

تأثیر تغییر اقلیم همراه با افزایش غلظت CO₂ بر عملکرد گندم در ایران و ارزیابی راهکارهای سازگاری

علیرضا کوچکی^۱ و مهدی نصیری^۲

چکیده

تأثیر تغییر اقلیم بر عملکرد گندم آبی کشور با استفاده از یک مدل شبیه سازی رشد و بر اساس سناریوهایی مختلف تغییر اقلیم مورد بررسی قرار گرفت. گردید. به این منظور مدل SUCROS که برای محاسبه اثر افزایش غلظت CO₂ بر پارامترهای فتوسنتزی اصلاح شده بود و اسنجی و توسط داده های مزرعه ای مربوط به مناطق مختلف کشور تعیین اعتبار شد. جهت ارزیابی اثر متقابل افزایش غلظت CO₂ و افزایش درجه حرارت، عملکرد گندم در سه غلظت ۳۵۰ (فعلی)، ۵۵۰ و ۷۰۰ ppm (دو برابر) در ترکیب با افزایش میانگین دمای روزانه به میزان صفر، ۱، ۲، ۳ و ۴ درجه سانتی گراد شبیه سازی شد. بعلاوه شرایط اقلیمی سال ۲۰۵۰ میلادی (۱۴۳۰ خورشیدی) بر پایه سناریوی مجمع بین دول تغییر اقلیم برای سال هدف (غلظت معادل ۵۲۰ ppm) بوسیله دو مدل گردش عمومی GISS و GFDL پیش بینی گردید. برای اجرای مدل‌های گردش عمومی از داده های دراز مدت (۴۰ ساله) ۲۵ ایستگاه کشور که از مناطق مختلف تولید گندم آبی انتخاب شده بودند استفاده شد. پیش بینی مدل‌های گردش عمومی بعد از تغییر مقیاس آماری و بازسازی داده های روزانه بعنوان ورودی مدل بکار گرفته شد و عملکرد گندم آبی در مناطق مختلف کشور در شرایط اقلیمی سال هدف بدون افزایش غلظت CO₂ و با افزایش آن مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه راهکارهای سازگاری گندم به تغییر اقلیم و تأثیر آنها بر بهبود عملکرد نیز ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که میانگین افزایش درجه حرارت سالانه در مناطق مختلف کشور علیرغم اختلافات بین دو مدل گردش عمومی در محدوده ۳/۵ تا ۴/۴ درجه سانتی گراد قرار داشته و شدت افزایش دما از غرب به شرق و از شمال به جنوب کشور افزایش می یابد. این الگوی گرمایش باعث خواهد شد تا فراوانی درجه حرارت های بالا تر از ۳۰ درجه سانتی گراد در مرحله گلدهی و گرده افشانی گندم در اغلب مناطق تولید گندم کشور در مقایسه با شرایط فعلی بطور قابل ملاحظه ای افزایش یابد. تأثیر افزایش غلظت CO₂ بدون گرمایش بر عملکرد گندم مثبت بود در حالیکه با افزایش میانگین روزانه اثرات غلظت CO₂ شد بطوریکه بر اساس نتایج شبیه سازی با افزایش میانگین دمای روزانه به میزان ۳ درجه سانتی گراد یا بیشتر عملکرد گندم حتی با افزایش غلظت CO₂ نیز کاهش یافت. پیش بینی عملکرد برای سال ۲۰۵۰ میلادی نیز نشان داد که اگرچه غلظت CO₂ تأثیر منفی افزایش درجه حرارت را تا حدودی تعدیل می کند ولی در شرایط اقلیمی سال هدف عملکرد گندم آبی در مناطق مختلف تولید در محدوده ای بین ۱۴ تا ۲۱ درصد کاهش خواهد یافت. ارزیابی روش های سازگاری به شرایط اقلیمی آینده نشان داد که تغییر تاریخ کاشت و اصلاح ارقامی از گندم با دامنه مقاومت بالاتر به گرما در مرحله گلدهی تأثیر چشمگیری در بهبود عملکرد خواهند داشت. بر اساس نتایج شبیه سازی با افزایش آستانه مقاومت گندم به درجه حرارت بالا در زمان گلدهی به میزان ۲ تا ۴ درجه سانتی گراد، از کاهش عملکرد گندم در شرایط اقلیمی سال هدف بطور قابل ملاحظه ای کاسته خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، گندم، غلظت CO₂، مقاومت به گرما، سازگاری.

مقدمه

درجه سانتی گراد و تا پایان قرن حاضر ۶/۴-۱/۱ درجه سانتی گراد افزایش می‌یابد و دامنه این افزایش درجه حرارت در مقیاس منطقه‌ای بسیار زیاد خواهد بود (۲۷). با

براساس آخرین گزارش مجمع بین دول تغییر اقلیم، میانگین درجه حرارت جهان تا ۵۰ سال آینده ۲/۵-۰/۶

۱ - عضو هیئت دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد و عضو پیوسته فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران، ۲ - عضو هیئت علمی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.

بعلاوه شواهدی نیز وجود دارد که اثرات سودمند افزایش [CO₂] به اندازه‌ای که قبلاً تصور می‌شد، چشمگیر نخواهد بود (۶، ۳۷، ۳۸). بنابراین ارزیابی تاثیر تغییرات اقلیمی آینده بر عملکرد محصولات زراعی مستلزم توجه به افزایش [CO₂] و در عین حال افزایش درجه حرارت بویژه در مراحل حساس رشد می‌باشد.

کوچکی و همکاران (۳۳) با مطالعه اثر تغییر اقلیم بر شاخص‌های آگروکلیماتیک ایران با استفاده از مدل‌های گردش عمومی، تغییرات قابل توجه طول فصل رشد و الگوهای بارش توأم با افزایش درجه حرارت را در اغلب منطق کشور پیش بینی کرده‌اند. بعلاوه تاثیر این تغییرات اقلیمی بر تولید برخی محصولات زراعی از جمله گندم آبی در شرایط مشهد توسط کوچکی و همکاران (۲) و نخود و آفتابگردان در شرایط تبریز بوسیله کوچکی و همکاران (۳۲) ارزیابی شده است. البته این تحقیقات در مقیاس منطقه‌ای (استان یا شهرستان) بوده در حالیکه ارزیابی این اثرات بر تولید محصولات زراعی مستلزم مطالعات گسترده تر در مقیاس ملی می‌باشد (۲۶).

برآوردهای موجود نشان می‌دهد که نیاز کشور به گندم تا سال ۱۴۰۰ از مرز ۲۰ میلیون تن در سال خواهد گذشت که حدود ۶۵-۷۰ درصد از این مقدار باید از اراضی آبی و بقیه از اراضی دیم تامین شود (۱). مطالعات تغییر اقلیم که در مقیاس جهانی انجام شده است کاهش ۴۰-۱۰ درصدی و ۲۰-۵ درصدی عملکرد را به ترتیب برای غلات دیم و آبی ایران در ۵۰ سال آینده گزارش کرده‌اند (۴۶، ۴۷). در حالیکه در مطالعات انجام شده توسط نصیری و همکاران (۴۴) کاهش عملکرد گندم دیم در مقیاس ملی برای سالهای ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ میلادی به ترتیب ۱۳/۸ و ۲۰/۷ درصد پیش بینی شده است. بنابراین نتایج ارزیابی‌هایی که در مقیاس جهانی انجام می‌گیرد از قطعیت کافی برخوردار نبوده و انجام مطالعات در سطح ملی الزامی می‌باشد.

مقابله با تغییر اقلیم مستلزم ارائه راهکارهایی برای سازگاری با شرایط آینده است. پیش بینی‌های انجام شده نشان داده است که راهکارهای سازگاری به تغییر اقلیم اغلب موفقیت آمیز بوده و در بسیاری موارد افزایش عملکرد را نیز به همراه داشته‌اند (۳۴، ۱۰). البته برای عملی کردن این راهکارها بسته به ماهیت آنها به ۵ تا ۲۰ سال زمان نیاز خواهد

وجودیکه تغییر اقلیم در برخی از مناطق جهان بویژه نواحی واقع در عرض‌های شمالی بالاتر از ۵۵ درجه اثرات مثبتی بر تولیدات کشاورزی به‌همراه خواهد داشت (۱۲) ولی اثرات منفی این تغییرات در مناطق گرم و خشک بسیار شدید خواهد بود (۲۰، ۲۲، ۴۶، ۵۲، ۵۴). بطوریکه در کشورهای در حال توسعه افزایش درجه حرارت و کاهش بارندگی شدیدتر بوده (۵۴، ۵۲) و بعلاوه فراوانی و شدت وقوع پدیده‌های نادر اقلیمی (خشکسالی، گرما، سرما و سیل) نیز تشدید خواهد شد (۲۷، ۵۷).

افزایش غلظت CO₂، که بیشترین سهم را در گرمایش جهانی دارد، به تنهایی افزایش فتوسنتز و در نتیجه عملکرد بیشتر را برای اغلب گیاهان زراعی به همراه خواهد داشت (۶، ۹، ۱۵، ۳۰). با این وجود بنظر می‌رسد افزایش درجه حرارت ناشی از گرمایش جهانی و کاهش میزان بارش، اثرات سودمند افزایش [CO₂] را خنثی خواهد کرد. در واقع جنبه‌های مختلف تغییر اقلیم اثرات متفاوتی را بر تولید و عملکرد گیاهان زراعی ایجاد خواهند کرد و این عوامل در ترکیب با یکدیگر ممکن است افزایش یا کاهش محصول را موجب شوند. بنابراین اثر خالص تغییر اقلیم بر عملکرد به اثرات متقابل بین این عوامل بستگی دارد (۳۴). لازم به ذکر است که این اثرات بدون احتساب عواملی نظیر بیماریها و آفات (۵۵) می‌باشند.

علیرغم شواهد موجود مبنی بر اینکه دو برابر شدن غلظت CO₂ باعث افزایش عملکرد گیاهان زراعی خواهد شد (۳۰)، مطالعات نشان داده است که افزایش مورد انتظار عملکرد با توجه به افزایش درجه حرارت تحقق نخواهد یافت (۴۸، ۵۲). برای مثال نتایج شبیه سازی با فرض افزایش [CO₂] و ثابت بودن درجه حرارت، افزایش عملکرد برنج را تأیید کرده است ولی در صورتیکه درجه حرارت ۰/۸°C افزایش یابد، کاهش قابل توجه عملکرد مشاهده خواهد شد (۴۰).

لال و همکاران (۳۵) با مطالعه اثر تغییر اقلیم بر گندم و برنج نشان دادند که کاهش عملکرد این دو محصول در صورت افزایش درجه حرارت آنچنان زیاد است که همه اثرات مثبت افزایش [CO₂] را جبران خواهد کرد. مال و همکاران (۴۱) نیز کاهش عملکرد سویا در هندوستان را حتی در شرایط دو برابر شدن [CO₂] گزارش کرده‌اند.

سطوح افزایش درجه حرارت با حداقل و حداکثر دمای روزانه مربوط به آمار درازمدت اقلیمی (داده‌های مبنا) جمع شدند.

در حالت دوم دو مدل گردش عمومی GFDL^۳ (۴۲) و GISS^۴ (۲۳) به منظور پیش بینی تغییرات آینده اقلیمی مورد استفاده قرار گرفت. هر دو مدل براساس سناریوهای IPCC (۲۸) برای سال ۲۰۵۰ میلادی (غلظت CO_۲ معادل ppm ۴۵۰) واسنجی شدند. به این منظور مدلها در دوره مختلف اقلیمی (دوره مبنا: ۱۹۶۵-۲۰۰۵) و سناریوهای سال ۲۰۵۰ میلادی اجرا شدند. اختلاف بین آینده شبیه سازی شده و شرایط فعلی شبیه سازی شده محاسبه و به مقادیر داده‌های مبنا اضافه شدند تا سناریوی آینده اقلیمی تولید گردد. جزئیات مربوط به نحوه استفاده از مدلها فوق در ایران و نیز تغییر مقیاس آماری^۵ تایج حاصل از پیش بینی آنها توسط کوچکی و همکاران (۳، ۳۲، ۳۳) ارائه شده است.

شبیه‌سازی رشد و نمو و عملکرد گندم: جهت پیش بینی عملکرد گندم از مدل SUCROS (۵۹) استفاده شد. این مدل تولید ماده خشک، مراحل فنولوژیکی و عملکرد گندم را براساس داده‌های روزانه آب و هوایی با فواصل یک روزه شبیه سازی می‌کند. سرعت فتوسنتز روزانه در پنج لایه کانوپی محاسبه شده و گلوکز تثبیت شده پس از کسر تنفس نگهداری و تنفس رشد به ماده خشک تبدیل می‌شود. مراحل نمو متناسب با سرعت نمو که خود تابعی از درجه حرارت است محاسبه شده و توزیع ماده خشک بین اندامها براساس مرحله نموی (DVS) تعیین می‌گردد. DVS در هنگام سبز شدن صفر، در مرحله گلدهی برابر ۱ و در رسیدگی کامل معادل ۲ می‌باشد. بعلاوه مدل بیان آبی خاک را نیز محاسبه می‌کند. جزئیات مدل SUCROS توسط نصیری (۴) ارائه شده است.

نیاز ورنالیزاسیون در گندم زمستانه باعث تاخیر نمو خواهد شد. جهت توصیف این پدیده سرعت ورنالیزاسیون (بین صفر و یک) ضریب تنظیم کننده سرعت نمو است. با تکمیل نیاز ورنالیزاسیون، سرعت ورنالیزاسیون بتدریج به سمت ۱ خواهد رفت. نیاز ورنالیزاسیون گندم مجموع تعداد روزهایی است که درجه حرارت در محدوده صفر تا ۸

بود (۵۰). بنابراین ارزیابی راهکارهای مختلف سازگاری در شرایط آینده اقلیمی کشور نیز به نوبه خود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تاثیر تغییرات آینده اقلیمی بر تولید انواع محصولات کشاورزی در مقیاس جهانی (۴۶، ۴۷) منطقه‌ای (۱۲، ۲۹، ۵۰، ۵۸) و ملی در کشورهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (۵، ۱۳، ۱۶، ۱۷، ۲۱، ۳۵، ۴۰، ۴۱، ۵۶، ۶۴)، و در ایران نیز ضرورت چنین مطالعاتی کاملاً مشهود می‌باشد.

هدف از این تحقیق ارزیابی تاثیر تغییرات آینده اقلیمی در ترکیب با افزایش [CO_۲] بر تولید گندم آبی کشور و ارزیابی راهکارهای سازگاری به این شرایط می‌باشد.

مواد و روش‌ها

داده‌های اقلیمی: آمار درازمدت هواشناسی شامل درجه حرارت حداقل و حداکثر روزانه و بارندگی برای دوره ۴۰ ساله (۱۹۶۵-۲۰۰۵) مربوط به شهرستانهای اراک، اردبیل، اصفهان، اهواز، ایلام، ارومیه، بوشهر، بندر عباس، تبریز، تربت حیدریه، تهران، خرم آباد، خوی، زنجان، سنندج، ساری، سبزوار، سمنان، شهرکرد، شیراز، کرمان، کرمانشاه، گرگان، مشهد، همدان، و یزد از بانک داده‌های سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. داده‌های آب و هوایی ۲۶ شهرستان مذکور که در مناطق تولید گندم آبی ایران قرار دارند در دوره ۴۰ ساله بعنوان مبنا^۱ مورد استفاده قرار گرفت. جهت سهولت در ارائه نتایج، این شهرستانها بر حسب موقعیت جغرافیایی به مناطق غربی، شرقی، شمالی، جنوبی و مرکزی گروه بندی شدند.

سناریوهای تغییر اقلیم: در این مطالعه سناریوهای اقلیمی به دو صورت تعریف شده و حاصل از پیش بینی مدلها گردش عمومی (GCM)^۲ ورد ارزیابی قرار گرفت در سناریوهای تعریف شده غلظت [CO_۲] در سه سطح ۳۵۰ (غلظت فعلی)، ۵۵۰ و ۷۰۰ ppm (غلظت دوبرابر) و افزایش درجه حرارت معادل صفر، ۱، ۲، ۳، ۴ درجه سانتی گراد تعریف و به این ترتیب، ۱۵ سناریوی مختلف طراحی گردید تا از این طریق اثرات متقابل افزایش درجه حرارت و [CO_۲] اتمسفر بررسی گردد. جهت آماده سازی داده‌ها،

1. aseline

2. General Circulation Model

3. General Fluid Dynamic Lab

4 - Goddard Institute of Space Science

5. statistical Downscaling

و حداثر سرعت فتوسنتز در شرایط فعلی (CO₂=۳۵۰ppm) و C_x غلظت CO₂ در شرایط تغییر اقلیم می‌باشد (۱۸، ۱۹). در گندم تولید خوشه قبل از گلدهی (DVS=0.65) انجام می‌شود. تعداد خوشه چه (SN) را می‌توان از معادل ۴ محاسبه کرد:

$$SN = \sum_{i=S}^F (W_i \cdot r) \quad (۴)$$

که در آن r تعداد خوشه چه تولید شده به ازاء ماده خشک کل، W_i میزان افزایش وزن خشک در روز i، S مرحله شروع تشکیل خوشه چه (DVS=0.65) و F مرحله شروع گلدهی (DVS=1) می‌باشد. مقدار r برای گندم در محدوده ۴۵ تا ۷۰ خوشه چه به ازاء گرم ماده خشک متغیر است (۶۱).

به این ترتیب در زمان گلدهی تعداد معینی خوشه چه تولید خواهد شد که حداکثر عملکرد قابل حصول (Y_m) را تعیین می‌کند (معادله ۵):

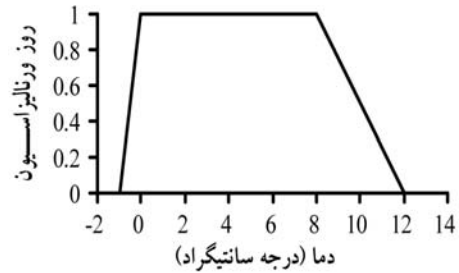
$$Y_m = S_i \cdot G_m \cdot 10^4 \quad (۵)$$

S_i تعداد خوشه در متر مربع در زمان گلدهی، G_m وزن هر دانه (میلی گرم) می‌باشد که در ارقام گندم بین ۳۰ تا ۵۰ میلی گرم تغییر می‌کند (۳۱). عملکرد واقعی (Y) براساس مقدار مواد فتوسنتزی تولید شده از فاصله گلدهی تا رسیدگی و بعلاوه مواد فتوسنتزی انتقال یافته از ذخایر ساقه محاسبه می‌شود (معادله ۶):

$$Y = \sum_{i=F}^H (G_i + T_i) \quad (۶)$$

F و H به ترتیب شروع گلدهی و رسیدگی نهایی، G_i و T_i به ترتیب میزان افزایش وزن و میزان انتقال ذخایر در روز i می‌باشند. مدل زمانی پایان می‌یابد که رسیدگی نهایی (DVS = ۲) فرا رسیده یا Y = Y_m شود.

خوشه چه‌های گندم به ویژه در مرحله گرده افشانی به درجه حرارت‌های بالا بسیار حساس هستند. خسارت زمانی حادث می‌شود که درجه حرارت در زمان گلدهی از آستانه معینی عبور کند. مقدار این آستانه بین ۲۰ و ۲۵ (۷، ۱۴) تا ۳۰ درجه سانتی گراد (۶۴) گزارش شده است. در مدل خسارت درجه حرارت‌های بالا در عقیم شدن خوشه چه در مرحله نموی 0.9 ≤ DVS ≤ 1.2 تعریف شده است. درصد خوشه چه‌های بارور که تابع درجه حرارت حداکثر روزانه و



شکل ۱. وز ورنالیزاسیون بعنوان تابعی از درجه حرارت (بالا) و سرعت ورنالیزاسیون بر حسب تعداد روزهای تجمعی ورنالیزاسیون (پایین).

درجه سانتی گراد باشد. در اینصورت نیاز ورنالیزاسیون بعد از تجمع ۵۰ روز ورنالیزاسیون کامل خواهد شد (۳۱) و پس از این دوره سرعت ورنالیزاسیون معادل ۱ خواهد بود (شکل ۱).

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

$$A = A_m (1 - \exp(-\varepsilon I_a / A_m)) \quad (۱)$$

که در آن A سرعت فتوسنتز ناخالص (کیلوگرم CO₂ بر هکتار برگ بر هکتار زمین)، A_m حداکثر سرعت فتوسنتز در اشباع نوری (کیلوگرم CO₂ بر هکتار برگ بر هکتار زمین)، ε کارآیی مصرف نور اولیه (کیلوگرم CO₂ بر هکتار برگ بر هکتار زمین به ازاء ژول در متر مربع در ثانیه) و I_a تشعشع جذب شده (ژول در متر مربع در ثانیه) می‌باشد. در مدل تاثیر [CO₂] بر فتوسنتز از طریق تاثیر بر A_m و ε تعریف گردید (معادلات ۲ و ۳):

$$\varepsilon = \varepsilon_{350} ((1 - \exp(-0.00305 \cdot C_x - 0.222)) / (1 - \exp(-0.00305 \cdot 350 - 0.222))) \quad (۲)$$

$$A_m = A_{m350} (49.57 / 34.76 (1 - \exp(-0.208(C_x - 60) / 49.57))) \quad (۳)$$

که در آنها ε₃₅₀ و A_{m350} به ترتیب کارآیی مصرف نور اولیه

بازسازی داده‌ها آب و هوایی بصورت روزانه تبدیل شدند. نتایج مطالعات کوچکی و همکاران (۲) نشان داده است که میزان تشعشع روزانه در شرایط اقلیمی سال هدف در ایران تغییر قابل توجهی نخواهد داشت، لذا شبیه سازی عملکرد گندم با این فرض صورت گرفته است.

نتایج و بحث

تعیین اعتبار مدل

مدل استفاده شده در این مطالعه برآورد قابل قبولی از عملکرد گندم آبی بدست داد. مقایسه عملکرد شبیه سازی شده و مشاهدات مربوط به ایستگاههای مختلف تحت بررسی (شکل ۲) نشان داد که شبیه سازی عملکرد گندم توسط مدل از دقت مطلوبی برخوردار است (RMSE% = ۱۶/۸). بعلاوه مدل قابلیت خوبی در تخمین زمان گلدهی گندم آبی از خود نشان داد. با وجودیکه داده‌های آزمایشی معدودی در مورد زمان گلدهی در اختیار بود، ولی پیش بینی مدل در محدوده ± ۱۵ درصد نسبت به مشاهدات قرار داشت (شکل ۲-ب).

مدل SUCROS قبلا با موفقیت در پیش بینی عملکرد گندم (۸) و نیز در مطالعات تغییر اقلیم (۱۹، ۶۳) مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج تحقیق حاضر نیز نشان می‌دهد که استفاده از این مدل جهت پیش بینی عملکرد گندم آبی در ایران با دقت مطلوبی امکان پذیر خواهد بود. بر این اساس می‌توان مدل مذکور را جهت شبیه سازی و پیش بینی مراحل نمو و عملکرد گندم در شرایط تغییر اقلیم

مستقل از غلظت CO_2 می‌باشد براساس روش هوری و همکاران (۲۴، ۲۵) توصیف می‌شود (معادله ۷):

$$f = \frac{100}{(1 + \exp(a(T_m - b)))} \quad (7)$$

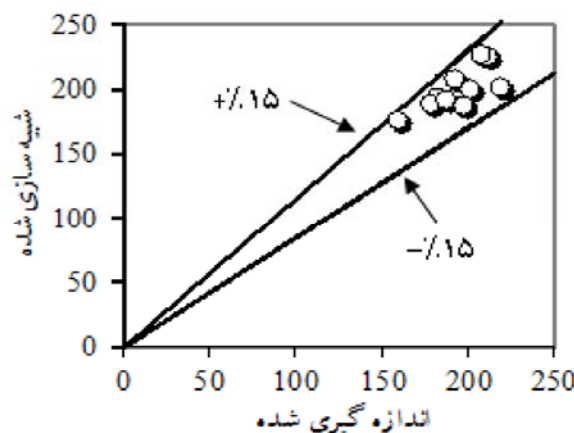
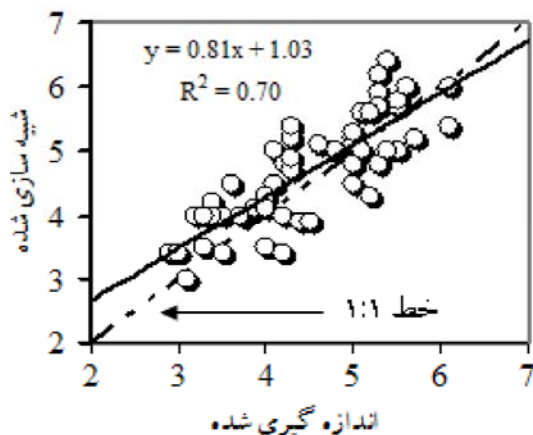
که در آن f درصد خوشه‌های بارور، T_m حداکثر درجه حرارت روزانه، b درجه حرارتی که در آن ۵۰ درصد خوشه چه‌ها عقیم می‌شوند و a سرعت کاهش باروری سنبلچه‌ها بر حسب درجه حرارت (۰/۷ - ۰/۵۳ برای گندم) می‌باشند.

مدل پس از واسنجی براساس داده‌های آزمایشی، توسط داده‌های عملکرد گندم در مناطق مختلف کشور استخراج شده از بانک اطلاعات وزارت جهاد کشاورزی، تعیین اعتبار گردید. به دلیل اهمیت زمان گلدهی، مدل علاوه بر عملکرد جهت ارزیابی قابلیت پیش بینی تعداد روز از کاشت تا گلدهی نیز اعتبار سنجی شد. قابلیت مدل با محاسبه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) بررسی گردید (معادله ۸):

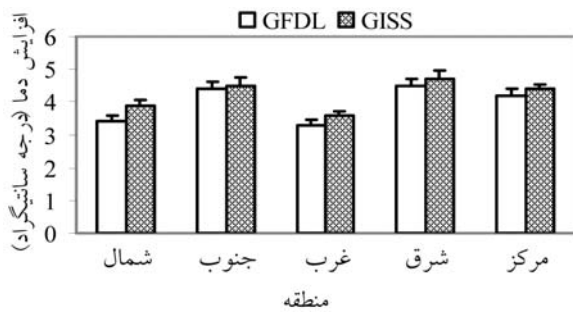
$$RMSE(\%) = \sqrt{\sum (O_i - P_i)^2 / n} \cdot \frac{100}{\bar{O}} \quad (8)$$

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

مدل پس از تعیین اعتبار جهت پیش بینی پتانسیل عملکرد گندم (عملکرد در شرایط عدم محدودیت آب، عناصر غذایی و آفات و بیماریها) در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا که ورودی مدل داده‌های روزانه آب و هوایی می‌باشد، نتایج ماهانه پیش بینی شده بوسیله مدل‌های گردش عمومی توسط یک



شکل ۲. تعیین اعتبار مدل (چپ) برای پیش بینی عملکرد (تن در هکتار) و تعداد روز از کاشت تا گلدهی (راست).



شکل ۳. میانگین افزایش درجه حرارت پیش بینی شده برای مناطق مختلف کشور و انحراف معیار درون هر منطقه بوسیله دو مدل گردش عمومی.

قرار دارد. البته برآورد مدل GISS در مقایسه با مدل GFDL اندکی بیشتر می‌باشد. اختلاف در پیش بینی‌های اقلیمی با انواع مختلف GCM که ناشی از فرضیات بکار گرفته شده در مدل‌های گردش عمومی می‌باشد در بسیاری از پژوهش‌ها گزارش شده و به همین دلیل استفاده از بیشتر از یک GCM روشی رایج در مطالعات تغییر اقلیم است (۴۶، ۵۰).

گروه بندی شهرستان‌های تحت بررسی (شکل ۳) نشان می‌دهد که در شرایط اقلیمی آینده افزایش درجه حرارت از غرب به شرق و از شمال به جنوب کشور تشدید خواهد شد. کوچکی و همکاران (۳۳) با ارزیابی شاخص‌های اقلیمی کشاورزی ایران در سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ میلادی شیب تغییرات شمال به جنوب و غرب به شرق را برای کاهش میزان بارندگی و افزایش درجه حرارت در ایران گزارش کرده‌اند. برآوردهای انجام شده توسط کوچکی و همکاران تغییرات قابل توجه اغلب شاخص‌های هواشناسی کشاورزی را در نواحی مختلف اقلیمی کشور مورد تأیید قرار داده است.

نتایج ارائه شده در جدول ۱ و شکل ۳، میانگین سالانه افزایش دما می‌باشند، کوچکی و همکاران (۳) با محاسبه تغییرات ماهانه درجه حرارت در ۲۵ و ۵۰ سال آینده نشان دادند که شدت افزایش دما در ماه‌های زمستان بیشتر از سایر ماه‌های سال است. افزایش درجه حرارت بعنوان اصلی ترین پی آمد تغییر اقلیم، پدیده‌ای قطعی در تمامی مناطق جهان است (۲۷، ۲۸، ۴۳). البته شدت افزایش درجه حرارت و توزیع فصلی آن و در نتیجه اثرات آن بر رشد و نمو گیاهان زراعی در مقیاس جهانی بسیار متنوع می‌باشد (۱۱). افزایش درجه حرارت در اثر تغییرات آینده اقلیمی در اغلب نقاط

نیز مورد استفاده قرار داد. استفاده از مدل‌های شبیه سازی جهت بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد گیاهان پس از واسنجی و تعیین اعتبار آنها در بسیاری از مطالعات با موفقیت همراه بوده است (۵، ۱۱، ۶۳). لازم به ذکر است که در این نوع مطالعات که در مقیاس زمانی و مکانی وسیع انجام می‌گیرد، دقت برآورد مقادیر شبیه سازی در محدوده ای بالاتر از آنچه در مطالعات و ارزیابی‌های مدیریتی صورت می‌گیرد تا حد زیاد کمتر خواهد بود. با این حال استفاده از این مدل‌ها تنها راه حل موجود جهت مطالعه اثرات تغییر اقلیم در مقیاس منطقه ای می‌باشد (۳۴).

افزایش درجه حرارت

میانگین افزایش پیش بینی شده دما بوسیله دو مدل گردش عمومی (جدول ۱) نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های تحت بررسی این تغییر در دامنه ۴/۵-۳/۵ درجه سانتی گراد

جدول ۱. افزایش پیش بینی شده درجه حرارت در مناطق مختلف کشور برای سال ۲۰۵۰ میلادی بوسیله دو مدل GISS و GFDL. مقادیر ارائه شده در جدول میانگین سالانه افزایش دما می‌باشند.

[CO ₂] ppm	افزایش درجه حرارت (°C)				
	۴	۳	۲	۱	۰
غرب					
۳۵۰	-۳۵/۱	-۲۳/۲	-۱۷/۹	-۸/۵	۱۰۰
۵۵۰	-۲۱/۲	-۱۱/۲	-۵/۳	-۲/۴	+۱۱/۱
۷۰۰	-۱۵/۱	-۸/۵	-۳/۹	-۱/۷	+۱۸/۳
شرق					
۳۵۰	-۴۴/۲	-۳۲/۱	-۱۸/۱	-۵/۲	۱۰۰
۵۵۰	-۳۰/۲	-۱۷/۵	-۷/۱	-۴/۰	+۱۰/۳
۷۰۰	-۲۱/۴	-۱۰/۱	-۵/۴	-۲/۵	+۱۹/۵
شمال					
۳۵۰	-۳۷/۵	-۳۳/۵	-۱۹/۱	-۷/۵	۱۰۰
۵۵۰	-۳۸/۴	-۱۴/۲	-۷/۱	-۳/۵	+۹/۵
۷۰۰	-۱۹/۸	-۱۰/۳	-۵/۹	-۲/۰	+۱۷/۱
جنوب					
۳۵۰	-۴۵/۲	-۳۷/۱	-۱۸/۵	-۶/۱	۱۰۰
۵۵۰	-۳۷/۱	-۲۰/۲	-۹/۲	-۵/۰	+۹/۲
۷۰۰	-۳۰/۱	-۱۳/۵	-۷/۰	-۳/۹	+۱۸/۵
مرکز					
۳۵۰	-۳۹/۲	-۳۱/۲	-۱۸/۱	-۸/۰	۱۰۰
۵۵۰	-۳۰/۱	-۱۴/۱	-۷/۲	-۳/۱	+۱۲/۱
۷۰۰	-۲۱/۴	-۱۱/۲	-۵/۱	-۲/۰	+۱۹/۲

اثر متقابل غلظت CO_۲ و درجه حرارت

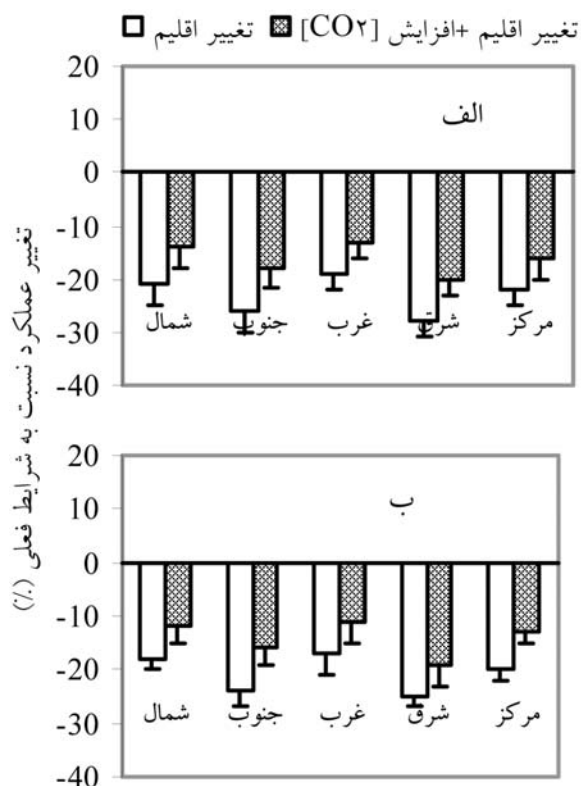
نتایج شبیه سازی عملکرد گندم در سطوح مختلف افزایش درجه حرارت و غلظت‌های مختلف CO_۲ (جدول ۲) نشان داد که افزایش [CO_۲] به تنهایی عملکرد گندم آبی را بهبود می‌بخشد. میانگین افزایش عملکرد نسبت به شرایط فعلی در غلظت‌های ۵۵۰ و ۷۰۰ ppm به ترتیب معادل ۱۱/۴ و ۱۸/۵ درصد برآورد گردید (جدول ۲). در این مطالعه پیش بینی عملکرد در شرایط پتانسیل (بدون محدودیت آب و عناصر غذایی) انجام شده است. سینکلر و همکاران (۵۱) نشان دادند تاثیر مثبت افزایش [CO_۲] به وضعیت نیتروژن در گیاه بستگی دارد. از سوی دیگر بر اساس نتایج گوجو و همکاران (۲۱) اثرات مثبت [CO_۲] بر عملکرد گندم در صورتی ظاهر خواهد شد که میزان بارندگی سالانه نیز حداقل ۷۵ میلی متر افزایش یابد. نتایج تحقیق مشابهی در ایتالیا مشخص ساخت که افزایش عملکرد گندم در شرایط دو برابر شدن [CO_۲] مستلزم صرف ۷۵ درصد آب بیشتر جهت آبیاری خواهد بود (۵۶). بنابراین بنظر می‌رسد که افزایش عملکرد پیش بینی شده در صورت عدم تامین آب و نیتروژن کافی تحقق نخواهد یافت. نتایج شبیه سازی نشان داد که در تمام مناطق کشور، افزایش میانگین درجه حرارت به میزان ۳ درجه سانتی گراد یا بیشتر کاهش چشمگیر عملکرد پتانسیل گندم آبی را به همراه خواهد داشت و میزان کاهش در مناطق شرقی و جنوبی کشور شدیدتر خواهد بود (جدول ۲).

نصیری و همکاران (۴۴) در مطالعه مشابهی با شبیه سازی عملکرد گندم دیم در ایران نشان دادند که کاهش میزان بارندگی در ترکیب با افزایش درجه افزایش [CO_۲] تاثیر درجه حرارت را تا حدودی جبران کرد با این وجود تاثیر توام افزایش غلظت [CO_۲] و درجه حرارت بر عملکرد گندم آبی در تمام نقاط منفی می‌باشد (جدول ۳). نتایج نشان داد اثر تعدیل کننده افزایش [CO_۲] که عمدتاً به دلیل افزایش مقاومت روزنه‌ای و افزایش کارآیی مصرف آب بروز می‌کند (۴۹) عملکرد گندم را در صورت ۴ درجه سانتی گراد افزایش درجه حرارت بسته به منطقه بین ۱۵ تا ۲۵ درصد بهبود خواهد بخشید اما قادر به جبران کامل اثرات منفی درجه حرارت نخواهد بود. مال و همکاران (۴۱) نیز با شبیه سازی عملکرد سویا در هندوستان نشان دادند که حتی

جهان پیش بینی شده و نتایج اجرای مدل‌های گردش عمومی بسته به نوع سناریوی تعریف شده در مدل نتایج مختلفی را ارائه داده‌اند. براساس این پیش بینی‌ها میانگین افزایش درجه حرارت در مقیاس جهانی برای سال ۲۰۵۰ میلادی در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم از ۳/۵ تا ۵/۰ درجه سانتی گراد متغیر می‌باشد بعلاوه شدت تغییر درجه حرارت در مناطق مختلف تفاوت‌های چشمگیری را نشان می‌دهد (۲۸). وقوع چنین تغییراتی در درجه حرارت ماهانه بسیاری از شاخص‌های اگروکلیماتیک که براساس درجه حرارت محاسبه می‌شوند نظیر درجه روزهای رشد، تبخیر و تعرق و نظایر آنها را تحت تاثیر قرار داده و در نتیجه الگوهای رشد و نمو گیاهان زراعی را تغییر خواهد داد.

جدول ۲. اثر متقابل افزایش غلظت CO_۲ و درجه حرارت بر تغییر عملکرد گندم آبی (%) در منطق مختلف کشور، عملکرد در شرایط عدم محدودیت آب و نیتروژن (شرایط پتانسیل) به وسیله مدل سوکروز شبیه سازی شده است. در هر منطقه عملکرد در غلظت ۳۵۰ ppm و عدم افزایش درجه حرارت بعنوان مبنا در نظر گرفته شده است.

[CO _۲] ppm	افزایش درجه حرارت (°C)				
	۴	۳	۲	۱	
غرب					
۳۵۰	-۳۵/۱	-۲۳/۲	-۱۷/۹	-۸/۵	۱۰۰
۵۵۰	-۲۱/۲	-۱۱/۲	-۵/۳	-۲/۴	+۱۱/۱
۷۰۰	-۱۵/۱	-۸/۵	-۳/۹	-۱/۷	+۱۸/۳
شرق					
۳۵۰	-۴۴/۲	-۳۲/۱	-۱۸/۱	-۵/۲	۱۰۰
۵۵۰	-۳۰/۲	-۱۷/۵	-۷/۱	-۴/۰	+۱۰/۳
۷۰۰	-۲۱/۴	-۱۰/۱	-۵/۴	-۲/۵	+۱۹/۵
شمال					
۳۵۰	-۳۷/۵	-۳۳/۵	-۱۹/۱	-۷/۵	۱۰۰
۵۵۰	-۳۸/۴	-۱۴/۲	-۷/۱	-۳/۵	+۹/۵
۷۰۰	-۱۹/۸	-۱۰/۳	-۵/۹	-۲/۰	+۱۷/۱
جنوب					
۳۵۰	-۴۵/۲	-۳۷/۱	-۱۸/۵	-۶/۱	۱۰۰
۵۵۰	-۳۷/۱	-۲۰/۲	-۹/۲	-۵/۰	+۹/۲
۷۰۰	-۳۰/۱	-۱۳/۵	-۷/۰	-۳/۹	+۱۸/۵
مرکز					
۳۵۰	-۳۹/۲	-۳۱/۲	-۱۸/۱	-۸/۰	۱۰۰
۵۵۰	-۳۰/۱	-۱۴/۱	-۷/۲	-۳/۱	+۱۲/۱
۷۰۰	-۲۱/۴	-۱۱/۲	-۵/۱	-۲/۰	+۱۹/۲



شکل ۴. تغییرات عملکرد گندم بوسیله بر اساس پیش بینی شرایط آب و هوایی سال ۲۰۵۰ بوسیله دو مدل گردش عمومی (الف: GISS و ب: GFDL) شبیه سازی عملکرد در شرایط پتانسیل انجام شده است.

است که کاهش عملکرد بر اساس داده‌های مدل GISS (شکل ۴-الف) تا حدودی بیشتر از مدل GFDL (شکل ۴-ب) بوده است.

بر اساس نتایج هر دو مدل گردش عمومی بیشترین میزان کاهش عملکرد گندم مربوط به مناطق جنوبی و شرقی کشور می‌باشد (شکل ۴). بر این اساس بنظر می‌رسد که تغییرات عملکرد گندم در مقیاس منطقه‌ای تا حد زیادی از الگوی افزایش درجه حرارت تبعیت خواهد کرد.

گزارشات موجود در واکنش عملکرد گندم به تغییر اقلیم بسته به منطقه و سناریوی تغییر اقلیم بسیار متفاوت است. بررسیهای انجام شده در مناطق شمالی اروپا نشان داده است که تغییرات آینده اقلیمی باعث افزایش طول دوره رشد شده و امکان کشت ارقام دیررس تر گندم را فراهم خواهد ساخت و در نتیجه پیش بینی شده است که عملکرد گندم بطور قابل توجهی افزایش یابد (۱۲، ۶۰). مطالعات انجام شده در استرالیا مؤید افزایش میزان نزولات و بالارفتن

جدول ۳. یانگین تغییر طول دوره رشد (سبز شدن تا رسیدگی) گندم در مناطق مختلف کشور. شبیه سازی دوره نمو براساس داده‌های آب و هوایی پیش بینی شده بوسیله مدل GFDL و GISS برای سال ۲۰۵۰ میلادی انجام شده است.

منطقه	کاهش طول دوره رشد (روز)		
	GISS	GFDL	میانگین
غرب	۲۲(۷)	۱۹(۵)*	۲۰/۵
شرق	۲۴(۱۰)	۳۲(۸)	۲۳
شمال	۲۴(۸)	۲۱(۶)	۲۲/۵
جنوب	۲۸(۶)	۲۷(۵)	۲۷/۵
مرکز	۲۵(۵)	۲۳(۷)	۲۴

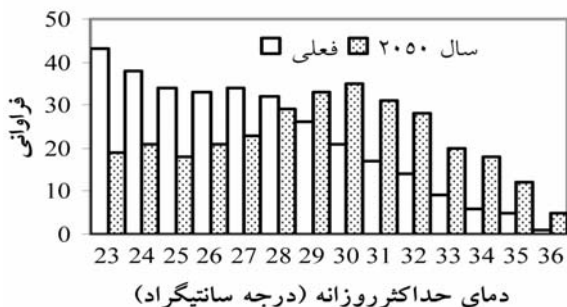
* اعداد داخل پارامتر انحراف معیار بین ایستگاههای داخل هر منطقه است

در شرایط دو برابر شدن [CO₂] تاثیر تغییر اقلیم بر سویا منفی می‌باشد.

شواهد متعدد نشان داده است که با افزایش غلظت گاز کربنیک، سرعت فتوسنتز در گیاهان C3 (از جمله گندم) افزایش خواهد یافت (۵۰). بنابراین انتظار می‌رود که تحت این شرایط کارآئی مصرف نور بعنوان شاخصی از فتوسنتز خالص گیاهان افزایش یابد. آسننگ و همکاران (۷) در مطالعه خود جهت شبیه سازی رشد و عملکرد گندم در شرایط تغییر اقلیم، میزان افزایش کارآئی مصرف نور گندم را در غلظت ۵۵۰ پی پی ام گاز کربنیک معادل ۱۵ درصد فرض کرده‌اند. از سوی دیگر فتوسنتز خالص و سرعت تولید ماده خشک تابعی از میزان تنفس است که خود به شدت تحت تاثیر درجه حرارت قرار می‌گیرد (۱۹). بنابراین به نظر می‌رسد که اثرات سودمند افزایش [CO₂] بر فتوسنتز تا حد زیادی توسط اثرات درجه حرارت‌های بالا بر تنفس جبران شده است.

عملکرد گندم در شرایط تغییر اقلیم

نتایج شبیه سازی عملکرد گندم آبی براساس داده‌های آب و هوایی پیش بینی شده توسط دو مدل GFDL و GISS (شکل ۴) نشان دهنده کاهش عملکرد در تمامی مناطق کشور می‌باشد. میزان کاهش در شرایط تغییر اقلیم (افزایش درجه حرارت بدون احتساب افزایش [CO₂]) بمراتب بیشتر از تغییر اقلیم با افزایش [CO₂] می‌باشد. لازم به ذکر



شکل ۵. فراوانی درجه حرارت‌های حداکثر روزانه در طی دوره گلدهی گندم در مناطق مختلف کشور برای شرایط فعلی و سال ۲۰۵۰ میلادی. فراوانی‌های پیش‌بینی میانگین دو مدل گردش عمومی است که از ۳۱۲ گرید واقع در مناطق مختلف استخراج شده است.

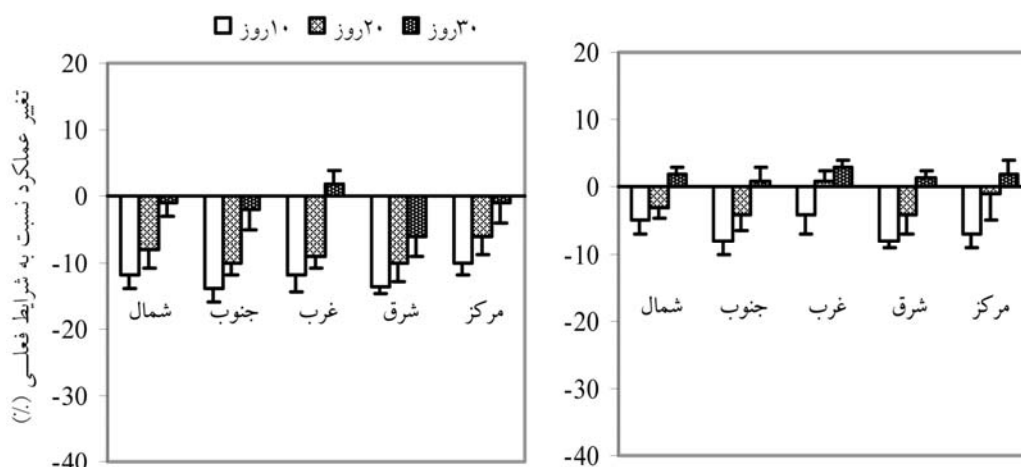
شکل ۵ فراوانی درجه حرارت‌های ۲۳ تا ۳۶ درجه سانتی‌گراد در مرحله گلدهی گندم برای ۳۱۲ شبکه شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های GISS و GFCD در سال ۲۰۵۰ میلادی در مقایسه با شرایط فعلی نشان داده شده است. براساس این پیش‌بینی، افزایش فراوانی درجه حرارت‌های بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد عامل اصلی کاهش عملکرد گندم به دلیل انطباق مرحله گلدهی با تنش گرمایی می‌باشد.

افزایش درجه حرارت سرعت رشد و نمو محصولات زراعی را افزایش خواهد داد، با این حال شواهد آزمایشی نشان داده است که تحت این شرایط، طول دوره رسیدگی دانه در غلات و گیاهان دانه‌ای کوتاه‌تر خواهد شد (۴۶). از آنجا که حصول عملکرد مطلوب از یک سو تابع تجمع ماده خشک در طول فصل رویش و از سوی دیگر تابع وجود زمان کافی برای انتقال مواد به دانه می‌باشد. افزایش درجه حرارت باعث کوتاه‌تر شدن طول دوره پر شدن دانه در غلات شده و لذا عملکرد این محصولات کاهش خواهد یافت (۱۱).

راهکارهای سازگاری: نتایج این مطالعه نشان داد که کاهش عملکرد گندم آبی کشور در شرایط اقلیمی آینده عمدتاً به دلیل افزایش درجه حرارت بویژه در مرحله گلدهی گیاه است. بنابراین دو الگوی مختلف سازگاری مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور مدل شبیه‌سازی رشد گندم که در قسمت‌های قبل جهت پیش‌بینی عملکرد در شرایط تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفته بود، با تعریف الگوهای مختلف سازگاری در آن جهت برآورد عملکرد گندم در سال هدف با احتساب سازگاری بکار گرفته شد.

درجه حرارت در بسیاری از نقاط تولید گندم در این کشور است و بر این اساس محققین پیش‌بینی کرده‌اند که تولید گندم استرالیا به دلیل اثرات مثبت افزایش غلظت گاز کربنیک و بارندگی، در طی ۱۰۰ سال آینده تا حدود ۳۰ درصد افزایش یابد (۱۶). این در حالی است که در آمریکا کاهش نسبی عملکرد گندم دیم و آبی این کشور در نواحی نیمه خشک و افزایش (کمتر از ۱۰ درصد) برای مناطق شمالی پیش‌بینی شده است (۴۶، ۴۷). مطالعات انجام شده در چین (۲۱) و هند (۵) نیز کاهش عملکرد گندم در اکثر مناطق این کشورها را در شرایط اقلیمی آینده تایید کرده است. نصیری و همکاران (۴۴) کاهش عملکرد گندم دیم در مناطق دیم خیز کشور برای سالهای ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ میلادی به ترتیب برابر با ۲۰/۶ و ۲۸/۸ درصد نسبت به میانگین فعلی برآورد کرده‌اند. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که علیرغم تاثیر نسبی افزایش $[CO_2]$ ، عملکرد گندم آبی کشور بسته به مناطق مختلف تولید و نوع مدل گردش عمومی بکار رفته در دامنه‌ای بین ۱۳ تا ۲۸ درصد برای سال ۲۰۵۰ میلادی کاهش خواهد یافت.

طول دوره رسیدگی: افزایش درجه حرارت در شرایط اقلیمی سال ۲۰۵۰ باعث کاهش قابل توجه طول دوره رسیدگی (سبز شدن تا رسیدگی) در گندم خواهد شد (جدول ۳). میزان کاهش دوره رسیدگی از ۲۸ تا ۳۳ روز به ترتیب در جنوب و شرق و ۲۰ تا ۲۲ روز به ترتیب در مناطق غربی و شمالی کشور متغیر می‌باشد. کاهش طول دوره رشد اغلب گیاهان زراعی در شرایط گرمایش ناشی از تغییر اقلیم گزارش شده است. کوچکی و همکاران (۲) با شبیه‌سازی رشد گندم آبی، کاهش طول دوره رشد با دو برابر شدن $[CO_2]$ در شرایط آب و هوایی مشهد را برای ارقام مختلف بین ۱۴ تا ۳۵ روز برآورد کرده‌اند. نصیری و همکاران (۴۴) نیز گزارش دادند که طول دوره رشد گندم دیم رقم سرداری در شرایط اقلیمی سالهای ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. کاهش طول دوره رشد ذرت (۲۹)، سویا (۴۱)، گندم (۳۶، ۴۹، ۶۰) و برنج (۴۸) نیز در مطالعات تغییر اقلیم گزارش شده است. شواهد موجود نشان دهنده این است که کاهش طول دوره پر شدن دانه ناشی از افزایش درجه حرارت مهمترین عامل کاهش عملکرد گیاهان زراعی در شرایط تغییر اقلیم می‌باشد (۱۰، ۱۷). در



شکل ۶. تاثیر تغییر تاریخ کاشت (از ۱۰ تا ۳۰ روز) بر عملکرد گندم در مناطق مختلف کشور. تغییرات محاسبه شده عملکرد مربوط به میانگین دو مدل گردش عمومی همراه با انحراف معیار درون هر منطقه می باشند که برای شرایط اقلیمی سال ۲۰۵۰ میلادی بدون افزایش CO₂ (چپ) و همراه با افزایش CO₂ (راست) ارائه شده است.

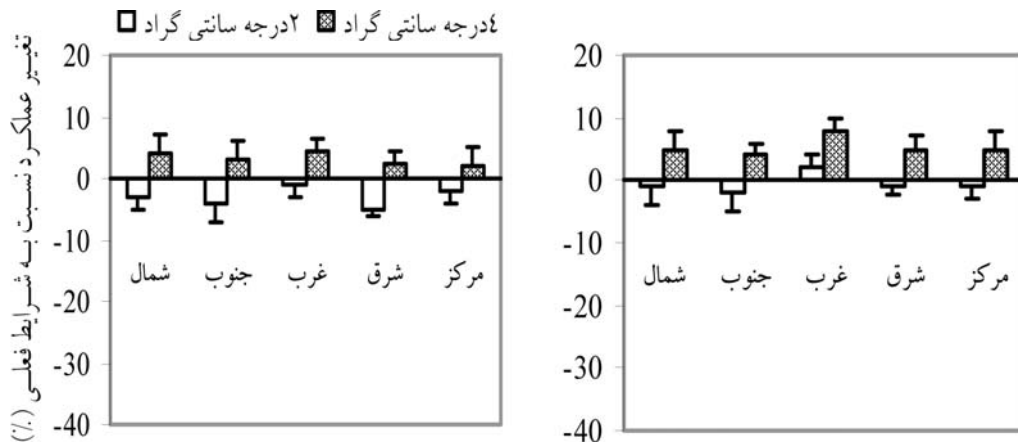
درجه سانتی گراد (ارقام مجازی مقاوم به گرما) شبیه سازی گردید. نتایج نشان داد که افزایش آستانه خسارت تاثیر قابل توجهی بر درصد باروری خوشه‌های گندم خواهد داشت. بطوریکه در درجه حرارت‌های حداکثر روزانه بالاتر از ۳۰ درجه سانتی گراد که فراوانی آنها در زمان گلدهی گندم در شرایط تغییر اقلیم افزایش می‌یابد (شکل ۴)، درصد خوشه‌های بارور در ارقام مقاوم شده در مقابل گرما به میزان قابل ملاحظه‌ای بیشتر از ارقام فعلی خواهد بود (شکل ۷). نتایج شبیه سازی عملکرد (شکل ۸) نشان داد که این راهکار سازگاری عملکرد گندم را در شرایط اقلیمی آینده کشور بسته به منطقه بین ۸ تا ۱۲ درصد افزایش خواهد داد.

نصیری و کوچکی (۴۵) نشان دادند که تغییر تاریخ کاشت و اصلاح ارقام جدید با مقاومت بیشتر به خشکی و درجه حرارت بالا، کاهش عملکرد گندم دیم کشور را در شرایط اقلیمی سالهای ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ میلادی به ترتیب ۱۳ و ۲۱ درصد بهبود خواهد بخشید. مطالعات انجام شده در مورد برنج نیز افزایش مقاومت به درجه حرارت‌های بالا را از طریق اصلاح ارقام جدید بعنوان یکی از راهکارهای سازگاری به تغییر اقلیم تایید کرده است (۱۰، ۶۲).

نتایج این تحقیق نشان داد که در شرایط اقلیمی آینده درجه حرارت در تمامی نقاط تولید گندم کشور بویژه در

تغییر تاریخ کاشت راهکار مدیریتی ساده‌ای است که از انطباق دوره گلدهی گندم با درجه حرارت‌های بالا جلوگیری خواهد کرد. نتایج شبیه سازی عملکرد گندم آبی در مناطق مختلف با تاریخ‌های مختلف کاشت (شکل ۶) نشان می‌دهد که کاشت زودتر گندم بمدت ۱۵ تا ۲۰ روز تاثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد در شرایط تغییر اقلیم خواهد داشت. در واقع افزایش درجه حرارت در ماههای پاییز و زمستان و ابتدای بهار باعث تسریع مراحل نمو گندم شده و کاشت زودتر باعث انطباق گلدهی با درجه حرارت‌های مناسب خواهد شد. در مطالعات مختلف تغییر تاریخ کاشت بعنوان ساده‌ترین و کم هزینه‌ترین راهکار سازگاری مورد تاکید قرار گرفته است (۳۹، ۵۳). نتایج شبیه سازی در مورد برنج (۱۰) نشان داد که کاشت زودتر در شرایط تغییر اقلیم عملکرد را در مقایسه با تاریخ کاشت رایج، ۲۰ تا ۲۷ درصد افزایش خواهد داد.

افزایش مقاومت ارقام گندم به درجه حرارت‌های بالا در زمان گلدهی بعنوان یک برنامه اصلاحی در جهت سازگاری به تغییر اقلیم مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور درجه حرارت آستانه خسارت خوشه چه (Tb در معادله ۶) به میزان ۲ و ۴ درجه سانتی گراد افزایش داده شد. سپس عملکرد گندم با Tb برابر ۳۰ درجه سانتی گراد (ارقام فعلی) و Tb معادل ۳۲ و ۳۴

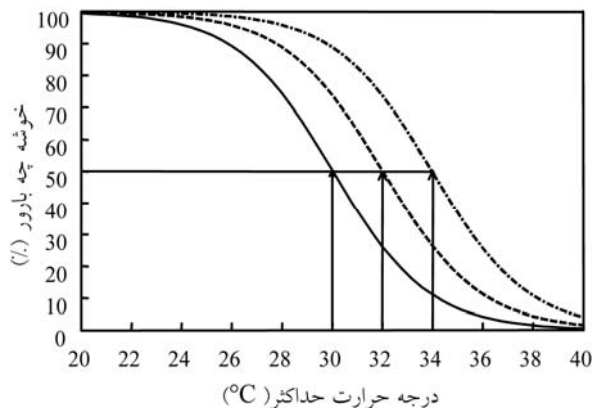


شکل ۷. تاثیر تغییر تحمل ارقام گندم به درجه حرارت های بالا بر درصد خوشه چه های بارور. در شکل درصد خوشه چه های بارور در ارقام رایج فعلی (با آستانه تحمل ۳۰ درجه سانتی گراد) و ارقامی با مقاومت ۲ و ۴ درجه بیشتر مقایسه شده است.

برابر شدن $[CO_2]$ نیز عملکرد گندم را کاهش خواهد داد. شبیه سازی بر اساس پیش بینی مدل‌های گردش عمومی نیز کاهش عملکرد گندم را در شرایط اقلیمی سال ۲۰۵۰ میلادی تایید نمود البته برآورد میزان کاهش با احتساب افزایش $[CO_2]$ تا حدودی کمتر خواهد بود. براساس این نتایج به نظر می‌رسد که افزایش درجه حرارت در زمان تشکیل خوشه چه و گلدهی گندم عامل اصلی کاهش عملکرد در شرایط اقلیمی سال هدف می‌باشد. ارزیابی روشهای سازگاری نشان داد که تغییر تاریخ کاشت و اصلاح ارقام گندم با هدف بالا بردن مقاومت به گرما در زمان گلدهی عملکرد گندم را در شرایط تغییر اقلیم بهبود خواهد داد.

در این مطالعه پتانسیل عملکرد گندم در شرایط تغییر اقلیم مورد ارزیابی قرار گرفت. شواهد موجود حاکی از آن است که تغییر الگوهای بارش در ترکیب با افزایش تبخیر ناشی از گرمایش، نیاز آبی گندم را افزایش داده و لذا تحت این شرایط کمبود آب نیز بعنوان یک عامل محدود کننده عملکرد باید مورد توجه قرار گیرد. از سوی دیگر لازم است تا وضعیت عناصر غذایی خاک بویژه نیتروژن و شیب آفات، بیماریها و علفهای هرز نیز در مطالعات مربوط به پیش بینی عملکرد در شرایط آینده اقلیمی گنجانده شوند. بررسی دقیق سایر راهکارهای سازگاری و ارزیابی آنها در مناطق مختلف بطوریکه در عمل قابل اجرا بوده و بعلاوه از توجیه اقتصادی کافی نیز برخوردار باشند نیازمند مطالعات بیشتر

شرق و جنوب افزایش خواهد یافت. این تغییر درجه حرارت باعث خواهد شد تا فراوانی دماهای بالاتر از ۳۰ درجه سانتیگراد در طی دوره گلدهی گندم نسبت به شرایط فعلی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. از سوی دیگر اگر چه شبیه سازی عملکرد گندم تاثیر مثبت افزایش $[CO_2]$ را تایید نمود ولی افزایش درجه حرارت این اثرات را جبران کرده و بطور کلی گرمایش ناشی از تغییر اقلیم حتی در صورت دو



شکل ۸. تاثیر افزایش مقاومت به گرمای ارقام گندم در مرحله گلدهی (به میزان ۲ و ۴ درجه سانتیگراد) بر عملکرد گندم در مناطق مختلف کشور. تغییرات محاسبه شده عملکرد مربوط به میانگین دو مدل گردش عمومی همراه با انحراف معیار درون هر منطقه می‌باشند که برای شرایط اقلیمی سال ۲۰۵۰ میلادی بدون افزایش CO_2 (چپ) و همراه با افزایش CO_2 (راست) ارائه شده است.

قدردانی

بودجه این تحقیق از اعتبارات پژوهشی فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران تامین شده است که بدینوسیله قدردانی می شود.

است. در نهایت تخمین میزان تولید گندم کشور در شرایط اقلیمی آینده بر اساس سطح زیر کشت و عملکرد پیش بینی شده در شرایط تغییر اقلیم، از اولویت ویژه‌ای برخوردار می باشد.

منابع

- ۱- زارع فیض آبادی، ا.، ع. کوچکی و م. نصیری محلاتی. ۱۳۸۵. بررسی روند ۵۰ ساله تغییرات سطح زیر کشت، عملکرد و تولید غلات در کشور و پیش بینی وضعیت آینده. مجله پژوهشهای زراعی ایران، ۴(۱)، ۴۹-۷۰.
- ۲- کوچکی، ع.، م. نصیری محلاتی، ح. شریفی، ا. زند و کمالی، غ. ۱۳۸۰. شبیه سازی رشد، فنولوژی و تولید ارقام گندم در اثر تغییر اقلیم در شرایط مشهد. مجله بیابان. جلد ۶. شماره ۲. ص. ۱۱۷-۱۲۷.
- ۳- کوچکی، ع.، م. نصیری محلاتی، ا. سلطانی، ح. ر. شریفی، غ. کمالی و پ. رضوانی مقدم. ۱۳۸۲. شبیه سازی تغییرات آب و هوایی ایران در شرایط دو برابر شدن غلظت CO₂ بوسیله مدل‌های عمومی گردش. مجله بیابان. جلد ۸ شماره ۲. ص. ۱۷۸ - ۱۹۰.
- ۴- نصیری محلاتی، م. ۱۳۷۹. مدلسازی فرآیند های رشد گیاهان زراعی. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. ۲۷۴ صفحه.
- 5- Aggarwal, P.K., 2003. Impact of climate change on Indian agriculture. *J. Plant Biol.* 30: 189-198.
- 6- Ainsworth, E.A., and S.P., Long, 2005. What have we learned from 15 years of Free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytol.* 165: 351-372.
- 7- Asseng, S., P.D., Jamieson, B., Kimball, P., Pinter, K., Sayre, J.W., Bowden and S.M., Howden, 2004. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Res.* 85: 85-102.
- 8- Bannayan, M. and N.M.J., Crout, 1999 A stochastic modelling approach for real-time forecasting of winter wheat yield. *Field Crops Research* 62: 85-95.
- 9- Burkart, S., R., Manderscheid and H.J., Weigel, 2004. Interactive effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations and plant available soil water content on canopy evapotranspiration and conductance of spring wheat. *Eur. J. Agron.* 21: 401-417.
- 10- Challinor, A.J., T.R., Wheeler, P.Q., Craufurd, C.A.T., Ferro and D.B., Stephenson, 2007. Adaptation of crops to climate change through genotypic responses to mean and extreme temperatures *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 119: 190-204.
- 11- Challinor, A.J., T.R., Wheeler and J.M., Slingo, 2005. Simulation of the impact of high temperature stress on the yield of an annual crop. *Agric. Forest Meteorol.* 135: 180-189.
- 12- 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. *Agric. Ecosyst. Environ.* 107: 101-116.
- 13- Fahad, M.A., 2002. Possible effects of global warming on agriculture and water resources in Saudi Arabia: impacts and responses. *Clim. Change* 54: 225-245.
- 14- Ferris, R., R.H., Ellis, T.R., Wheeler and P., Hadley, 1998. Effect of high temperature stress at anthesis on grain yield and biomass of field-grown crops of wheat. *Ann. Bot.* 82: 631-639.
- 15- Fuhrer, J., 2003. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agric. Ecosyst. Environ.* 97: 1-20.
- 16- Fulco, L. and A., Senthold, 2006. Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. *Agric. Syst.* 90: 159-179.
- 17- 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. *Agric. For. Meteorol.* 138: 82-92.
- 18- Goudriaan, J. and M.H., Unsworth, 1990. Implication of increasing carbon dioxide and climate change for agricultural productivity and water resources. In: *Impact of carbon dioxide, trace gases and climate change on global agriculture*, pp. 111-129. ASA Special Publication No. 35.
- 19- Goudriaan, 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.
- 20- Gregory, P.J., J.S.I., Ingram and M., Brklacich, 2005. Climate change and food security. *Phil. Trans. Roy. Soc.* 360:

- 2139–2148.
- 21- Guoju, X., Q., Zhang, Y., Yao, H., Zhao, R., Wang, H., Bai and F., Zhang, 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
 - 22- Hadley Centre, 2006. Effects of Climate Change in the Developing Countries. UK Met. Office.
 - 23- Hansen, J., G. Fung, A. Lacis, D., Rind, G. Russel, S. Lebedeff, R. Ruedy and P. Stome, 1988. Global climate change as forecast by GISS 3-D model. *Journal of Geographical Research*, 93: 9341-9364.
 - 24- Horie, T., M. Yajima, and H., Nakagawa, 1992. Yield forecasting. *Agricultural Systems*, 40: 211-236.
 - 25- 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.
 - 26- Ingram, J.S.I., P.J. Gregory, A.-M. Izac, 2008. The role of agronomic research in climate change and food security policy. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 126: 4–12.
 - 27- IPCC, 2007. Summary for Policy Makers. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge.
 - 28- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 881 pp.
 - 29- Jones, P.G. and P.K., Thornton, 2003. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Glob. Environ. Change* 13: 51–59.
 - 30- Kimbal, B.A., K., Kobayashi and M., Bindi, 2002. Responses of agricultural crops to free air CO₂ enrichment. *Adv. Agron.* 77: 293–368.
 - 31- Kirby, E.J.M. 1990. Number of main shoot leaves in wheat as affected by temperature. *Journal of Agricultural Science (Camb.)*, 45: 270-279.
 - 32- Koocheki, A., M., Nassiri, A., Soltani, H., Sharifi, 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.
 - 33- Koocheki A, M., Nassiri, G.A., Kamali and H., Shahandeh, 2006. Potential impacts of climate change on agro-meteorological indicators in Iran. *Arid Land Research and Management*, 20: 245-259.
 - 34- Krishnan, P., D.K. Swain, B. Chandra Bhaskar, S.K. Nayak and R.N. Dash, 2007. Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 122: 233–242
 - 35- Lal, M., K.K., Singh, L., Rathore, G., Srinivasan and S.A., Saseendran, 1998. Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate. *Agric. Forest Meteorol.* 89: 101–114.
 - 36- Lawlor, D.W. and R.A.C. Mitchell, 2000. Crop ecosystem responses to climatic change: wheat. *Climate change and global crop productivity* (eds Reddy, K.R. & Hodges, H.F.), 57-80. CAB International, Cambridge.
 - 37- Long, S.P. and C.J., Bernacchi, 2003. Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations to photosynthesis? Procedures and sources of error. *J. Exp. Bot.* 54: 2393–2401.
 - 38- Long, S.P., E.A., Ainsworth, A.D.B., Leakey, J., Nosberger, and D.R., Ort, 2006. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Science* 312: 1918–1921.
 - 39- Ludwig, F. and S., Asseng, 2006. Impacts and adaptation to climate change in Western Australian wheat cropping systems. *Agric. Syst.* 90: 159–179.
 - 40- Mall, R.K. and P.K., Aggarwal, 2002. Climate change and rice yields in diverse agro-environments of India. I. Evaluation of impact assessment models. *Clim. Change* 52: 315–330.
 - 41- Mall, R.K., M., Lal, V.S., Bhatia, L.S., Rathore and R., Singh, 2004. Mitigating climate change impact on soybean productivity in India: a simulation study. *Agric. Forest Meteorol.* 121: 113–125.
 - 42- Manabe, S. and R.T., Wetherlad, 1987. Large scale changes in in soil wetness induced by an increase in CO₂. *Journal of Atmospheric Science*, 44: 1211-1235.
 - 43- Mendelsohn, R., P., Kurukulasuriya, A., Basist, F., Kogan and C., Williams, 2007. Climate analysis with satellites versus weather station data. *Climatic Change* 81: 71–83.
 - 44- Nassiri, M., A., Koocheki, G.A., Kamali and H., Shahandeh, 2006. Potential impact of climate change on rainfed wheat production in Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science* 52: 113-124.
 - 45- Nassiri, M. and A. Koocheki, 2007. Adapting dryland wheat production systems of Iran to climate change. *Farmin System Design 2007: An International Symposium on Methodologies for Integrated Analysis of Farm Production System*, Italy- Catania, Sicily, pp: 52-54.
 - 46- 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. *Glob. Environ. Change* 14: 53–67.
 - 47- Parry, M., C., Rosenzweig, A., Inglesias, G., Fischer and M., Livermore, 1999. Climate change and world food security: a new assessment. *Global Environ. Change* 9: S51–S67.

- 48- Prasad, P.V.V., K.J., Boote, L.H., Allen Jr., J.E., Sheehy and J.M.G., Thomas, 2006. Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. *Field Crops Res.* 95 (2/3): 398–411.
- 49- Remy, M., B., Stefan, B., Andreas and J.W., Hans, 2003. Effect of CO₂ enrichment on growth and daily radiation use efficiency of wheat in relation to temperature and growth stage. *Eur. J. Agron.* 19: 411–425
- 50- Rosenzweig, C. and F.N., Tubiello, 1997. Impacts of future climate change on Mediterranean agriculture: current methodologies and future directions. *Mitig. Adapt. Strategies Clim. Change* 1: 219–232.
- 51- Sinclair, T.R., Pinter, P.J., B.A. Kimball, F.J. Adamsen, R.L., LaMorte, G.W., Wall, D.J. Hansaker, N. Adam, R.L. Garcia, T., Thompson, S., Leavitt and A. Matthias. 2000. Leaf nitrogen concentration of wheat subjected to elevated [CO₂] and either water or N deficit. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 70: 53-40.
- 52- 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.
- 53- Smit, B., I., Burton, R.J.T., Klein and J., Wandel, 2000. An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Climatic Change* 45 (1): 223–251.
- 54- Stern, N., 2006. Review on the Economics of Climate Change. HM Treasury, London.
- 55- Sutherst, R., R.H.A., Baker, S.M., Coakley, R., Harrington, D.J., Kriticos and H., Scherm, 2007. Pests under global change—meeting your future landlords? In: Candell, J.G. (Ed.), *Terrestrial Ecosystems in a Changing World*. Springer, p. 336.
- 56- Tubiello, F.N., M., Donatelli, C., Rosenzweig and C.O., Stockle, 2000. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. *Eur. J. Agron.* 13: 179–189.
- 57- Tyson, P., E., Odada, R., Schulze and C.I., Vogel, 2002. Regional–global change linkages: Southern Africa. In: Tyson, P., Fuchs, R., Fu, C., Lebel, L., Mitra, A.P., Odada, E., Perry, J., Steffen, W., Virji, H. (Eds.), *Global–regional Linkages in the Earth System*. START/IHDP/IGBP/WCRP. Springer, Berlin, London.
- 58- Van Ittersum, M.K., S.M., Howden and S., Asseng, 2003. Sensitivity of productivity and deep drainage of wheat cropping system in a Mediterranean environment to changes in CO₂, temperature and precipitation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 97: 255–273.
- 59- Van Laar, H.H., J., Goudriaan, and H., Van Keulen, 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.
- 60- Van Oijen, M. and F., Ewert, 1999. The effects of climatic variation in Europe on the yield response of spring wheat cv. Minaret to elevated CO₂ and O₃: an analysis of open-top chamber experiments by means of two crop growth simulation models. *Eur. J. Agron.* 10: 249–264.
- 61- Wheeler, T.R., T.D., Hong, R.H., Ellis, G.R., Batts, J.I.L., Morison, and P., Hadley, 1996. The duration and rate of grain growth, and harvest index, of wheat (*Triticum aestivum* L.) in response to temperature and CO₂. *J. Exp. Botany* 47: 623–630.
- 62- Wheeler, T.R., P.Q., Craufurd, R.H., Ellis, J.R., Porter and P.V., Vara Prasad, 2000. Temperature variability and the annual yield of crops. *Agric. Ecosyst. Environ.* 82: 159–167.
- 63- Wolf, J., 2002. Comparison of two potato simulation models under climate change. I. Model calibration and sensitivity analyses. *Climate Research* 21: 173-186.
- 64- Xiao, G.J., W.X., Liu, Q., Xu, Z.J., Sun and J., Wang, 2005. Effects of temperature increase and elevated CO₂ concentration, with supplemental irrigation, on rain-fed spring wheat yield in semiarid areas of China. *Agric. Water Manage.* 74: 243–255.

Impacts of climate change and CO₂ concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies

A. Koocheki, M. Nassiri

Abstract

The Impact of climate change on irrigated wheat yield in Iran was studied using a simulation model under different climatic scenarios. SUCROS-wheat model which was adapted for the effect of CO₂ concentration on photosynthetic parameters, were calibrated and validated against observed wheat yield obtained from different regions of country. Interaction effect of CO₂ concentration and temperature on wheat yield was simulated at 3 CO₂ concentrations including 350 (current), 550 and 700ppm (doubled) in combination with increasing mean daily temperature by 0 (unchanged), 1, 2, 3 and 4°C. In addition climatic conditions of the year 2050 were predicted by using GISS and GFDL General Circulation Models (GCM) based on IPCC scenarios for the target year. The GCMs were first calibrated by the long term (40 years) weather data from 25 stations located in different wheat production regions across the country. Predicted weather data of GCMs were used as the inputs of simulation model after statistical downscaling and generating daily weather parameters. Wheat yield at different regions was estimated for the climatic conditions of the target year with and without increased CO₂ concentration. Finally adaptation strategies for improving wheat yield under future climate were evaluated by means of simulation model. The results showed that despite of some deviation between the two GCMs, average temperature will be changed in the range of 3.5-4.4°C with an increasing gradient from West to East and North to South of the country. This warming pattern will be led to the higher frequency of temperatures above 30°C during the flowering stage of wheat in the most regions. Increasing CO₂ concentration without warming showed positive effects on wheat yield. However, the effect of CO₂ was compensated for by temperature. Based on simulation results wheat yield was reduced when mean temperature was raised above 3°C even at doubling CO₂ concentration. Predicted wheat yield for the year 2050 indicated that while the effects of higher temperatures was partly moderated by increased CO₂ concentration the overall wheat yield will be decreased by 13-28% in different production regions. Changing planting dates and improvement of new cultivars with higher heat tolerance at flowering were evaluated as the most effective adaptation strategies for the future climate. Simulation results showed that wheat yield reduction at the target year could be prevented considerably with increasing temperature threshold of wheat cultivars at flowering by 2-4 °C.

Key words: Climate change, wheat, CO₂ concentration, heat tolerance, adaptation.