

بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر کشاورزی ایران: ۱- پیش‌بینی وضعیت اگروکلیماتیک آینده

علیرضا کوچکی^{۱*} - مهدی نصیری محلاتی^۱ - لیلا جعفری^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۷/۰۲

چکیده

گرمایش جهانی و پی‌آمدهای ناشی از آن بسیاری از متغیرهای اقلیمی مؤثر در رشد و نمو گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و پاسخ گیاهان به این امر تابع شدت و الگوی تغییرات می‌باشد. در این مطالعه تأثیر تغییر جهانی اقلیم بر شاخص‌های اقلیمی کشاورزی ایران برای سال ۲۰۵۰ میلادی (۱۴۳۰ شمسی) براساس سناریوی استاندارد IPCC توسط دو مدل گردش عمومی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میانگین دمای سالانه مناطق مختلف کشور تا سال هدف بین ۳/۵ تا ۴/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد در حالی که 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. افزایش دما باعث طولانی‌تر شدن فصل رشد به دلیل افزایش تعداد روزهای بدون یخبندان می‌شود. البته کاهش بارش طول فصل خشک را از حدود ۲۰ روز در مناطق غربی تا بیش از ۳۰ روز در جنوب کشور افزایش خواهد داد که این امر به‌ویژه در مناطق کشت دیم از اهمیت بیشتری برخوردار است. افزایش دما همچنین میزان تبخیر و تعرق بالقوه سالانه را در سال هدف بین ۱۸ تا ۳۰ درصد افزایش می‌دهد و در نتیجه تفاوت بین میزان بارش و تبخیر و تعرق بالقوه یا شاخص کمبود بارش به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که عمدتاً به دلیل افزایش میزان تبخیر و تعرق خواهد بود. با وجودی که پی‌آمدهای تغییر اقلیم بر شاخص‌های اگروکلیماتیک تمامی مناطق کشور مؤثر می‌باشد، ولی نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین اثرات منفی به‌ترتیب در جنوب، شرق و مرکز کشور بروز کرده و کمترین اثرات در شمال و شرق کشور ظاهر خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، شاخص کمبود بارش، طول دوره خشکی، طول فصل رشد، گرمایش جهانی

مقدمه

کشاورزی بنا به تعریف عام آن فعالیتی اقتصادی است که در جهت تولید غذا می‌باشد و در نتیجه امنیت غذایی حال و آینده جهان در گرو موفقیت این فعالیت خواهد بود. با وجود تمامی پیشرفت‌های علمی و تکنولوژیکی در زمینه افزایش عملکرد و تولید محصولات زراعی، کشاورزی به شدت به اقلیم وابسته است و از این‌رو، تنوع اقلیمی و تغییرات آن، چه در کوتاه مدت (در طول فصل رشد) و چه در درازمدت، سهم تعیین‌کننده‌ای در موفقیت تولید دارد. به همین دلیل تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر کشاورزی و تولیدات آن مورد توجه جوامع علمی بین‌المللی قرار گرفته است.

افزایش غلظت گاز کربنیک و اثبات نظریه اثر گلخانه‌ای که براساس آن نوع و ترکیب گازهای موجود در اتمسفر به شدت بر دمای کره زمین تأثیر می‌گذارد، حقایق انکارناپذیر هستند که وقوع تغییرات

آینده اقلیمی را محتمل ساخته‌اند (۳۵ و ۴۰). سناریوهای موجود در مورد افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر برآوردهای مختلفی را از تغییرات دمای آینده ارائه کرده‌اند. با وجودی که مقیاس زمانی برآورد در بروز اختلاف بین پیش‌بینی‌ها مؤثر است (۱۰)، ولی مدل‌های مختلف گردش عمومی^۳ افزایش دمای کره زمین برای سال ۲۰۶۰ میلادی را بین ۲ تا ۳/۵ درجه سانتی‌گراد برآورد کرده‌اند (۳۸ و ۴۰). همچنین آخرین گزارش هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)^۴ میانگین افزایش دمای جهان برای سال ۲۰۵۰ را در حدود ۳ درجه سانتی‌گراد و در پایان قرن حاضر حدود ۴/۵ درجه سانتی‌گراد برآورد کرده است (۲۰). چنانچه غلظت گازهای گلخانه‌ای با سرعت فعلی (۱/۹ ppm در سال) افزایش یابد، تقریباً اغلب مدل‌های موجود برای افزایش میانگین دمای کره زمین تا سال ۲۱۰۰ میلادی حدود ۴/۵-۵/۵ درجه سانتی‌گراد است (۵). با وجود عدم قطعیت در این پیش‌بینی‌ها باید به خاطر داشت که چنانچه دمای فعلی تنها یک

۱ و ۲- به‌ترتیب استاد گروه زراعت دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد و مربی گروه باغبانی دانشکده کشاورزی دانشگاه هرمزگان

(Email: akooch@um.ac.ir)

*- نویسنده مسئول:

3- General Circulation Model (GCM)

4- Intergovernmental Panel for Climate Change

در مورد مناطق خشک (۳۸) اجرا شده است. توجه به کشورهای فوق که به‌عنوان نمونه ارائه شده‌اند خلأ این قبیل مطالعات در کشور ایران و ضرورت انجام این مطالعه را به‌خوبی آشکار می‌سازد. پژوهش حاضر در دو بخش و در مقیاس ملی انجام شده است. در بخش اول تأثیر تغییر اقلیم بر شاخص‌های اقلیمی مرتبط با کشاورزی در کشور بررسی شده و در بخش دوم تأثیر شرایط اقلیمی آینده بر رشد و عملکرد برخی محصولات زراعی ایران مطالعه می‌شود. به‌علاوه راه‌کارهای سازگاری به شرایط تغییر اقلیم نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است، بنابراین در نوع خود پژوهشی جامع و کامل محسوب می‌شود.

مواد و روش‌ها

داده‌های اقلیمی: آمار درازمدت هواشناسی شامل مقادیر روزانه دمای حداقل، حداکثر و بارش برای دوره ۴۰ ساله (۱۹۶۵-۲۰۰۵) مربوط به شهرستان‌های اراک، اردبیل، اصفهان، اهواز، آبادان، ایلام، ارومیه، بزم، بوشهر، بندرعباس، بندر انزلی، 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، داده‌های آب و هوایی ۳۴ شهرستان مذکور در دوره ۴۰ ساله به‌عنوان مبنای مورد استفاده قرار گرفت. این ایستگاه‌ها به نحوی انتخاب شده‌اند که پوشش کاملی از نقاط مختلف اقلیمی ایران را فراهم ساخته و معرف وضعیت عمومی کشور باشند. جهت سهولت در ارائه نتایج، این شهرستان‌ها بر حسب موقعیت جغرافیایی به مناطق غربی، شرقی، شمالی، جنوبی و مرکزی گروه‌بندی شدند.

سناریوهای تغییر اقلیم: مجمع بین‌الدول تغییر اقلیم سناریوهای مختلفی را برای پیش‌بینی روند تغییرات اقلیمی در قرن حاضر ارائه کرده است. این سناریوها که بازتابی از مسیرهای توسعه آینده کشورهای جهان می‌باشند بر پایه برخی عوامل اقتصادی-اجتماعی از جمله رشد جمعیت و تغییرات تکنولوژیکی تعریف شده‌اند، به‌طور کلی به سه گروه شامل انتشار کم، متوسط و زیاد گازهای گلخانه‌ای تقسیم شده و به‌ترتیب به سناریوهای A₁f، A₂ و B₁ موسوم‌اند. در سناریوهای A₁f و B₁ غلظت گاز دی‌اکسید کربن تا پایان قرن حاضر به‌ترتیب به ۵۵۰ و ۹۷۰ ppm رسیده و در سناریوی A₂ در حد واسطه این دو مقدار یعنی حدود ۷۶۰ ppm خواهد بود. در این مطالعه از سناریوی A₁f که اصطلاحاً تداوم وضع فعلی^۱ نامیده می‌شود استفاده شد. پیش‌بینی‌های تغییر اقلیم IPCC (۲۰) نشان داده است که حتی با انجام برنامه‌های مربوط به کاهش انتشار گاز کربنیک، افزایش دما و

درجه سانتی‌گراد افزایش یابد، کره زمین به گرم‌ترین دمای خود در طی ۱۰ هزار سال گذشته خواهد رسید (۴۳).

گرمایش جهانی با تأثیر بر چرخه‌های هیدرولوژیکی کره زمین، الگوهای بارش را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد. با وجودی که نتایج اکثر پیش‌بینی‌ها نشان داده است که میانگین بارش جهان در شرایط اقلیمی آینده تا حدودی افزایش می‌یابد (۵)، ولی این افزایش عمدتاً در عرض‌های جغرافیایی شمالی بوده و مناطق خشک و نیمه خشک جهان با کمبود جدی بارش مواجه خواهند بود (۴۲). از آنجا که تقریباً تمامی شاخص‌های اقلیمی مرتبط با کشاورزی براساس دما و بارش محاسبه می‌شوند، تغییرات اقلیمی آینده با تأثیر بر این شاخص‌ها شرایط رشد و نمو گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار خواهند داد.

در مقیاس منطقه‌ای تکامل اکوسیستم‌های کشاورزی و تنوع آنها در جهان تابع اقلیم است، در حالی که در مقیاس کوچکتر تغییرات درون فصلی و بین فصلی، رشد و نمو گیاهان توسط شرایط آب و هوایی کنترل می‌گردد (۳۶). براین اساس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بروز هرگونه تغییر احتمالی اقلیمی در آینده، تولیدات کشاورزی را در سطوح مختلف دستخوش تغییرات جدی کرده و قادر خواهد بود نظام‌های زراعی فعلی را که تحت شرایط اقلیمی رایج تکامل یافته‌اند، به‌طور قابل ملاحظه‌ای متحول سازد. بدیهی است میزان این تأثیر تابع مستقیمی از شدت تغییرات اقلیمی آینده خواهد بود. مقابله با این تغییرات احتمالی و یافتن راه‌حلی جهت سازگار کردن سیستم‌های فعلی تولید با این تغییرات مستلزم شناخت دقیق علل به‌وجود آورنده این تغییرات و پیش‌بینی احتمال وقوع آنها در آینده می‌باشد. با وجودی که محققین با استفاده از روش‌های برون‌یابی سعی در تعمیم یافته‌های خود در مقیاس جهانی دارند (۴۲)، ولی انجام مطالعات منطقه‌ای به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه از جمله اولویت‌های پژوهشی تعیین شده توسط سازمان‌های بین‌المللی می‌باشد.

مطالعات مربوط به تغییر اقلیم در کشورهای مختلف بسته به هدف مطالعه در ابعاد مختلفی اجرا شده‌اند. گروهی از این تحقیقات به پی‌آمدهای تغییر اقلیم بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی مختلف پرداخته‌اند که از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به تأثیر تغییر اقلیم بر ذرت (*Zea mays* L.) و گندم (*Triticum aestivum* L.) (۳) چاودار (*Secale cereal* L.) (۷)، سیب زمینی (*Solanum tuberosum* L.) و جو (*Hordeum vulgare* L.) (۱۸)، گیاهان ریشه و غده‌ای (۳۲)، اشاره کرد.

گروه دیگر از مطالعات بر تأثیر تغییر اقلیم بر تولیدات کشاورزی در مقیاس ملی (یک کشور خاص) تمرکز دارد که نمونه‌هایی از آنها در طی چند دهه‌ی اخیر در کشورهای آلمان (۸)، هند (۱)، مصر (۱۱)، (۴۸)، اسپانیا (۱۷)، آمریکا، کانادا و استرالیا (۱۷) چین (۲۷)، زیمبابوه (۳۰)، قزاقستان (۳۳)، ایتالیا (۳۴) عربستان سعودی (۱۳) و نیز تحقیقات در مقیاس وسیع‌تر در سطح اروپا (۱۲) و یا در مقیاس جهانی

1- Baseline

2- Business as usual

طول فصل رشد: طول فصل رشد (تعداد روزهای بدون یخبندان) در ایستگاه‌های مختلف در شرایط حاضر (میانگین داده‌های ۳۰ ساله) و در شرایط تغییر اقلیم برای سال ۲۰۵۰ میلادی براساس نتایج مدل گردش عمومی محاسبه شد. بنا به تعریف طول فصل رشد بالقوه محصولات زراعی عبارتست از فاصله بین آخرین یخبندان بهاره و اولین یخبندان پاییزه، این دوره برای هر گونه‌ی گیاهی اختصاصی بوده و به حداقل دمای رشد آن (صفر پایه) بستگی خواهد داشت.

طول دوره خشکی: طول دوره خشکی در ایستگاه‌های تحت بررسی براساس تعداد روزهایی که میزان بارندگی کمتر از تبخیر و تعرق باشد برای سال ۲۰۵۰ میلادی محاسبه و با طول این دوره در شرایط اقلیمی فعلی مقایسه شد. به این منظور منحنی‌های آمبروترمیک برای ایستگاه‌های مختلف در شرایط فعلی (میانگین دراز مدت) و سال هدف ترسیم و برای تعیین طول فصل خشک مورد استفاده قرار گرفت.

شاخص کمبود بارندگی در این مطالعه جهت محاسبه کمبود بارندگی تحت شرایط فعلی و تغییر اقلیم از تفاضل میزان بارندگی روزانه (P بر حسب میلی‌متر) و تبخیر و تعرق بالقوه روزانه (PET بر حسب میلی‌متر در روز) استفاده شد. مجموع این تفاضل در طی فصل رشد نشان‌دهنده کمبود میزان بارندگی و شاخصی از شدت تنش وارد شده بر گیاهان می‌باشد (۴۶). میزان تبخیر و تعرق بالقوه روزانه براساس روش پنمن-مونتیت فائو (۲) تعیین شد. میزان تابش روزانه برای محاسبه PET در هر ایستگاه به روش ارائه شده توسط خودریان (۱۴) محاسبه گردید.

نتایج و بحث

تغییرات دما

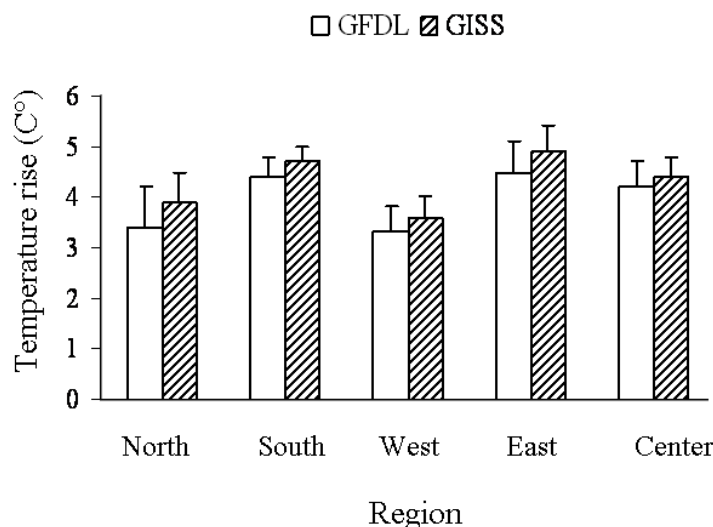
میانگین افزایش سالانه دما براساس پیش‌بینی دو مدل گردش عمومی برای مناطق مختلف کشور (شکل ۱) نشان داد که شدت این تغییر در محدوده ۴/۵-۳/۵ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. البته مدل GISS در مقایسه با مدل GFDL تا حدودی افزایش دمای بیشتری را برآورد کرده است. اختلاف در پیش‌بینی‌های اقلیمی با انواع مختلف GCM که ناشی از فرضیات به‌کار 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 (۳۷). به‌علاوه نتایج نشان می‌دهد که در شرایط اقلیمی آینده افزایش دما جهت دار بوده به این صورت که از غرب به شرق و از شمال به جنوب کشور تشدید خواهد شد.

پی‌آمدهای ناشی از آن تا سال ۲۰۵۰ میلادی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود، بنابراین، در تحقیق حاضر سال ۲۰۵۰ میلادی (۱۳۳۰ شمسی) به‌عنوان سال هدف در نظر گرفته شده است.

دو مدل گردش عمومی GFDL^۱ (۲۹) و GISS^۲ (۱۶) به‌منظور پیش‌بینی تغییرات آینده اقلیمی مورد استفاده قرار گرفت. هر دو مدل براساس سناریوی IPCC (۲۰) برای سال ۲۰۵۰ میلادی (غلظت CO₂ معادل ۵۲۰ ppm) واسنجی شدند. در مقیاس وسیع، مدل‌های گردش عمومی قادرند تا به سهولت میانگین مهمترین خصوصیات اقلیمی را در شرایط آینده شبیه‌سازی کنند. البته یکی از معایب این مدل‌ها پایین بودن قدرت تفکیک مکانی آنهاست. در بهترین حالت قدرت تفکیک مکانی این مدل‌ها ۲/۵ درجه طول و عرض جغرافیایی است، بنابراین استفاده از نتایج آنها به‌طور مستقیم در مقیاس منطقه‌ای و محلی چندان رضایت‌بخش نمی‌باشد. در نتیجه لازم است تا خلأ بین مقیاس بزرگ که محدوده عمل مدل‌ها است و مقیاس منطقه‌ای که جهت ارزیابی مورد نیاز است به‌نحوی پر شود. محققین روش‌های مختلفی را برای این منظور ارائه کرده‌اند که رایج‌ترین آنها تغییر مقیاس آماری^۳ است که در این مطالعه نیز مورد استفاده قرار گرفت. جزئیات مربوط به نحوه‌ی استفاده از مدل‌های فوق در ایران و نیز تغییر مقیاس آماری نتایج حاصل از پیش‌بینی آنها توسط کوچکی و همکاران (۲۲ و ۲۳) ارائه شده است.

شاخص‌های اقلیمی کشاورزی

دما و بارش: در هنگام استفاده از مدل‌های گردش عمومی و قبل از شبیه‌سازی وضعیت آینده لازم است که مدل به‌صورت شاهد اجرا شود. شاهد در واقع معرف وضعیت فعلی (قبل از شروع تغییرات اقلیمی) است و اصطلاحاً دوره‌ی مبنا نامیده می‌شود. بر این اساس مدل‌ها در دوره‌ی مختلف اقلیمی (دوره‌ی مبنا: ۲۰۰۵-۱۹۶۵) و سناریوی سال ۲۰۵۰ میلادی اجرا شدند. اختلاف بین شبیه‌سازی آینده و شرایط فعلی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های گردش عمومی محاسبه و به مقادیر داده‌های مبنا اضافه شدند تا شرایط اقلیمی آینده برآورد گردد. به این ترتیب اساس مدل‌های گردش عمومی میانگین ماهانه دما و بارش را بر حسب میزان تغییر نسبت به شرایط فعلی و تابش خورشیدی را بر حسب درصد تغییر نسبت به شرایط فعلی تعیین می‌کنند. جهت تبدیل داده‌های ماهانه به روزانه از یک نرم افزار تولیدکننده داده‌های آب و هوایی استفاده شد. مطالعات قبلی (۲۳) نشان داده است که تأثیر تغییر اقلیم بر میزان تابش ورودی در ایستگاه‌های مختلف کشور ناچیز می‌باشد.



شکل ۱- میانگین پیش‌بینی شده افزایش سالانه دما برای سال ۲۰۵۰ میلادی در مناطق مختلف کشور به وسیله دو مدل گردش عمومی خطوط عمودی انحراف معیار درون هر منطقه را نشان می‌دهند.

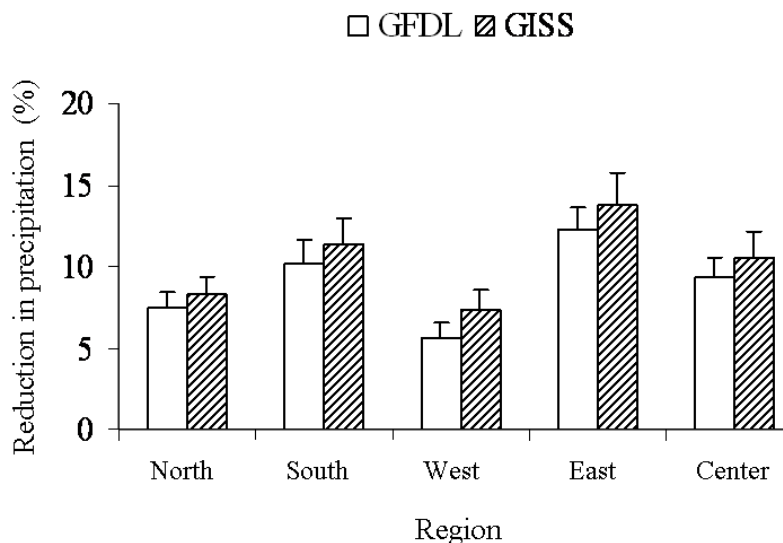
Figure 1- Predicted increase in mean annual temperature for year 2050 in different regions across the country using two general circulation models. Vertical bars show SE within each region.

پیش‌بینی دو مدل گردش عمومی مشاهده شد. در ادامه محاسبات براساس پیش‌بینی مدل GFDL ارائه شده است. براساس این نتایج شدت کاهش بارندگی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور بارزتر از مناطق مرطوب می‌باشد. کوچکی و همکاران (۲۲) نیز با استفاده از مدل گردش عمومی UKMO برای سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ میلادی شیب تغییرات شمال به جنوب و غرب به شرق، کاهش میزان بارش و افزایش دما در ایران را گزارش کرده و نشان دادند که کاهش بارندگی در ماه‌های فصل پاییز و زمستان بیشتر از کاهش بارندگی در ماه‌های فصل بهار و تابستان (در مناطقی که دارای بارندگی تابستانه هستند) خواهد بود. تغییر الگوهای بارش یکی از بارزترین پی‌آمدهای پدیده تغییر اقلیم در سراسر جهان است. با این حال شدت تغییرات بسته به مناطق جغرافیایی مختلف متغیر است. برای مثال تغییرات پیش‌بینی شده بارش تقریباً در مورد بیشتر مناطق قاره آمریکا و آسیا و بخشی از کانادا و استرالیا منفی بوده در حالی که اغلب مناطق قاره اروپا تغییرات مثبتی را به‌صورت افزایش میزان نزولات سالانه تجربه خواهند کرد (۱۲). به‌طور کلی نتایج برآوردهای موجود حاکی از آن است که نقاط خشک و نیمه‌خشک جهان، خشک‌تر خواهند شد. لو و همکاران (۲۸) میزان کاهش بارش در بخش‌های مختلف استرالیا را براساس چند سناریوی تغییر اقلیم برای سال ۲۰۸۰ میلادی بین ۹ تا ۳۲ درصد برآورد کرده‌اند.

نتایج ارائه شده در شکل ۱ میانگین سالانه افزایش دما می‌باشد، کوچکی و همکاران (۲۴) با محاسبه تغییرات ماهانه دما نشان دادند که شدت افزایش دما در ماه‌های زمستان بیشتر از سایر ماه‌های سال است. افزایش دما به‌عنوان اصلی‌ترین پی‌آمد تغییر اقلیم پدیده‌ای قطعی در تمامی مناطق جهان محسوب می‌شود. براساس گزارش IPCC (۲۰) میانگین دمای جهان با سناریوی تداوم وضع فعلی تا سال ۲۰۵۰ میلادی بین ۱/۶ تا ۲/۵ درجه سانتی‌گراد و تا پایان قرن حاضر ۲/۴ تا ۶/۴ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. البته شدت افزایش دما و توزیع فصلی آن و در نتیجه اثرات آن بر رشد و نمو گیاهان زراعی در مقیاس منطقه‌ای نوسانات شدیدی خواهد داشت (۶). برای مثال ژائو و همکاران (۴۷) افزایش میانگین دمای سالانه کشور چین را برای سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ به ترتیب ۱/۷ و ۲/۲ درجه سانتی‌گراد برآورد کرده در حالی که لو و همکاران (۲۸) افزایش دمای مناطق مختلف استرالیا را برای سال ۲۰۸۰ بین ۱/۱ تا ۴/۳ درجه پیش‌بینی کرده‌اند.

تغییرات بارش

نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل‌های گردش عمومی کاهش بارندگی در سال ۲۰۵۰ را نسبت به شرایط فعلی برای تمامی مناطق کشور تأیید می‌کند (شکل ۲) و میزان این کاهش که در دامنه ۷ تا ۱۴ درصد قرار دارد دارای شیب مکانی مشابه تغییرات گزارش شده برای دما می‌باشد. در مورد بارش نیز نظیر دما تفاوت‌هایی بین



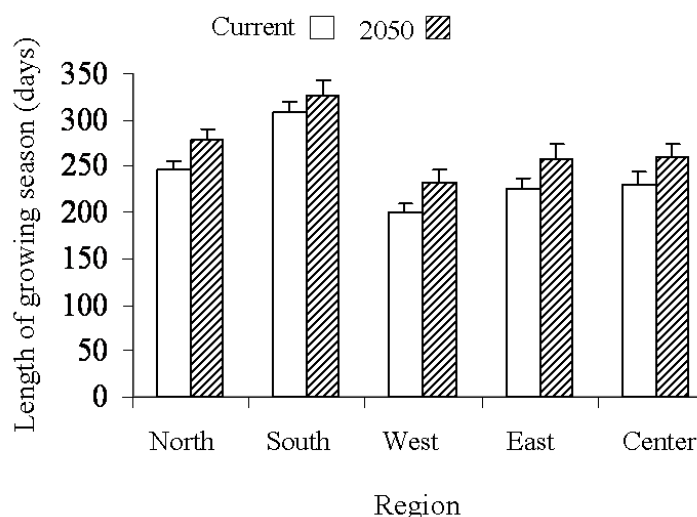
شکل ۲- میانگین پیش‌بینی شده کاهش میانگین سالانه بارش برای سال ۲۰۵۰ میلادی در مناطق مختلف کشور به‌وسیله دو مدل گردش عمومی خطوط عمودی انحراف معیار درون هر منطقه را نشان می‌دهند.

Figure 2- Predicted decrease in mean annual precipitation for year 2050 in different regions across the country using two general circulation models. Vertical bars show SE within each region.

طول فصل رشد

طول فصل رشد براساس تعداد روزهای فاقد یخبندان (روزهای مناسب جهت رشد محصولات زراعی) با احتمال ۷۵ درصد برای مناطق مختلف کشور براساس میانگین درازمدت فعلی و نیز سال ۲۰۵۰ میلادی محاسبه شد (شکل ۳).

نتایج این تحقیق نیز نشان می‌دهد که الگوی مکانی تغییرات بارش در سال ۲۰۵۰ میلادی تا حد زیادی مشابه الگوی تغییرات دما می‌باشد. بنابراین مناطقی که کاهش بارندگی بیشتری دارند با افزایش دمای بیشتری نیز مواجه خواهند بود. بروز همزمان این دو پدیده بسیاری از شاخص‌های آگروکلیماتیک را تحت تأثیر قرار خواهد داد.



شکل ۳- میانگین فعلی و پیش‌بینی شده طول فصل رشد برای سال ۲۰۵۰ میلادی در مناطق مختلف کشور به‌وسیله مدل گردش عمومی GFDL خطوط عمودی انحراف معیار درون هر منطقه را نشان می‌دهند.

Figure 3- Current and predicted length of growing season for year 2050 in different regions across the country using GFDL general circulation model. Vertical bars show SE within each region.

این یافته‌ها به‌وضوح نشان‌دهنده طولانی‌تر شدن فصل رشد و کاهش تعداد روزهای فاقد یخبندان در تمامی ایستگاه‌های تحت بررسی در این مطالعه است. این نتایج با توجه به تأخیر در تاریخ وقوع اولین یخبندان پاییزه و جلو افتادن تاریخ آخرین یخبندان بهاره دور از انتظار نمی‌باشد.

در بخش‌های جنوبی کشور که در شرایط فعلی نیز تمام سال فصل رشد بوده و تقریباً فاقد دوره یخبندان می‌باشد (برای مثال، بوشهر یا بندرعباس) افزایش طول فصل رشد اندک و در حدود ۱۸ روز می‌باشد در حالی که در مناطق سردسیر غرب و شمال غرب کشور (برای مثال اردبیل که طول فصل رشد آن در حال حاضر حدود ۱۶۰ روز است) تغییر اقلیم طول فصل رشد را تا ۳۳ روز افزایش خواهد داد. بنابراین به نظر می‌رسد که تحت این شرایط حتی در نقاط بسیار سرد کشور نیز طول فصل رشد جهت کشت برخی محصولات زراعی که در حال حاضر امکان رشد آنها وجود ندارد، فراهم گردد. با وجودی که افزایش میانگین دمای سالانه بهترین متغیر جهت پیش‌بینی طول فصل رشد در شرایط تغییر اقلیم می‌باشد، کوچکی و همکاران (۲۲) نشان دادند که افزایش میانگین دما فصل پاییز عامل اصلی افزایش طول فصل رشد کشور در شرایط تغییر اقلیم می‌باشد.

شواهد متعدد در بسیاری از نقاط جهان از جمله استرالیا (۱۹) و چین (۲۷) و کشورهای قاره اروپا (۳۱) همگی طولانی‌تر شدن فصل رشد گیاهان زراعی را در شرایط آینده اقلیمی تأیید کرده است. با این حال شدت تغییر طول فصل رشد بسته به منطقه، سناریوی تغییر اقلیم، مدل گردش عمومی استفاده شده و نیز فاصله زمانی پیش‌بینی (برای مثال سال ۲۰۵۰ یا ۲۱۰۰ میلادی) متفاوت می‌باشد (۵). تأثیر تغییر اقلیم بر افزایش طول فصل رشد در عرض‌های جغرافیایی بالا نظیر کانادا یا شمال انگلستان (اسکاتلند) که کوتاه بودن طول فصل رشد محدودیت مهمی جهت کشت برخی گیاهان زراعی محسوب می‌شود بسیار بارزتر است. برای مثال در حال حاضر در کانادا گندم تا عرض جغرافیایی ۵۵ درجه شمالی کشت می‌شود در حالی که پیش‌بینی شده که تا سال ۲۰۵۰ میلادی به دلیل گرمایش جهانی این منطقه به عرض ۶۵ درجه شمالی برسد (۳۶). کوچکی و همکاران (۲۵) نیز با شبیه‌سازی رفتار گلدهی زعفران (*Crocus sativus* L.) در واکنش به افزایش دما نشان دادند که با شدت یافتن تغییرات اقلیمی، کشت این گیاه در مناطق شمالی استان خراسان نیز امکان‌پذیر خواهد بود.

طول فصل خشک

در شکل ۴ منحنی‌های آمبروترمیک برای دو ایستگاه واقع در

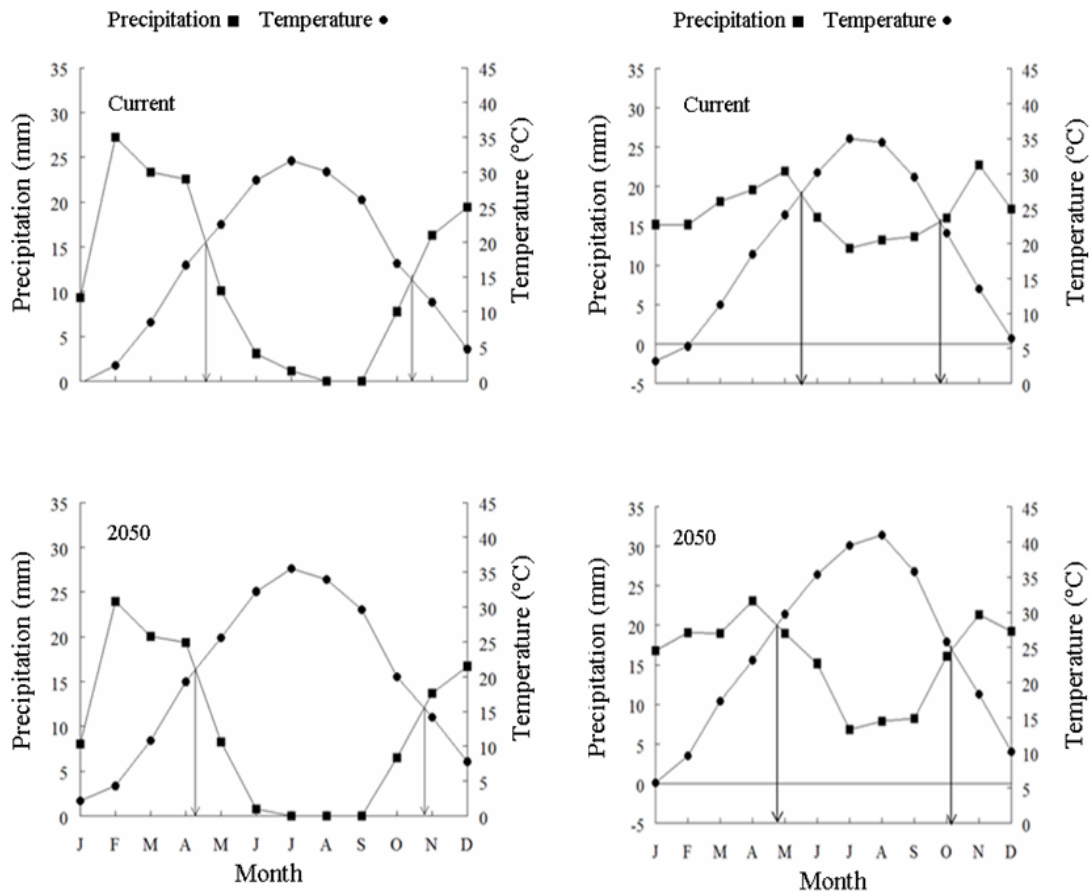
شرق (مشهد) و غرب (تبریز) کشور نشان داده شده است. این نتایج افزایش طول دوره خشکی را در هر دو شهرستان تأیید می‌کند، البته شدت افزایش طول فصل خشک در شرق به مراتب بیشتر از غرب می‌باشد به‌علاوه سطح محصور بین دو منحنی دما و بارش که نشان‌دهنده شدت خشکی است در هر دو منطقه و البته با شدت بیشتری در شرق کشور افزایش یافته است. این وضعیت که ناشی از افزایش دما (شکل ۱) و کاهش بارش (شکل ۲) می‌باشد، در تمامی شهرستان‌های تحت بررسی با شدت‌های مختلف قابل تشخیص می‌باشد.

باید توجه داشت که افزایش طول فصل رشد بدون فراهمی آب مزیتی برای رشد بهتر گیاهان زراعی به‌همراه نخواهد داشت و بر همین اساس کوچکی و همکاران (۲۲) نشان دادند که طول واقعی فصل رشد، یعنی طول دوره بدون یخبندان به شرط دسترسی به ذخیره کافی آب در خاک، در شرایط اقلیمی آینده در اغلب مناطق کشور کاهش می‌یابد که به نوبه خود محدودیت بیشتری برای محصولات دیم خواهد بود. مطالعات در مقیاس جهانی نیز نشان داده است که تغییرات آینده اقلیمی با تأثیر بر میزان دما و بارندگی، استعداد کشاورزی در مناطق مختلف را از طریق تغییر طول واقعی فصل رشد با احتساب دوره خشکی تحت تأثیر قرار خواهند داد (۳۱).

در شکل ۵ که افزایش منطقه‌ای طول فصل خشک را در شرایط اقلیمی آینده نسبت به حال حاضر نشان می‌دهد نیز مجدداً شیب تغییرات شمال به جنوب و شرق به غرب که قبلاً به آن اشاره شد مشهود می‌باشد و به‌طور کلی افزایش طول دوره خشکی در دامنه‌ای بین ۲۱ روز در غرب تا ۳۰ روز در جنوب کشور قرار دارد.

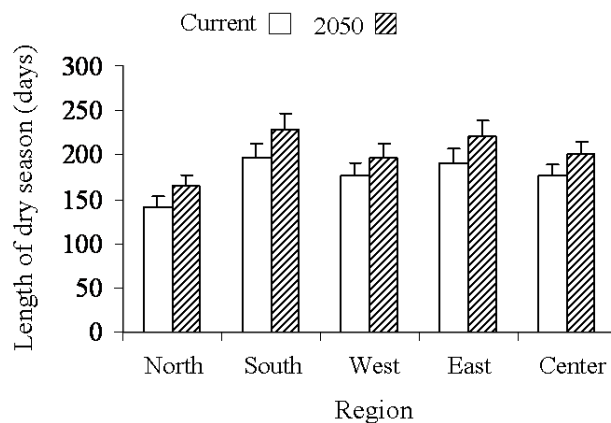
تغییر طول دوره خشکی در شرایط تغییر اقلیم برای اکثر مناطق نیمه خشک جهان از جمله استرالیا (۱۹)، چین (۴۴) و بخش‌هایی از آمریکا (۱۷) گزارش شده است. افزایش طول دوره خشکی در مناطق دیم از اهمیت بیشتری برخوردار است زیرا طولانی شدن این دوره باعث تخلیه ذخیره رطوبت خاک قبل از تکمیل دوره رشد شده و احتمال مصادف شدن مراحل حساس نموی گیاهان با خشکی را افزایش می‌دهد (۴).

نتایج این تحقیق نیز نشان می‌دهد که مناطق مهم کشت دیم کشور (شکل ۶) در شرایط اقلیمی آینده با چنین وضعیتی مواجه خواهند بود. شواهد موجود حاکی از آن است که افزایش طول فصل رشد در نواحی شمالی کانادا و به‌طور کلی عرض‌های بالا به‌دلیل افزایش دما و کاهش طول واقعی فصل رشد در عرض‌های میانه (نواحی خشک و نیمه خشک) عمدتاً ناشی از کاهش میزان بارش می‌باشد (۹ و ۴۲).



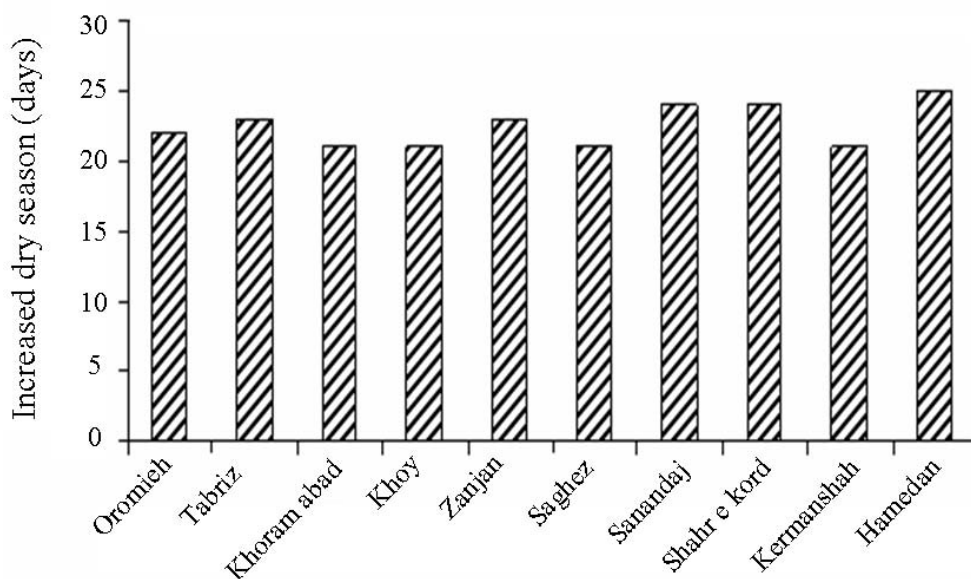
شکل ۴- منحنی‌های آمبروترمیک مشهد (چپ) و تبریز (راست) برای شرایط فعلی و سال ۲۰۵۰ میلادی. داده‌های مربوط به شرایط فعلی براساس میانگین دراز مدت بارش و دما و داده‌های سال ۲۰۵۰ بر مبنای پیش‌بینی مدل GFDL می‌باشند. پیکان‌های عمودی شروع و پایان فصل خشک را نشان می‌دهند.

Figure 4- Ambrothermic curves of Mashhad (left) and Tabriz (right) for current conditions and year 2050. Current trend are calculated from long term means of temperature and precipitation data and for 2050 based on predictions of GFDL model. Arrows show start and end of dry season.



شکل ۵- میانگین فعلی و پیش‌بینی شده طول فصل خشک در مناطق مختلف کشور در سال ۲۰۵۰ میلادی پیش‌بینی شده به وسیله مدل گردش عمومی GFDL، خطوط عمودی انحراف درون هر منطقه را نشان می‌دهند.

Figure 5- Current and predicted length of dry season for year 2050 in different regions across the country using GFDL general circulation model. Vertical bars show SE within each region.



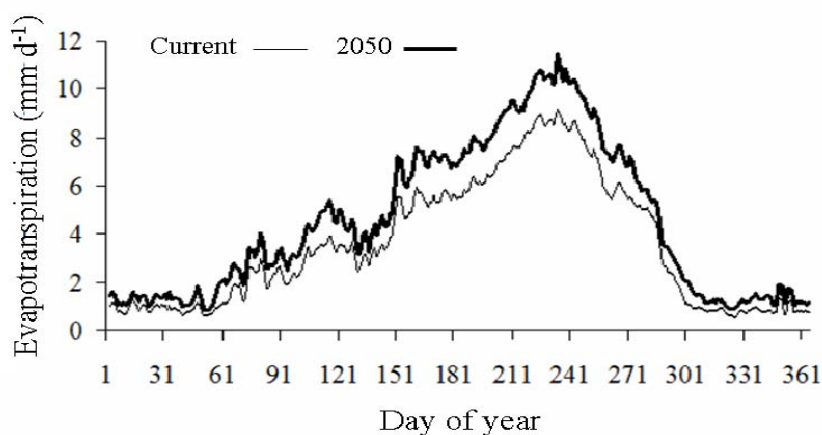
شکل ۶- افزایش پیش‌بینی شده طول فصل خشک در سال ۲۰۵۰ میلادی نسبت به شرایط فعلی در برخی مناطق دیم کشور به‌وسیله مدل گردش عمومی GFDL

Figure 6- Predicted increase in the length of dry season for year 2050 compare to current conditions in the main rainfed production regions of the country, changes were predicted using GFDL model.

عمده آن مربوط به ماه‌های بهار و تابستان می‌باشد. میانگین افزایش تبخیر و تعرق بالقوه در در شمال، جنوب، غرب، شرق و مرکز کشور به‌ترتیب معادل ۲۰، ۳۲، ۱۸، ۲۹ و ۲۴ درصد برآورد گردید که از روند پیش‌بینی شده برای افزایش دما تبعیت دارد.

شاخص کمبود بارش

در شکل ۷ مقادیر روزانه تبخیر و تعرق بالقوه مشهد در شرایط فعلی با سال ۲۰۵۰ میلادی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان‌دهنده ۲۷ درصد افزایش تبخیر تعرق سالانه در اثر افزایش دما است که بخش



شکل ۷- مقادیر روزانه تبخیر و تعرق بالقوه مشهد در شرایط فعلی و سال ۲۰۵۰ میلادی پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل گردش عمومی GFDL. در محاسبه تبخیر تعرق برای سال ۲۰۵۰ کلیه متغیرهای اقلیمی به‌جز دمای حداقل و حداکثر روزانه مشابه شرایط فعلی در نظر گرفته شده است. جهت مشخص شدن روند تغییرات نتایج به‌صورت میانگین متحرک ۵ روزه نمایش داده شده‌اند، روزهای سال میلادی است.

Figure 7- Daily values of potential evapotranspiration (PET) of Mashhad under current conditions and year 2050 predicted using GFDL model. for calculating PET in 2050 all climatic variables besides max and min daily temperatures were assumed the same as current conditions. The results are presented as 5-day moving average, days of year are Julian.

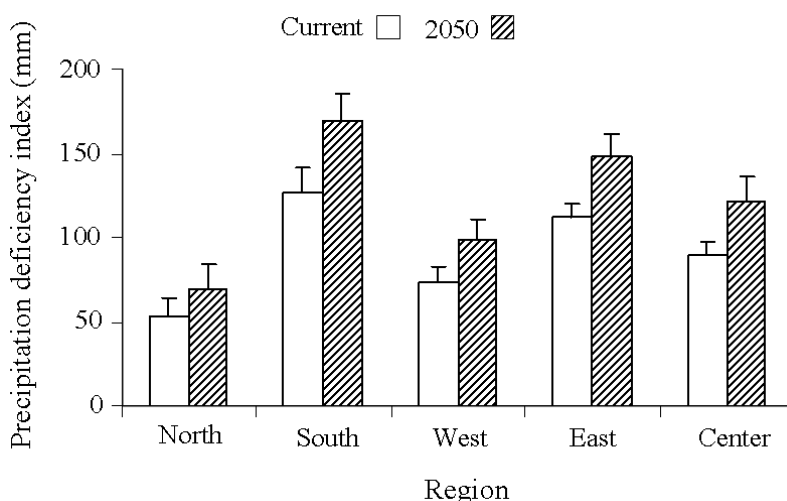
درصد).

چنین پدیده‌ای جهت اکثر مناطق فعلی تولید دیم در شرایط تغییر اقلیم پیش‌بینی شده است. مطالعات انجام شده در استرالیا (۱۹) حاکی از آن است که تأثیر تغییر اقلیم بر کاهش شاخص کمبود بارندگی عمدتاً به دلیل افزایش میزان تبخیر و تعرق بالقوه است. از آنجا که پایین بودن میانگین نزولات سالانه با میانگین بالای تبخیر و تعرق بالقوه همراه است، مناطق خشک جهان را می‌توان براساس نسبت این دو متغیر تقسیم‌بندی کرد، براساس این تقسیم‌بندی بخش عمده مناطق دیم جهان (از جمله سیستم‌های زراعی دیم ایران) در محیط‌هایی قرار دارند که در آنها نسبت میانگین بارش سالانه به میانگین تبخیر و تعرق بالقوه بین ۰/۲ تا ۰/۵ می‌باشد (۳۸).

از سوی دیگر، شواهد موجود حاکی از آن است که پدیده تغییر اقلیم، نسبت فوق را در مناطق خشک و نیمه خشک هم از طریق کاهش میانگین بارش سالانه و هم از طریق افزایش تبخیر و تعرق بالقوه به دلیل افزایش دما، به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد داد. در صورت تحقق چنین تغییراتی، تولید محصولات دیم که در اکثر مناطق خشک و نیمه‌خشک که عمدتاً بر غلات و به‌ویژه گندم استوار است به مخاطره خواهد افتاد (۴۵). بنابراین چنانچه شاخص کمبود بارندگی به میزان پیش‌بینی شده در شرایط تغییر اقلیم برای سال ۲۰۵۰ در مناطق دیم خیز کشور تحقق یابد، بدون تردید بسیاری از مناطق فعلی تولید گندم دیم استعداد خود را جهت این سیستم تولید از دست خواهند داد.

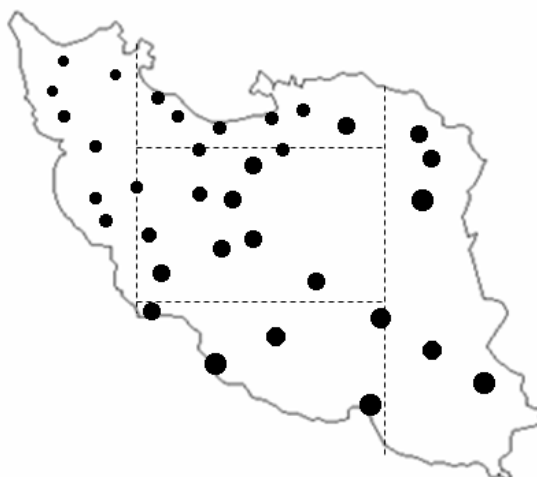
افزایش میزان تبخیر و تعرق به‌عنوان یکی از پی‌آمدهای تغییر اقلیم در آمریکا (۳۳ و ۳۶) و مناطق کشت برنج آسیا (۳۹) نیز پیش‌بینی شده است. البته رودریک و فارکور (۴۱) نشان دادند در صورتی که افزایش دمای حداقل روزانه بیشتر از افزایش دمای حداکثر باشد، تبخیر تعرق چندانی نخواهد کرد، ولی در صورت یکسان بودن افزایش دمای حداقل و حداکثر روزانه در اثر گرمایش جهانی، افزایش این متغیر شدید خواهد بود. به‌طور کلی در عرض‌های جغرافیایی میانه تبخیر به میزان ۵ درصد به‌ازای هر درجه سانتی‌گراد افزایش میانگین دما سالانه، افزایش می‌یابد. بنابراین چنانچه در منطقه‌ای دما ۲ درجه سانتی‌گراد بالاتر برود، تبخیر بالقوه (با فرض عدم تغییر در میزان بارندگی) ۱۰-۹ درصد افزایش می‌یابد. این اثر در مراحل ابتدایی دوره رشد گیاهان زراعی (ابتدای فصل رشد) چندان بارز نیست، ولی در ادامه و در ماه‌های تابستان کمبود رطوبت خاک مشکلات جدی برای رشد گیاهان فراهم خواهد ساخت (۴۶).

میزان تغییر شاخص کمبود بارش در مناطق مختلف کشور که اختلاف میزان بارش و تبخیر و تعرق بالقوه می‌باشد در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که دامنه این شاخص برای سال ۲۰۵۰ میلادی بین ۷۵ تا ۱۷۰ میلی‌متر قرار داشته و در مناطق جنوبی و شرقی کشور بیشتر است. به‌نظر می‌رسد که افزایش شاخص کمبود بارش تا حد زیادی تحت تأثیر افزایش تبخیر و تعرق قرار دارد زیرا میزان کاهش بارش در مناطق جنوبی و شرقی کشور برای سال ۲۰۵۰ به‌ترتیب ۱۲ و ۱۵ درصد پیش‌بینی شد (شکل ۲) که به مراتب کمتر از میزان افزایش تبخیر و تعرق در این مناطق است (به‌ترتیب ۳۲ و ۲۹



شکل ۸- مقادیر فعلی و پیش‌بینی شده شاخص کمبود بارش در مناطق مختلف کشور در سال ۲۰۵۰ میلادی پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل گردش عمومی GFDL. خطوط عمودی انحراف معیار درون هر منطقه را نشان می‌دهند.

Figure 8- Current and predicted values of precipitation deficiency index for year 2050 in different regions across the country using GFDL general circulation model. Vertical bars show SE within each region.



شکل ۹- شدت نسبی پی‌آمدهای تغییر اقلیم در سال ۲۰۵۰ میلادی برای تلفیقی از شاخص‌های مختلف آگروکلیماتیک در مناطق مختلف ایران. محل دایره‌ها موقعیت تقریبی شهرستان‌های بررسی شده در این مقاله و اندازه دایره‌ها شدت نسبی تأثیر تغییر اقلیم را نشان می‌دهد. خطوط مقطع مناطق شمال، جنوب، غرب، شرق و مرکز را براساس فرضیات این تحقیق مشخص می‌کند.

Figure 9- Relative vulnerability of different regions across the country to the predicted climate change for year 2050 based on overall changes in agrolimatic indices. Circles show the location of the studies stations and their size show the relative impacts. North, South, West, East and Central regions as discussed in the paper are separated with broken lines.

خوشه‌بندی مناطق آگروکلیماتیک ایران براساس بیش از ۵۰ متغیر اقلیمی نشان دادند که در صورت تحقق پیش‌بینی‌های اقلیمی، تعداد پهنه‌های اقلیمی-کشاورزی ایران از ۱۲ ناحیه در شرایط فعلی به ۹ ناحیه در سال ۲۰۵۰ میلادی کاهش خواهد یافت. این امر باعث تغییراتی در ساختار نظام‌های زراعی شده به نحوی که علاوه بر کاهش عملکرد، جابه‌جایی مکانی گونه‌های زراعی، احتمال حذف برخی گونه‌ها یا حتی معرفی گونه‌های جدید یا فراموش شده را به دنبال خواهد داشت. مواجهه با این شرایط مستلزم انجام مطالعات وسیع در زمینه تأثیر شرایط اقلیمی آینده بر تولید گیاهان زراعی در کشور و اتخاذ راه‌کارهای مناسب سازگاری می‌باشد.

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.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که تا نیمه‌ی قرن حاضر میلادی پدیده تغییر اقلیم، پی‌آمدهای قابل توجهی را بر بسیاری از شاخص‌های اقلیمی مرتبط با کشاورزی به همراه خواهد داشت. از آنجا که اهمیت هر یک از این شاخص‌ها بر تولید محصولات زراعی بسته به گونه گیاهی، نظام زراعی (دیم/آبی) و سایر شرایط تولید متفاوت می‌باشد، ارزیابی پاسخ گیاهان زراعی به این تغییرات مستلزم انجام مطالعات موردی خواهد بود. با این حال در شکل ۹ نمایی از شدت نسبی عوارض تغییر اقلیم در مناطق مختلف کشور ارائه شده که تلفیقی از کلیه شاخص‌های بررسی شده در این مقاله را شامل می‌شود.

توجه به این شکل مشخص می‌سازد که نواحی جنوبی و شرقی و نیز بخش‌هایی از مرکز کشور تا ۳۰ سال آینده تغییرات اقلیمی شدیدی را تجربه خواهند کرد که بی‌تردید تأثیر قابل توجهی بر بوم نظام‌های زراعی این مناطق خواهد داشت. کوچکی و همکاران (۲۴) با

References

1. Aggarwal, P. K. 2003. Impact of climate change on Indian agriculture. *Journal of Plant Biology* 30: 189-198.
2. Allen, R. G., Pereira, I. S., Raes, D., and Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing requirements. Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO, Rome.
3. Brown, R. A., and Rosenberg, N. J. 1999. Climate change impacts on the potential productivity of corn and winter wheat in their primary United States growing regions. *Climate Change* 41: 73.
4. Calderini, D. F., Savin, R., Abeledo, L. G., Reynolds, M. P., and Slafer, G. A. 2001. The importance of the period immediately preceding anthesis for grain weight determination in wheat. *Euphytica* 119: 199-204.
5. Carson, D. J. 1999. Climate modelling: achievements and prospects. *Quarterly Journal of Royal Meteorological*

- Society 125: 1-28.
6. Challinor, A. J., Wheeler, T. R., and Slingo, J. M. 2005. Simulation of the impact of high temperature stress on the yield of an annual crop. *Agricultural and Forest Meteorology* 135: 180-189.
 7. Chmielewski, F. M., and Köhn, W. 2000. Impact of weather on yield and yield components of winter rye. *Agricultural and Forest Meteorology* 102: 253-261.
 8. 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.
 9. Downing, T. E., Ringlus, L., Hulme, M., and Waughray, D. 1997. *Adapting to climate: Cold Regions*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 809-825.
 10. Easterling, W. E., Weiss, A., Hays, C. J., and Mearns, L. O. 1998. Spatial scales of climate information for simulating wheat and maize productivity: the case of the US Great Plains. *Agricultural and Forest Meteorology* 90: 51-63.
 11. El-Shaer, M. H., Eid, H. M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., and Hillel, D. 1996. Agricultural Adaptation to Climate Change in Egypt. In: J.B. Smith et al. (eds.), *Adapting to Climate Change: An International Perspective* 109-127.
 12. Ewert, F., Rounsevell, M. D. A., Reginster, I., Metzger, M. G., and Leemans, R. 2005. Future scenarios of European agricultural land use. I. Estimating changes in crop productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 107: 101-116.
 13. Fahad, M. A. 2002. Possible effects of global warming on agriculture and water resources in Saudi Arabia: impacts and responses. *Climate Change* 54: 225-245.
 14. Goudiraan, J., and van Laar, H. H. 1993. *Modelling Crop Growth Processes*. Kluwer Academic Press, The Netherlands.
 15. Guereña, A., Ruiz-Ramos, M., D'iaz-Ambrona, C. H., Conde, J. R., and M'inguez, M. I. 2001. Assessment of climate change and agriculture in Spain using climate models. *Agronomy Journal* 93: 237-249.
 16. Hansen, J., Fung, G., Lacis, A., Rind, D., Russel, G., Lebedeff, S., Ruedy, R., and Stome, P. 1988. Global climate change as forecast by GISS 3-D model. *Journal of Geographical Research* 93: 9341-9364.
 17. Hill, H. S. J., Butler, D. B., Fuller, S. W., Hammer, G. L., Holzworth, D. P., Love, H. A., Meinke, H., Mjelde, J. W., Park, J., and Rosenthal, W. 2001. Effects of seasonal climate variability and the use of climate forecasts on wheat supply in the US, Australia and Canada. *American Society of Agronomy, Special Publication 'Impact of El Nino and Climatic Variability on Agriculture*, pp. 101-123.
 18. 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.
 19. Howden, S. M., Reyenga, P. J., and Meinke, H. 1999. Global change impacts on Australian wheat cropping: studies on hydrology, fertiliser management and mixed crop rotations. Report to the Australian Greenhouse Office. CSIRO Wildlife and Ecology, Working Paper 99/13, Canberra.
 20. IPCC. 2007. *Climate Change 2007*. Cambridge University Press, New York.
 21. Izaurralde, C., Norman, R., Rosenberg, J., Brown, R. A., and Thomson, A. M. 2003. Integrated assessment of Hadley Center (HadCM2) climate-change impacts on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States Part II. Regional agricultural production in 2030 and 2095. *Agricultural and Forest Meteorology* 117: 97-122.
 22. Koocheki, A., Nassiri, M., Kamali, G. A., and Shahandeh, H. 2006a. Potential impacts of climate change on agro-meteorological indicators in Iran. *Arid Land Research and Management* 20: 1-15.
 23. Koocheki, A., Nassiri, M., Soltani, A., Sharifi, H., and Ghorbani, R. 2006b. Effects of climate change on growth criteria and yield of sunflower and chickpea crops in Iran. *Climate Research* 30: 247-253.
 24. Koocheki, A., Nassiri, M., and Kamali, G. A. 2007. Agroclimatic indices of Iran under climate change. *Iranian Journal of Field Crops Research* 5 (1): 133-142.
 25. Koocheki, A., Nassiri, M., Alizadeh, A., and Ganjali, M. 2009. Modelling the impact of climate change on flowering behaviour of Saffron. *Iranian Journal of Field Crops Research* 7 (2): 583-594.
 26. Lawlor, D. W., and Mitchell, R. A. C. 2000. Crop ecosystems responses to climatic change: Wheat. In: K.R. Reddy and H.F. Hodges (Eds.), *Climate Change and Global Crop Productivity*. CAB International, Cambridge, pp. 57-80.
 27. Lin, E. D. 1996. Agricultural vulnerability and adaptation to global warming in China. *Water, Air & Soil Pollution*, Kluwer Academic Publishers.
 28. Luo, Q., Williams, M. A. J., Bellotti, W., and Bryan, B. 2003. Quantitative and visual assessments of climate change impacts on South Australian wheat production. *Agricultural Systems* 77: 173-186.
 29. Manabe, S., and Wetherlad, R. T. 1987. Large scale changes in soil wetness induced by an increase in CO₂. *Journal of Atmospheric Science* 44: 1211-1235.
 30. Matarira, C. H., Mwamuka, F. C., and Makadho, J. M. 1996. Adaptive measures for Zimbabwe's agricultural sector. In: J.B. Smith et al. (ed.). *Adapting to Climate Change: An International Perspective* 129-147.
 31. Menzel, A., and Fabian, P. 1999. Growing season extended in Europe. *Nature*, 397: 659.
 32. Miglietta, F., Bindi, M., Vaccari, F. P., Schapendonk, A. H. C. M., Wolf, J., and Butterfield, R. E. 2000. Crop

- ecosystem responses to climatic change: root and tuberous crops. In: Reddy, K.R., Hodges, H.F. (Eds.), *Climate Change and Global Crop Production*. CAB International, Wallingford.
33. Mizina, S. V., Eserkepova, I. B., Pilifosova, O. V., Dolgih, S. A., and Gossen, E. F. 1996. Model based climate change vulnerability and adaptation assessment for wheat yields in Kazakhstan. In: J.B. Smith et al. (Eds.), *Adapting to Climate Change: An International Perspective* 149-163.
 34. Moonena, A. C., Ercoli, L., Mariotti, M., and Masoni, A. 2003. Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years. *Agricultural and Forest Meteorology* 111: 13-27.
 35. New, M., Hulme, M., and Jones, P. 1999. Representing twentieth century space-time climate variability. Part I. Development of a 1961–1990 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climatology* 12: 829-856.
 36. 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.
 37. Parry, M., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Fischer, G., and Livermore, M. 1999. Climate change and world food security: a new assessment. *Global Environmental Change* 9: S51-S67.
 38. Pauw, E., De Göbel, W., and Adam, H. 2000. Agrometeorological aspects of agriculture and forestry in the arid zones. *Agricultural and Forest Meteorology* 103: 43-58.
 39. Peng, S., Laza, R. C., Visperas, R. M., Khush, G. S., Virk, P., and Zhu, D. 2004. Rice: Progress in breaking yield ceiling. In: *Proceeding of the 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia*. Available at <http://www.cropsience.com/icsc2004>.
 40. Reilly, J., Tubiello, F., McCarl, B., Abler, D., Darwin, R., Fuglie, K., Hollinger, S., Izaurrealde, C., Jagtap, S., Jones, J., Mearns, L., Ojima, D., Paul, E., Paustian, K., Riha, S., Rosenberg, N., and Rosenzweig, C. 2003. Agriculture and climate change: new results. *Climatic Change* 57: 43-69.
 41. Roderick, M. L., and Farquhar, G. D. 2004. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *International Journal of Climatology* 24: 1077-1090.
 42. Rosenzweig, C., and Parry, M. L. 1994. Potential impacts of climate change on world food supply. *Nature* 367: 133-138.
 43. Saunders, M. A. 1999. Earth's future climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society London* 357: 3459-3480.
 44. Tao, Z. 1993. Influences of global change on agriculture of China. In: *Climate Biosphere Interactions*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
 45. Tubiello, F. N., Rosenzweig, C., Kimball, B. A., Pintem, P. J., Wall, G. W., Hunsaker, D. J., Lamorte, R. L., and Garcia, R. L. 1999. Testing CERES-Wheat with FACE data: CO₂ and water interactions. *Agronomy Journal* 91: 1856-1865.
 46. Turner, N. C. 2001. Optimizing water use. In: Nosberger, H.A. and P.C. Struik (eds.) *International Crop Science*. CAB International, Wallingford, UK, pp. 119-135.
 47. Xiao, G., Zhang, Q., Yao, Y., Zhao, H., 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. *Agricultural Ecosystem and Environment* 127: 37-42.
 48. Yates, D. N., and Strzepek, K. M. 1998. An assessment of integrated climate change impacts on the agricultural economy of Egypt. *Climate Change* 38: 261-287.

Evaluation of Climate Change Effect on Agricultural Production of Iran: I. Predicting the Future Agroclimatic Conditions

A. Koocheki^{1*} - M. Nassiri Mahallati¹ - L. Jafari²

Received: 10-11-2012

Accepted: 24-09-2013

Introduction

Future climate change may affect agricultural production through changes in both mean and variability of climatic conditions which in turn could affect crop growth and development. Results of many studies have shown that crop production systems of dry regions are more vulnerable to the predicted climate changes (5) and these impacts are mainly due to the effects of increased temperature on agro-climatic variables (4). During the last decade future changes in agro-climatic variables such as growth degree days, length of growth period and duration of dry season have been studied at regional or national scale with different results depending on studied location (1, 6). However, such information are not available for Iran. In this study different agro-climatic indices of Iran across the country are calculated for the target year 2050 based on business as usual scenario and the results are compared with the current conditions.

Materials and Methods

Long term climatic data (1965-2005) of 34 stations covering different climates across the country were used as the baseline for predicting future climate as well as current conditions. Two general circulation models (GISS and GFDL) were used for prediction of climatic variables in the selected stations for the year 2050 based on business as usual (A₁f) scenario of CERES family (2) and the results were statistically downscaled for higher resolution (Koocheki et al., 2006). Daily temperatures (minimum, maximum and mean) and precipitation were generated from the predicted monthly values. Several agro-climatic indices including potential evapotranspiration, length of growing season (time period between the last spring frost and the first autumn frost), length of dry season (time period where evapotranspiration exceeds precipitation which obtained from ombrothermic curve), and precipitation deficiency index (sum of differences between evapotranspiration and precipitation) were calculated based on daily temperature and precipitation. Same indices were also calculated for the current climatic conditions and the results were compared with that of future.

Results and Discussion

The results indicated that mean annual temperature for different regions of the country would increase between 3.5-4.5°C. However, increased temperature predicted by GISS model was larger than GFDL model. This increase is significantly higher than average global temperature rise of 1.6-2.5 °C predicted for 2050 under business as usual scenario (2). Annual precipitation would decrease in the range of 7 to 15% by the target year 2050 furthermore both temperature rise and decreased precipitation showed a North-South and West-East gradient.

Future temperature rise will led to a longer growing season because of increased frost-free days. The results indicated that extended growth period is mainly due to delayed autumn frost and the highest increase in growing period of 33 days was predicted for the most Northern part of the country. However, lower precipitation results to a higher length of dry season ranging from 20 days at East up to 30 days in the South regions of the country. Extended dry period would lead to unfavorable conditions for rainfed cropping systems due to rapid depletion of soil moisture before crop maturity. Annual increase of potential evapotranspiration (PET) by 18-32% follows the same spatial direction as was predicted for temperature rise with the highest increase for South regions. As a result, precipitation deficiency index, which is the sum of differences between rainfall and PET, will increase drastically over the country, mostly due to increased PET or due to an increase in PET. While all of the studied agro-climatic variables would be affected by the future climate changes, our results showed that the highest overall negative effects would be appeared respectively, in the South, East, and central parts of the country while the North and Eastern regions will experience less vulnerability.

1 and 2- Professor, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad and Instructor, Department of Horticulture Sciences, College of Agriculture, Hormozgan University, Respectively.

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

Conclusions

Agricultural production systems of Iran will be faced with new climatic conditions affecting crop growth and development. The results of this research indicated the future changes of main agro-climatic variables. Prediction of these changes effects on crop productivity at national level could be helpful for designing adaptation strategies.

Keywords: Evapotranspiration, Global warming, Length of dry season, Length of growing period, Precipitation deficiency index