه به وسیله مدل سوکروز برآورد شده است

Figure 11- Relation between temperature rise and yield reduction for chick pea and sugar beet. Dtat points obtained for different regions across the country, change in temperature is predicted by GCM for year 2050 and yield reduction for the target year is estimated by SURCOS model

تأثیر طول مراحل رشد بر عملکرد

نتایج ارائه شده در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ تأثیر افزایش دما بر کاهش دوره رشد محصولات زراعی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت، شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ نیز نشان داد که افزایش دما ناشی از تغییر اقلیم چگونه بر عملکرد تأثیر خواهد گذاشت. بر این اساس به نظر می‌رسد که کاهش عملکرد پیش‌بینی شده برای سال هدف تا حد زیادی به دلیل کاهش طول مراحل رشد این گیاهان باشد. بررسی این روابط نشان داد که در گندم به‌ازای هر یک درصد کاهش در طول دوره کاشت تا رسیدگی عملکرد دانه ۰/۹۴ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۱۲-ا) در حالی که یک درصد کاهش در طول دوره پر شدن دانه عملکرد را ۱/۲ درصد کاهش می‌دهد (شکل ۱۲-ب).

در ذرت رابطه رگرسیونی بین کاهش کل دوره رشد و عملکرد معنی‌دار نبود ولی کاهش عملکرد به‌طور معنی‌داری از کاهش طول دوره پر شدن دانه تبعیت داشت. نتایج نشان داد که تا سال هدف به‌ازای هر یک درصد کاهش طول دوره پر شدن دانه عملکرد ذرت در حدود ۰/۹۳ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۱۲-ج). در مورد نخود و چغندر قند نیز رابطه معنی‌داری بین کاهش عملکرد و کاهش کل دوره رشد (کاشت تا رسیدگی) به‌دست آمد. نتایج نشان داد که تا سال ۲۰۵۰ میلادی با هر ۱ درصد کاهش طول دوره رشد، عملکرد نخود و چغندر قند به‌ترتیب ۰/۴۸ و ۱/۳ درصد کاهش خواهد یافت (شکل ۱۲-د و e).

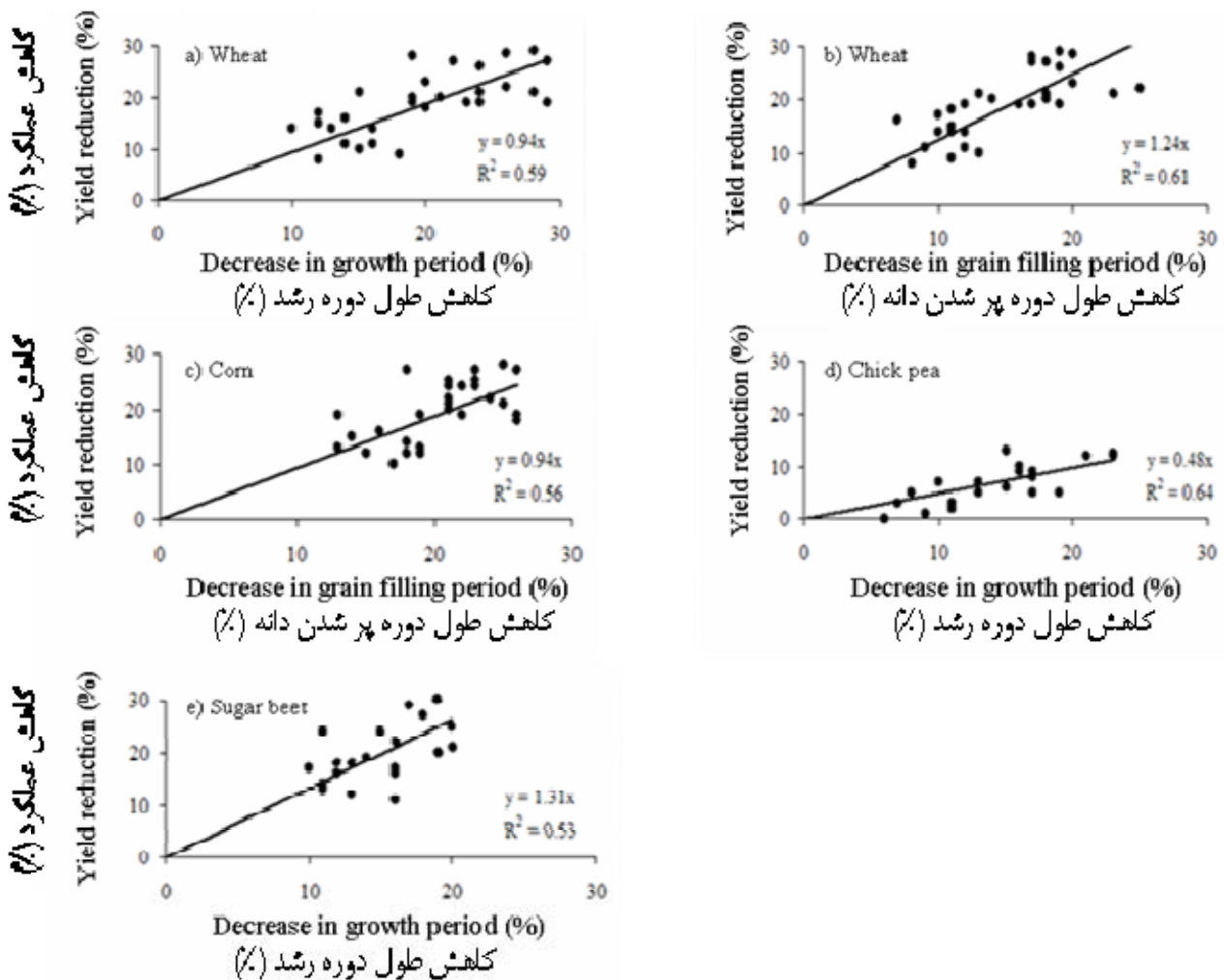
یافته‌های این تحقیق حاکی از آن است که در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد از کاهش عملکرد محصولات زراعی در شرایط اقلیمی سال ۲۰۵۰ به دلیل کوتاه‌تر شدن طول کل دوره رسیدگی و طول دوره پر

این نتایج نشان می‌دهد که در حدود ۷۰ درصد از کاهش عملکرد پیش‌بینی شده برای محصولات تحت بررسی به دلیل افزایش دما در طول دوره رشد و نیز مراحل حساس نمو می‌باشد به‌علاوه بسته به مرحله نمو و گونه گیاهی با افزایش میانگین دما به میزان ۲-۱ درجه سانتی‌گراد کاهش عملکرد آغاز خواهد شد. کوچکی و نصیری (Koocheki and Nassiri, 2008) نیز کاهش عملکرد گندم را با افزایش دما به میزان دو درجه سانتی‌گراد یا بیشتر در مرحله گلدهی پیش‌بینی کرده‌اند. رابطه افزایش دما ناشی از گرمایش جهانی و کاهش عملکرد گیاهان زراعی در سایر مطالعات نیز گزارش شده است. لوبل و آسنر (Lobel and Asner, 2000) نشان دادند که عملکرد ذرت و سویا (*Glycine max*) در آمریکا به‌ازای هر یک درجه سانتی‌گراد افزایش میانگین دما در طی فصل رشد ۱۷٪ کاهش می‌یابد. پنگ و همکاران (Peng et al., 2004) کاهش عملکرد برنج در فیلیپین را در حدود ۱۰ درصد به‌ازای هر یک درجه سانتی‌گراد افزایش دما گزارش کردند و برآورد یو و همکاران (You et al., 2009) از کاهش عملکرد گندم در چین ۳ تا ۱۰ درصد به‌ازای هر یک درجه سانتی‌گراد افزایش دما بوده است.

باید توجه داشت که تأثیر افزایش دما بر عملکرد تا حد زیادی به منطقه تحت بررسی بستگی دارد. برای مثال نتایج استرلینگ و همکاران (Easterling, 2007) و توییلو و همکاران (Tubiello et al., 2007) حاکی از آن است که در مناطق معتدله افزایش دما بین ۲-۳ درجه سانتی‌گراد اثرات مثبتی بر تولید محصولات زراعی دارد و کاهش عملکرد در دماهای بالاتر آغاز خواهد شد؛ در حالی که اورتیز و همکاران (Ortiz et al., 2008) افزایش دما به بالاتر از ۲-۱ درجه سانتی‌گراد را در مناطق گرم و خشک آستانه بروز اثرات منفی گزارش کرده‌اند.

فرصت کمتر برای توسعه کانوبی و تجمع ماده خشک می‌باشد (Luo et al., 2009).

شدن دانه در گندم می‌باشد. بنابراین مهمترین نقش افزایش دما کاهش طول دوره رشد و در نتیجه جذب کمتر تابش خورشیدی و



شکل ۱۲- رابطه بین کاهش طول دوره رشد و کاهش عملکرد در گندم (a و b)، ذرت (c)، نخود (d) و چغندر قند (e). داده‌ها پیش‌بینی مدل سوکروز در مناطق مختلف کشت این محصولات برای سال ۲۰۵۰ میلادی می‌باشند

Figure 12- Relation between reduction of the length of growth period and yield of wheat (a and b), corn (c), chick pea (d) and sugar beet (e). Data points are simulated using SUCROS model for year 2050 at different regions

که افزایش دما در مراحل حساس نمو و کوتاه شدن دوره رشد اثرات مثبت غلظت‌های بالای CO_2 را خنثی کرده و حتی در صورت افزایش بارش نیز عملکرد ذرت کاهش خواهد یافت. بنابراین به نظر می‌رسد که در شرایط افزایش غلظت CO_2 حساسیت گیاه به افزایش دما بیش از کاهش بارش است. تاو و همکاران (Tao et al., 2009) نیز کاهش عملکرد ذرت در چین را به میزان ۱۵ درصد تا سال ۲۰۵۰ پیش‌بینی کرده و نشان دادند که الگوی تغییر طول دوره رشد با الگوی مکانی کاهش عملکرد انطباق دارد و به‌طور کلی ۲۵ تا ۳۵ درصد کاهش طول دوره رشد عملکرد ذرت را به ترتیب ۱۵/۷ و ۲۴/۷

ژبائو و همکاران (Xiao et al., 2008) گزارش دادند که در طی سه دهه اخیر عملکرد گندم بهاره در مناطق نیمه خشک چین بیش از ۱۶ درصد کاهش یافته که عامل اصلی آن کوتاه‌تر شدن طول دوره رشد می‌باشد. در استرالیا نیز پیش‌بینی شده که افزایش دما ناشی از تغییر اقلیم باعث کوتاه‌تر شدن کل دوره رشد گندم (کاشت تا رسیدگی) و در نتیجه کاهش تجمع ماده خشک خواهد شد (Fulco and Senthold, 2006). آبراه و ساویج (Abraha and Savage, 2006) با شبیه‌سازی عملکرد ذرت در آفریقای شمالی براساس سناریوهای مختلف افزایش غلظت CO_2 و تغییر دما و بارش نشان داد

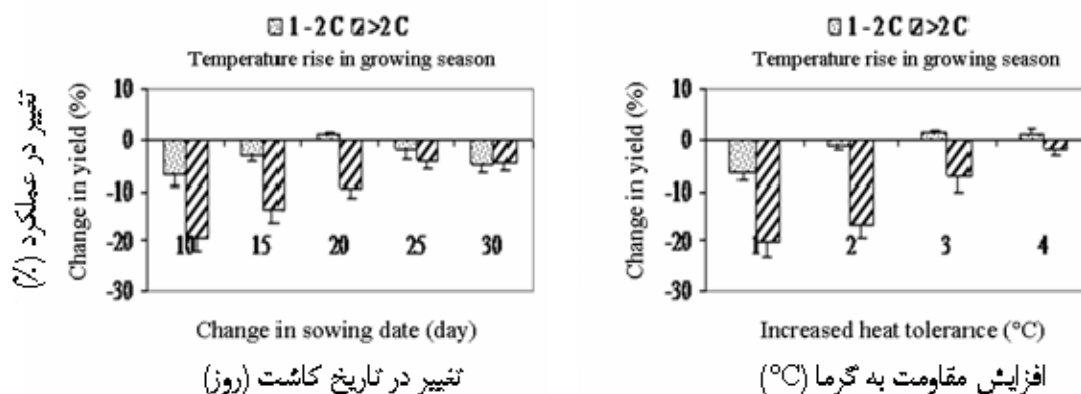
درصد کاهش خواهد داد.

البته باید توجه داشت که افزایش دما اثرات منفی دیگری از جمله افزایش تنفس نگهداری، افزایش تبخیر و تعرق و کاهش کارایی مصرف نور را نیز به همراه دارد که به نوبه خود موجب کاهش عملکرد محصولات زراعی خواهند شد (Remy *et al.*, 2003; Asseng *et al.*, 2004).

راهکارهای سازگاری

نتایج این تحقیق نشان داد که در شرایط اقلیمی آینده افزایش دما بیشترین سهم را در کاهش عملکرد محصولات زراعی دارد بنابراین راهکارهای سازگاری به این شرایط باید به نحوی انتخاب شود که از این اثرات منفی جلوگیری کنند. نتایج شبیه‌سازی در مورد گندم حاکی

از آن است که تغییر تاریخ کاشت و افزایش مقاومت به گرما راهکارهای مؤثر و ساده‌ای برای این منظور محسوب می‌شوند. در مناطقی که افزایش میانگین دمای کل دوره رشد در بازه ۱ تا ۲°C قرار دارد (غرب و شمال غرب کشور) ۱۵ تا ۲۰ روز تسریع در کاشت گندم علاوه بر جبران کاهش عملکرد، ممکن است باعث افزایش آن شود البته با جابه‌جایی بیشتر تاریخ کاشت عملکرد مجدداً کاهش خواهد یافت (شکل ۱۳). در نواحی جنوبی و شرقی که میانگین افزایش دما در طی فصل رشد بیشتر از ۲°C است با کاشت زودتر تا ۳۰ روز کاهش عملکرد به‌طور چشمگیری کاهش یافته و در حدود ۵ درصد خواهد بود (شکل ۱۳). به‌علاوه افزایش مقاومت به گرما نیز به میزان ۵۳ تا ۴°C در هر دامنه‌ای از افزایش دما، موجب بهبود عملکرد گندم و افزایش آن تا سطح فعلی می‌شود (شکل ۱۳).



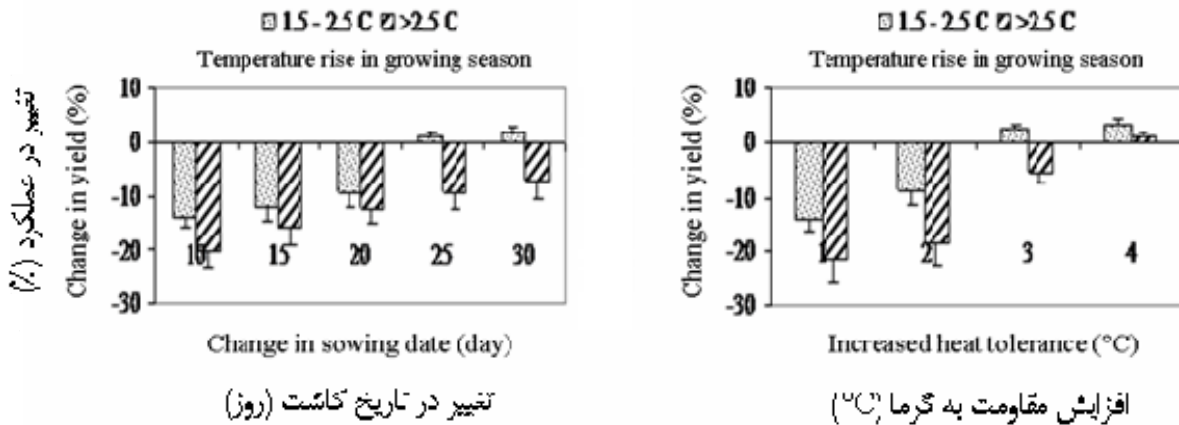
شکل ۱۳- تأثیر تغییر تاریخ کاشت و افزایش مقاومت به گرما بر عملکرد گندم در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط فعلی. شبیه‌سازی برای مناطقی که میانگین افزایش دما در آنها در سال ۲۰۵۰ میلادی ۱ تا ۲°C یا بیشتر است به‌طور جداگانه انجام شده، خطوط عمودی انحراف معیار مربوط به ایستگاه‌های واقع در هر منطقه است

Figure 13- Effects of change in sowing date and increased heat tolerance on wheat yield under climate change compared to current yield. Yield is simulated for year 2050 with temperature rise between 1-2 °C or higher. Vertical bars show SE of regions

کاشت از ۲۵ تا ۳۰ روز انتظار می‌رود که میانگین عملکرد نخود در مناطق کشت آن تا ۵ درصد افزایش یابد (شکل ۱۵-a). در چغندر قند تغییر تاریخ کاشت یا افزایش مقاومت به گرما تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط فعلی نداشت. مدل‌سازی رشد این گیاه در شرایط محدودیت آب (نتایج نشان داده نشده است) حاکی از آن بود که چغندر قند در شرایط اقلیمی آینده علاوه بر تأثیر منفی دما بالا با کمبود آب نیز مواجه خواهد شد. شبیه‌سازی تحت این شرایط نشان داد که برای جبران عملکرد حداقل به ۳۰ درصد آب بیشتر جهت آبیاری این گیاه نیاز خواهد بود (شکل ۱۵-b).

در مورد ذرت تأخیر کاشت به‌مدت ۲۵ تا ۳۰ روز در مناطق که افزایش میانگین دما در طی فصل رشد کمتر از ۲/۵°C باشد راهکاری مؤثر است و ممکن است افزایش جزیی عملکرد را نیز به همراه داشته باشد اما چنانچه افزایش دمای فصل رشد ذرت بیش از ۲/۵°C باشد حتی با ۳۰ روز تأخیر در کاشت نیز کاهش عملکرد تا حدود ۱۰ درصد اجتناب‌ناپذیر است (شکل ۱۴). افزایش مقاومت به گرما تا ۳°C یا بیشتر کاهش عملکرد ذرت را در اغلب مناطق کشور تقریباً به‌طور کامل برطرف خواهد ساخت (شکل ۱۴).

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در مورد نخود کاشت زودتر به‌مدت ۲۰ روز در هر دو بازه افزایش دما فصل رشد این گیاه کاهش عملکرد ناشی از گرمایش برای سال ۲۰۵۰ را جبران خواهد کرد و با تسریع

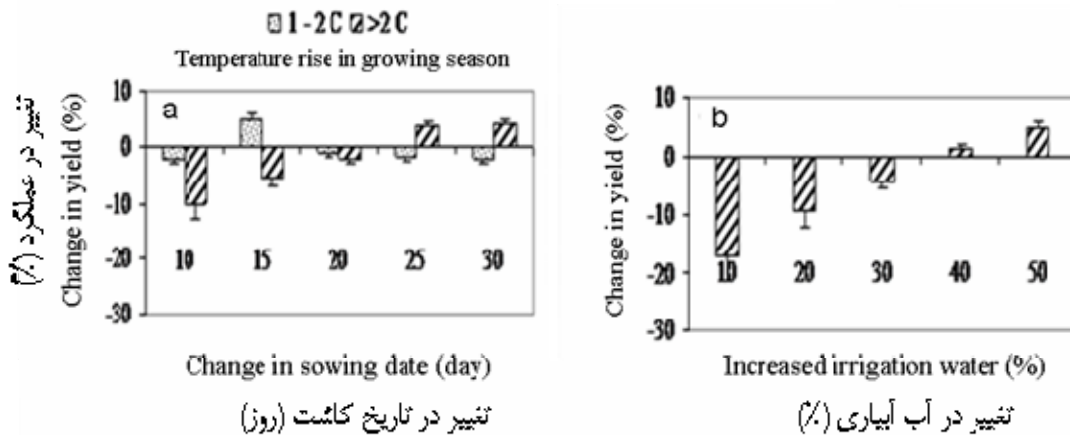


شکل ۱۴- تأثیر تغییر تاریخ کاشت و افزایش مقاومت به گرما بر عملکرد ذرت در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط فعلی. شبیه‌سازی برای مناطقی که میانگین افزایش دما آنها در سال ۲۰۵۰ میلادی ۱/۵ تا ۲/۵ °C یا بیشتر است به‌طور جداگانه انجام شده، خطوط عمودی انحراف معیار مربوط به ایستگاه‌های واقع در هر منطقه است

Figure 14- Effects of change in sowing date and increased heat tolerance on corn yield under climate change compared to current yield. Yield is simulated for year 2050 with temperature rise between 1.5-2.5 °C or higher. Vertical bars show SE of regions

محققین نتیجه‌گیری کردند که این جابه‌جایی در مراحل فنولوژی باعث می‌شود که فاصله گلدهی تا پرشدن دانه با دمای پایین‌تری مصادف شود لذا عملکرد گندم تا حدودی افزایش می‌یابد. به‌نظر می‌رسد چنین وضعیتی در مناطق گرم و خشک نظیر ایران تحقق نخواهد یافت، زیرا مراحل حساس نموی گندم در شرایط اقلیمی آینده حتی با کاهش طول دوره رشد نیز با دمای بالا مصادف می‌شوند. نتایج تحقیق حاضر حاکی از آن است کاشت زودتر این گیاه در ابتدای پاییز راهکار مناسبی برای ممانعت از این مشکل می‌باشد.

نتایج بسیاری از مطالعات نقش قابل توجه روش‌های سازگاری را در جبران کاهش عملکرد و حتی افزایش آن در شرایط تغییر اقلیم را به اثبات رسانده است. کوچکی و نصیری (Koocheki and Nassiri, 2008) نشان دادند که افزایش مقاومت به گرمای ارقام گندم در مرحله گلدهی به میزان ۲ درجه سانتی‌گراد روش مؤثری برای جلوگیری از کاهش عملکرد در شرایط تغییر اقلیم می‌باشد. براساس یافته‌های سادراس و مونزون (Sadras and Monzon, 2006) در آرژانتین افزایش دما طول دوره سبز شدن تا گلدهی را در گندم کوتاه‌تر کرد، ولی بر فاصله گلدهی تا رسیدگی بی‌تأثیر است. این



شکل ۱۵- تأثیر تغییر تاریخ کاشت در بازه پیش‌بینی برای افزایش دما بر عملکرد نخود (a) و افزایش مقدار آب آبیاری بر عملکرد چغندر (b) در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط فعلی. خطوط عمودی انحراف معیار مربوط به مناطق مختلف می‌باشند

Figure 15- a) Effect of change in sowing date at different range of temperature rise on yield of chick pea and b) effect of increased irrigation water on sugar beet yield under climate change compared to current yields. Vertical bars show SE of regions

تعرق ناشی از گرمایش، تأمین آب بیشتر راهکاری است که موجب جلوگیری از کاهش عملکرد این محصول در شرایط اقلیمی آینده خواهد شد. پیدگون و همکاران (Pidgeon *et al.*, 2001) در بررسی حساسیت چغندر قند به خشکی نشان دادند که در مناطق کشت این گیاه در انگلستان بروز دوره‌های خشکی در ابتدا یا انتهای تابستان عملکرد ریشه را به ترتیب ۱۰ و ۱۵ درصد کاهش خواهد داد که علت آن کاهش کارایی مصرف نور می‌باشد. از سوی دیگر نتایج مطالعه‌ای در ایرلند (Holden *et al.*, 2003) نشان داد که تا سال‌های ۲۰۵۵ و ۲۰۷۵ میلادی عملکرد سیب زمینی در این کشور به دلیل کمبود آب کاهش می‌یابد. براساس یافته‌های این تحقیق نیاز آبی سیب زمینی در آینده تا حدی افزایش می‌یابد که کشت آن در اغلب مناطق ایرلند امکان‌پذیر نخواهد بود. بر این اساس به نظر می‌رسد با توجه به بحران فعلی آب در کشور و تشدید آن در آینده، کشت چغندر قند در ایران نیز در شرایط تغییر اقلیم به شدت محدود شود.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در طی چند دهه آینده پی‌آمدهای ناشی از تغییر اقلیم و به‌ویژه افزایش دما عملکرد محصولات زراعی را در منطقه مختلف ایران با کاهش قابل ملاحظه‌ای مواجه می‌سازد. علی‌رغم عدم قطعیت‌هایی که در پیش‌بینی‌های مبتنی بر مدل‌سازی وضعیت آینده وجود دارد، در حال حاضر این مدل‌ها تنها ابزار موجود برای مطالعات تغییر اقلیم محسوب می‌شوند. به‌علاوه باید توجه داشت که تأثیر تغییرات اقلیمی در شرایط کنترل شده و یا در هنگام شبیه‌سازی به مراتب کمتر از شرایط واقعی مزرعه است زیرا در شرایط طبیعی وجود انواع تنش‌های زنده و غیر زنده محیطی ممکن است باعث تشدید اثرات ناشی از گرمایش شوند. علی‌رغم این نگرانی‌ها، به نظر می‌رسد که با اتخاذ راهکارهای مناسب می‌توان نظام‌های تولید را به شرایط اقلیمی آینده سازگار کرد. مطالعات عمیق‌تر در مورد پی‌آمدهای مختلف ناشی از تغییر اقلیم بر تولیدات کشاورزی و طراحی راهکارهای سازگاری به حفظ دراز مدت امنیت غذایی کشور کمک خواهد کرد.

سپاسگزاری

بودجه این تحقیق از محل اعتبارات طرح پژوهش مصوب ۸۷/۹/۲ توسط معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد تأمین شده است که بدینوسیله سپاسگزاری می‌شود.

لو و همکاران (Luo *et al.*, 2009) نیز کاشت زودتر را به‌عنوان راه حلی مناسب برای جلوگیری از کاهش عملکرد گندم در جنوب استرالیا گزارش کرده و نشان دادند که تسریع کاشت به مدت ۲ هفته عملکرد را در شرایط تغییر اقلیم نسبت به شرایط فعلی افزایش خواهد داد.

البته چنین راهکاری برای ذرت چندان مناسب نیست و خطر سرمازدگی گیاهچه را افزایش می‌دهد زیرا ذرت به‌ویژه در مراحل اولیه رشد به سرما حساس است. سوینسکی و همکاران (Sowinski *et al.*, 2005) نشان دادند که قرار گرفتن ذرت در مرحله ۳ برگی در دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد یا کمتر باعث می‌شود که حتی اگر در مراحل بعدی رشد در دمای بهینه قرار گیرد نیز کاهش رشد قابل جبران نباشد. بنابراین کاشت دیرتر ذرت به طوری که پرشدن دانه در هوای خنک‌تر ابتدای پاییز تکمیل شود در کنار افزایش مقاومت به گرما در این گیاه راهکار قابل قبولی برای مقابله با شرایط اقلیمی آینده محسوب می‌شود.

واکنش مثبت نخود به کاشت زودتر در شرایط تغییر اقلیم چندان دور از انتظار نیست، زیرا در شرایط اقلیمی فعلی نیز کشت انتظاری این گیاه سرما دوست در انتهای زمستان در صورت عدم مواجهه با دماهای پایین باعث افزایش قابل توجه عملکرد نسبت به کشت بهاره می‌شود. بنابراین با برطرف شدن خطر سرمازدگی در شرایط اقلیمی آینده افزایش عملکرد امکان‌پذیر خواهد بود.

تغییر تاریخ کاشت تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد چغندر قند در شرایط تغییر اقلیم نداشت که این امر تا حد زیادی به دلیل دماهای بالای تابستان در طی دوره بزرگ شدن غده‌های این گیاه است. براساس یافته‌های کنتور و همکاران (Kenter *et al.*, 2006) دمای مطلوب برای رشد غده در چغندر قند در ۱۸ درجه سانتی‌گراد میانگین دمای روزانه است و دماهای بالاتر سرعت رشد غده را کاهش می‌دهد این محققین میزان کاهش عملکرد غده در میانگین دمای روزانه ۲۲ درجه سانتی‌گراد را حدود ۳۰ درصد گزارش کردند. بدیهی است که با توجه به مقادیر پیش‌بینی شده برای افزایش دما در طی دوره رشد چغندر، تغییر تاریخ کاشت دمای مطلوب برای رشد این گیاه را در هیچ‌یک از مناطق کشت آن در کشور فراهم نخواهد کرد. البته کاشت زودتر این گیاه در عرض‌های جغرافیایی بالا راهکار مناسبی برای بهبود عملکرد خواهد بود. یافته‌های چمیلوسکی و همکاران (Chmielewski *et al.*, 2003) حاکی از آن است که با افزایش دما، کشت چغندر قند در آلمان زودتر انجام خواهد شد و بسته شدن سریع‌تر کانوپی و افزایش طول دوره رسیدگی باعث بهبود عملکرد این محصول می‌شود.

بنابراین با توجه به نیاز آبی بالای چغندر قند و افزایش تبخیر و

References

1. Abraha, M. G., and Savage, M. J. 2006. Potential impacts of climate change on the grain yield of maize for the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. *Agriculture Ecosystems and Environment* 115: 150-160.
2. Anwar, M. R., O' Leary, G., McNell, D., Hossain, H., and Nelson, R. 2007. Climate change impact on rainfed wheat in south-eastern Australia. *Field Crops Research* 104: 139-147.
3. Asseng, S., Jamieson, P. D., Kimball, B., Pinter, P., Sayre, K., Bowden, J. W., and Howden, S. M. 2004. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Research* 85: 85-102.
4. Bannayan, M., and Crout, N. M. J. 1999. A stochastic modelling approach for real-time forecasting of winter wheat yield. *Field Crops Research* 62: 85-95.
5. Carson, D. J. 1999. Climate modelling: achievements and prospects. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society* 125: 1-28.
6. Chmielewski, F. M., Müller, A., and Bruns, E. 2003. Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forest Meteorology* 112: 132-145.
7. Craufurd, P. Q., and Wheeler, T. R. 2009. Climate change and the flowering time of annual crops. *Journal of Experimental Botany* 60: 2529-2539.
8. Easterling, W. E., 2007. Climate change and the adequacy of food and timber in the 21st century. *Proceedings of National Academy of Sciences* 104: 19679.
9. Erda, L., Wei, X., Hui, J., Yinlong, X., Yue, L., and Liping, B. 2005. Climate change impacts on crop yield and quality with CO₂ fertilization in China. *Philos. Transaction of Royal Society of Biological Sciences* 360: 2149-2154.
10. Ewert, F., Rodriguez, D., Jamieson, P., Semenov, M. A., Mitchell, R. A. C., Goudriaan, J., Porter, J. R., Kimball, B. A., Pinter Jr., P. J., Manderscheid, R., Weigel, H. J., Fangmeier, A., Fereres, E., and Villalobos, F. 2002. Effects of elevated CO₂ and drought on wheat: testing crop simulation models for different experimental and climatic conditions. *Agriculture Ecosystem and Environment* 93: 249-266.
11. Fulco, L., and Senthold, A. 2006. Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. *Agricultural Systems* 90: 159-179.
12. Goudiraan, J., and van Laar, H. H. 1993. *Modelling Crop Growth Processes*. Kluwer Academic Press, The Netherlands.
13. Goudiraan, J., 1996. Predicting crop yields under global change. In: Walker, B., Steffen, W. (Eds.), *Global Change and Terrestrial Ecosystems*. International Geosphere-/Biosphere Programme Book Series. Cambridge University Press, pp. 260-274.
14. Holden, N. M., Brereton, A. J., Fealy, R., and Sweeney, J. 2003. Possible change in Irish climate and its impact on barley and potato yields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116: 181-196.
15. IPCC, 2007. *Climate Change 2007*. Cambridge University Press, New York.
16. Jones, P. G., and Thornton, P. K. 2003. The potential impact of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global and Environmental Change* 13: 51-59.
17. van Ittersum, M. K., Leffelaar, P. A., van Keulen, H., Kropff, M. J. Bastiaans, L., and Goudriaan, J. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy* 18: 201-234.
18. Kenter, C., Hoffmann, C. M., and Marlander, B. 2006. Effects of weather variables on sugar beet yield development (*Beta vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy* 24: 62-69.
19. Kang, Y., Khan, S., and Ma, X. 2003. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security-A review. *Agricultural and Forest Meteorology* 117: 97-122.
20. Koocheki, A., Nassiri Mahallati, M., and Jafari, L. 2015. 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 abstract).
21. Koocheki, A., and Nassiri, M. 2008. The effects of climate change and increase in CO₂ concentration on wheat yield in Iran and evaluation of adaptation strategies. *Iranian Journal of Field Crops Research* 7 (3): 1-18. (in Persian with English abstract).
22. Kjellsrom, E. 2005. Recent and future signature of climate change in Europe. *Ambio* 33: 193-198.
23. Lobel, D., and Asner, C. 2000. Climate and management contributions to recent trends in US agricultural yield. *Science* 299: 1032.
24. Long, S. P., Ainsworth, E. A., Rogers, A., and Ort, D. R. 2004. Rising atmospheric carbon dioxide: plants face the future. *Annual Review of Plant Biology* 55: 591-628.
25. Long, S. P., Ainsworth, E.A., Leakey, A. D. B., Nosberger, J., and Ort, D. R., 2006. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science* 312: 1918-1921.
26. Luo, Q., Bellotti, W., Williams, M., and Wang, E. 2009. Adaptation to climate change of wheat growing in Analysis of management and breeding strategies. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 129: 261-267.
27. Mall, R. K., Lal, M., Bhatia, V. S., Rathore, L. S., and Singh, R. 2004. Mitigating climate change impact on

- soybean productivity in India: a simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 113-125.
28. 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., Scheffinger, 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.
 29. Ministry of Jihad e Agriculture. 2011. Year book of Agricultural Statistics (Vol. 1) Field Crops year 2009-2100. Offici of Statistics and Information Technology. (in Persian).
 30. Ortiz, R., Sayre, K. D., Govaerts, B., Gupta, R., Subbarao, G. V., Ban, T., Hodson, D., Dixon, J. M., Ortiz-Monasterio, J. I., and Reynolds, M. 2008. Climate change: Can wheat beat the heat? *Agriculture Ecosystems and Environment* 126: 46-58.
 31. Özdoğan, M. 2011. Modeling the impacts of climate change on wheat yields in Northwestern Turkey. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 141: 1-12.
 32. Peng, S. B., Huang, J. L., Sheehy, J. E., Laza, R. C., Visperas, R. M., Zhong, X. H., Centeno, G. S., Khush, G. S., and Cassman, K.G. 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of National Academy of Sciences* 101: 9971-9975.
 33. Pidgeon, J. D., Werker, A. R., Jaggard, K. W., Richter, G. M., Lister, D. H., and Jones, P. D. 2001. Climatic impact on the productivity of sugar beet in Europe, 1961-1995. *Agricultural and Forest Meteorology* 109: 27-38.
 34. Remy, M., Stefan, B., Andreas, B., and Hans, J. W. 2003. Effect of CO₂ enrichment on growth and daily radiation use efficiency of wheat in relation to temperature and growth stage. *European Journal of Agronomy* 19: 411-425.
 35. Reyenga, P. J., Howden, S. M., Meinke, H., and Mckean, G. M. 1999. Modelling global change impacts on wheat cropping in south-east Queensland, Australia. *Environmental Modeling and Softwares* 14: 297-306.
 36. Rosenzweig, C., and Tubiello, F. N. 1997. Impacts of future climate change on Mediterranean agriculture: current methodologies and future directions. *Climate Change* 1: 219-232.
 37. Sadras, V. O., and Monzon, J. P. 2006. Modelled wheat phenology captures rising temperature trends: Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina. *Field Crops Research* 99: 136-146.
 38. Sowinski, P., Rudzinska-Langwald, A., Adameczyk, J., Kubica, I., and Fronk, J. 2005. Recovery of maize seedling growth, development and photosynthetic efficiency after initial growth at low temperature. *Journal of Plant Physiology* 162: 67-80.
 39. Tao, F., Yokozawa, M., and Zhang, Z. 2009. Modelling the impact of weather and climate variability on crop productivity over a large area: Anew process-based model development, optimization, and uncertainties analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 1266-1278.
 40. Tubiello, F. N., Donatelli, M., Rosenzweig, C., and Stockle, C. O. 2000. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Itallian locations. *European Journal of Agronomy* 13: 179-189.
 41. Tubiello, F. N., and Ewert, F. 2002. Simulating the effects of elevated CO₂ on crops: Approaches and applications for climate change. *European Journal of Agronomy*, 18: 57-74.
 42. Tubiello, F. N., Soussana, J. F., and Howden, S. M. 2007. Climate change and food security special feature: Crop and pasture response to climate change. *Proceedings of National Academy of Sciences* 104: 19686-19690.
 43. Van Laar, H. H., Goudriaan, J., and Van Keulen, H. 1997. SUCROS97: Simulation of crop growth for potential and water-limited production situations. C.T. de Wit Graduate School for Production Ecology and Resource Conservation, Wageningen, The Netherlands, pp. 52.
 44. Wolf, J. 2002. Comparison of two potato simulation models under climate change. I. Model calibration and sensitivity analyses. *Climate Research* 21: 173-186.
 45. Xiao, G., Zhang, Q., Yao, Y., Zhao, G., Wang, R., Bai, H., and Zhang, F. 2008. Impact of recent climatic change on the yield of winter wheat at low and high altitudes in semi-arid northwestern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 127: 37-42.
 46. Xiong, W., Matthews, R., Holman, I., Lin, E., and Xu, Y. 2007. Modelling China's potential maize production at regional scale under climate change. *Climatic Change* 85 (3-4): 433-451.
 47. Yang, L., Huang, J., Yang, H., Zhu, J., Liu, H., Dong, G., Liu, G., Han, Y., and Wang, Y. L. 2006. The impact of free-air CO₂ enrichment (FACE) and N supply on yield formation of rice crops with large panicle. *Field Crops Research* 98: 141-150.
 48. You, L., Rosegrant, M. W., Wood, S., and Sun, D. 2009. Impact of growing season temperature on wheat productivity in China. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 1009-1014.



Climate Change Effects on Agricultural Production of Iran: II. Predicting Productivity of Field Crops and Adaptation Strategies

A. Koocheki^{1*}- M. Nassiri Mahallati¹

Received: 13-11-2012

Accepted: 24-09-2013

Introduction

Recent evidences confirm that during the next few decades, many agroclimatic indices of Iran would be affected by global climate change. Koocheki *et al.* using two General Circulation Models showed that the mean annual temperature of the country will increase between 3.5-4.5°C while mean precipitation will reduce by 7-15% to 2050. It is well established that crop growth and development would drastically affect by the future global warming and its consequences because yield determining processes such as photosynthesis and crop phenology are directly related to temperature. On the other hands, the combined effects of CO₂ enrichment and temperature rise on crop growth are complicated and should be studied using crop simulation models. Furthermore, adapting to climatic variability will have a substantially greater effect in reducing impacts than willing mitigation. However, such impacts on crop productivity at national scale and adaptive measures for future conditions are rarely studied in Iran. In this research crop development and yield of wheat, corn, chickpea and sugar beet were simulated for the target year of 2050 and the results are compared with the current yield as the baseline.

Materials and Methods

Future climatic variables were predicted using A_{1f} (business as usual) scenario by GFDL general circulation model and the results were used as weather inputs in the SUCROS model which was previously validated against measured data of the four crops. To account for the effect of CO₂ enrichment on crop growth the photosynthesis routine of the model was adopted for increased CO₂ concentration using a scaling factor. Changes in developmental stages of each crop were estimated for the future conditions and the relation between duration of these stages and yield was determined. Predicted crop yields for the year 2050 were compared with the current potential yields considering some adaptation strategies.

Results and Discussion

Results indicated the average over the different regions, yield of wheat, corn, chickpea and sugar beet will be decreased by 18.6, 19.1, 6.6, and 20%, respectively. This decrease is mainly due to temperature rise and only 5.6% of the negative effects of temperature will be compensated by increased CO₂ concentration. Regression analysis showed the yield of the studied crops will be reduced between 9 to 17% per 1°C increase in mean temperature during the growing season. For wheat and corn such a reduction would also be expected for the duration of the grain filling period. Based on these results, reduction of the total growing period (planting to maturity) as well as shortened grain filling period are the main causes of the predicted crops yield decline by the target year. On average up to 60% of the yield reduction over the country could be described by global warming and the pattern of the crops yield variation follows the same spatial pattern predicted for temperature rise in 2050. Therefore, adaptation strategies for the future climate should be designed to prevent the negative effects of increased temperature during the sensitive development stages. Simulation results obtained by SUCROS model showed that among different studied adaptation strategies, using new wheat cultivars with higher heat tolerance and changing planting dates are the most efficient management practices and drastically prevent yield reduction under defined future climate scenarios. Use of these readily implemented adaptation strategies is profitable based on the available resources by improving national wheat production compared to the same climatic scenarios without adaptation.

Conclusions

1- Professor, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad
(*- Corresponding Author Email: akooch@um.ac.ir)

Despite of uncertainties in the predicted results of simulation models, the results of this research indicated that during the next few decades crop yields in different regions of Iran will be reduced due to climate change and more specifically temperature rise. This yield reduction could be more drastic under actual conditions where the effects of climate change will intensify due to biotic and abiotic stresses. However, these negative impacts could be avoided by using proper adaptation strategies.

Keywords: Adaptation, Global warming, Length of growth period, Yield variation