



دانشگاه گورگان
فصلنامه علمی پژوهشی

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

جلد بیست و نهم، شماره سوم، ۱۳۹۸

۷۱-۸۷

<http://jopp.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jopp.2019.15046.2347

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و راهکارهای سازگاری به آن بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم آبی (*Triticum aestivum*): مطالعه موردی استان خراسان رضوی

زهرا زینلی مبارکه^۱، * رضا دیهیم فرد^۲ و جعفر کامبوزیا^۳

^۱ دانشجوی دکتری گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران،

^۲ استادیار گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران،

^۳ دانشیار گروه کشاورزی اکولوژیک، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۲/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۴/۳۱

چکیده

سابقه و هدف: در میان محصولات زراعی در ایران، گندم دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد و به‌نظر می‌رسد که نیاز کشور به این محصول در آینده افزایش یابد. از سوی دیگر به‌منظور بهبود کارایی و تاب‌آوری نظام‌های کشاورزی، پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر محصولات زراعی به‌ویژه گندم در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضروری به‌نظر می‌رسد. در همین راستا، هدف از انجام این پژوهش شبیه‌سازی تغییرات عملکرد و کارایی مصرف آب گندم در آینده (۲۰۵۰) تحت اثر تغییرات اقلیمی به‌ویژه افزایش دی‌اکسیدکربن جو^۲ در چهار شهرستان خراسان رضوی، به‌عنوان یک استان گندم‌خیز و ارزیابی اثر تغییر تاریخ کاشت در آینده بر بهبود این تغییرات بود.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش اقلیم آینده (۲۰۵۰) چهار شهرستان خراسان رضوی (قوچان، گناباد، تربت حیدریه و سبزوار) با استفاده از داده‌های اقلیمی بلندمدت مربوط به دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۰)، توسط روش ارائه شده توسط AgMIP و تحت دو سناریوی اقلیمی (RCP4.5 و RCP8.5) شبیه‌سازی شد. مدل گردش عمومی مورد استفاده در این پژوهش MPI-ESM-MR بود و به‌منظور شبیه‌سازی رشد، عملکرد و میزان مصرف آب گندم در طول دوره رشد از مدل APSIM-Wheat استفاده شد. برای محاسبه اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر رشد و نمو گندم در آینده نیز دو سناریوی CC (تغییرات اقلیمی به همراه افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن) و FC (تغییرات اقلیمی در شرایط ثابت در نظر گرفتن دی‌اکسیدکربن در سطح فعلی) در نظر گرفته شد.

یافته‌ها: نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که در آینده در شهرستان‌های مورد مطالعه میانگین دما در طول دوره رشد ۱/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش و میانگین بارندگی ۵/۸۵ درصد کاهش می‌یابد. در سناریوی CC میانگین عملکرد در تمامی شهرستان‌ها، ۴/۹۱ درصد در RCP4.5 و ۴/۷۷ درصد در RCP8.5 افزایش یافت. ولی در سناریوی FC، عملکرد در تمام شهرستان‌های مورد مطالعه به‌جز گناباد کاهشی بوده و میانگین کاهش عملکرد در هر دو RCP به‌ترتیب ۴/۹۸ و ۷/۵۶ درصد بود. علاوه بر آن میانگین کارایی مصرف آب نیز به‌ترتیب در دو سناریوی RCP و در سناریوی CC ۱۲/۲۱ و ۱۵/۳۵ درصد افزایش و در

* مسئول مکاتبه: deihim@sbu.ac.ir

سناریوی FC ۰/۳۳ درصد افزایش و ۰/۴۱ درصد کاهش یافت. هم‌چنین نتایج نشان دادند که تاریخ کاشت دو هفته زودتر از مرسوم در گناباد و سبزوار موجب افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب گندم و در تربت‌حیدریه تاریخ کاشت دو هفته دیرتر از مرسوم موجب جبران کاهش عملکرد در آینده می‌شود.

نتیجه‌گیری: در صورتی‌که تغییرات اقلیمی در آینده با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن همراه باشد اثرات منفی اقلیمی از جمله افزایش دما و کاهش بارندگی بر رشد گندم در شهرستان‌های مورد مطالعه خنثی گردیده و موجب افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب گندم می‌شود. هم‌چنین تغییر تاریخ کاشت در آینده اثرات مثبت تغییر اقلیم در شهرستان‌های مورد مطالعه را افزایش داده و اثرات منفی آن را تعدیل خواهد نمود.

واژه‌های کلیدی: تاریخ کاشت، تغییر اقلیم، APSIM-Wheat, AgMIP

مقدمه

پیش‌بینی شده است که در آینده به دلیل افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و دیگر گازهای گلخانه‌ای، دما افزایش یافته و الگوهای بارندگی تغییر خواهند کرد. از سوی دیگر ثابت شده است که با وجود تمام پیشرفت‌های علمی و فناوری‌های ایجاد شده در زمینه افزایش عملکرد و تولید محصولات زراعی، کشاورزی به‌شدت به اقلیم وابسته بوده و تغییرات اقلیمی در دوره‌های زمانی مختلف، سهم بالایی در موفقیت تولید خواهد داشت (۱۹).

افزایش دما می‌تواند عملکرد را کاهش یا افزایش دهد (۳۸). کاهش عملکرد در اثر افزایش دما می‌تواند به دلیل افزایش سرعت رسیدگی و به دنبال آن کاهش تجمع ماده خشک در طول پر شدن دانه و یا تنش دمایی در طول دوره گلدهی باشد (۳۴ و ۴۵). بر خلاف آن افزایش دما در عرض‌های بالاتر، که طول فصل رشد در حال حاضر محدود است، می‌تواند بر عملکرد گیاه زراعی اثر مثبت داشته باشد. نتایج برخی از مطالعات نشان می‌دهند که اثرات منفی گرمایش اقلیمی ممکن است با اثرات باروری دی‌اکسیدکربن خنثی شود (۲۲ و ۲۶).

انتظار می‌رود که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری علی‌رغم نقش مستقیمی که در تغییرات

اقلیمی دارد، به دلیل افزایش فتوسنتز، کاهش هدایت روزنه‌ای و در نتیجه کاهش تعرق از سطح برگ گیاهان، به‌طور بالقوه موجب افزایش عملکرد و بهره‌وری آب گیاه زراعی شود (۵ و ۱۳). این‌که چه سازوکاری در نهایت عملکرد گیاه زراعی را افزایش داده و تبخیر و تعرق را کاهش می‌دهد در مقیاس‌های بزرگ کم‌تر شناخته شده است (۲۲). اما نتایج بررسی رشد گیاهان زراعی تحت شرایط افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن^۱ (FACE) نشان می‌دهد که میانگین افزایش ۱۳ درصدی عملکرد و کاهش ۵ درصدی در تبخیر و تعرق مورد انتظار است (۱۳). چندین مطالعه دیگر نیز اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب نظام‌های زراعی گندم را ارزیابی کرده‌اند (۴۲ و ۴۷). به‌نظر می‌رسد از آنجایی‌که چندین پارامتر اقلیمی مانند دما، بارش و ساعت آفتابی از جمله عوامل اصلی مؤثر بر نیاز آبی گیاهان می‌باشند، بنابراین هر گونه تغییر در این پارامترهای اقلیمی در اثر تغییرات اقلیمی بر تبخیر و تعرق و در نتیجه کارایی مصرف آب گیاه نیز تأثیرگذار خواهد بود (۲).
بیش‌تر مطالعات برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گیاه زراعی از مدل‌های گیاهی و سناریوهای تغییر اقلیم استفاده می‌کنند (۲۳، ۴۳ و ۴۸). مدل‌های

خواهد یافت. از سوی دیگر نتایج شبیه‌سازی‌های این پژوهش افزایش عملکرد در کل منطقه را نشان دادند به طوری که نسبت میانگین عملکرد گندم زمستانه در دهه ۲۰۷۰ به میانگین عملکرد در دوره پایه، بسته به منطقه، در سناریوی RCP4.5 ۱/۲۹ تا ۱/۳۵ و در سناریوی RCP8.5 ۱/۴۱ تا ۱/۶۴ بود. نتایج یک پژوهش دیگر که در قالب فراتحلیلی انجام شده است نیز نشان داد که در بیش‌تر از ۵۰ درصد از مطالعات اگر تغییرات میانگین دما بیش‌تر از ۲/۳ درجه سانتی‌گراد بوده و یا بارش‌ها در آینده افزایش نیافته باشد، عملکرد گندم در آینده کاهش خواهد یافت اما افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن قادر خواهد بود اثرات دما و نیز کاهش محدود در بارش را جبران کند (۴۶).

هم‌چنین به نظر می‌رسد که راهکارهای سازگاری مانند تغییر تاریخ کاشت برای افزایش عملکرد به همراه افزایش کارایی مصرف آب در مناطق خشک ضروری می‌باشد (۳۲ و ۴۷). تغییر تاریخ کاشت با ایجاد تغییراتی در تقویم زراعی، بر رشد و نمو گندم و نیز شرایط آب خاک در ابتدای فصل رشد و در نهایت بر عملکرد گندم و کارایی مصرف آب مؤثر می‌باشد (۳۷). نتایج پژوهش‌هایی که اثرات تغییر تاریخ کاشت بر عملکرد گندم در اقلیم آینده را بررسی کرده‌اند نشان می‌دهند که این اثرات وابسته به مکان می‌باشند (۱۱ و ۳۵). برای مثال نتایج پژوهش چو و همکاران (۲۰۱۲) در انگلستان نشان داده است که تاریخ کاشت یک ماه زودتر از متداول موجب افزایش عملکرد گندم زمستانه در آینده خواهد شد (۶). لو و همکاران (۲۰۰۹) نیز در پژوهش خود در جنوب استرالیا به این نتیجه رسیدند که در صورت فراهمی آب، تاریخ کاشت زودتر، اثرات منفی تغییر اقلیم بر عملکرد گندم را جبران خواهد کرد (۲۳). در حالی‌که پایمرد و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی در منطقه خراسان نتیجه گرفتند که با وجود تغییرات اقلیمی در آینده، تاریخ کاشت دو هفته تا یک ماه دیرتر از متداول

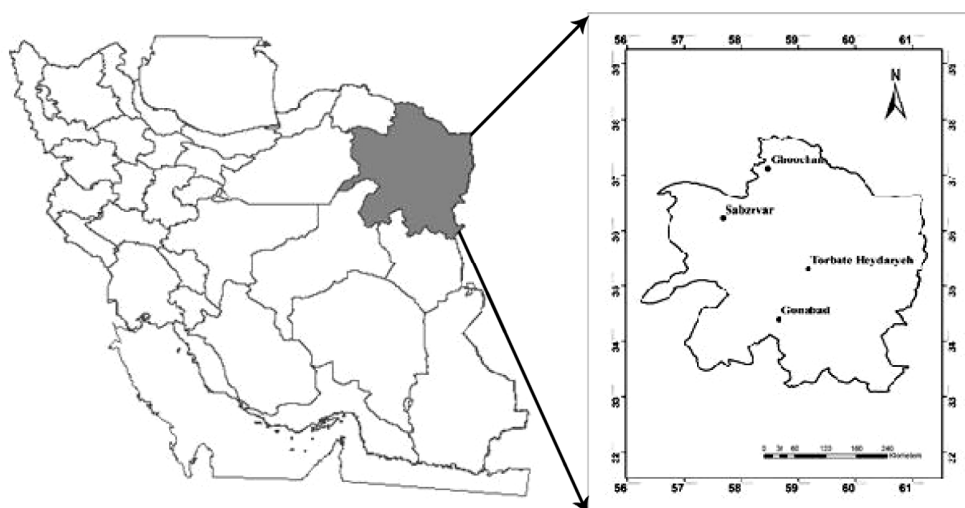
گیاهی پویایی رشد و نمو گیاه زراعی را تعیین کرده و روشی نسبتاً ساده و مقرون به صرفه برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم می‌باشند. مدل‌های مکانیزم‌گرا به ورودی‌های زیادی مانند متغیرهای اقلیمی، ضرایب ژنتیکی ارقام گیاهی، مشخصات خاک و اطلاعات مدیریتی نیاز دارند (۴۶). برای تخمین اقلیم آینده نیز هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) سناریوهای انتشاری فراهم کرده است که از مفروضات مختلف برای تغییرات جمعیت و فن‌آوری در آینده استفاده کرده است. IPCC در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود از سناریوهایی جدید به‌عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای (RCPS)، که بر اساس میزان واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند، استفاده کرده است (۱۶). داده‌های اقلیمی مربوط به آینده توسط مدل‌های گردش عمومی (GCM) برای سناریوهای مختلف تولید می‌شوند و پس از آن عملکردهای گیاه زراعی برای اقلیم آینده و فعلی شبیه‌سازی شده و با هم مقایسه می‌شوند.

مطالعات زیادی در ارتباط با پیش‌بینی عملکرد گندم در آینده و تأثیر تغییر اقلیم بر آن انجام شده است که تعدادی از آن‌ها کاهش عملکرد (۲۰، ۲۶ و ۳۵) و تعدادی نیز افزایش عملکرد (۶، ۲۵ و ۴۰) گندم در آینده را پیش‌بینی کرده‌اند. در پژوهشی در شمال‌شرقی ایالات متحده یک ارزیابی منطقه‌ای از عملکردهای پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۰) و آینده (۲۰۸۵-۲۰۱۵) گندم با استفاده از مدل گیاهی CropSyst و ۱۲ مدل اقلیمی به همراه دو سناریوی RCP انجام شد (۱۸). در این پژوهش پیش‌بینی شد که در دهه ۲۰۷۰ بارندگی در این منطقه برای سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۸ و ۱۲ درصد و میانگین دما در طول دوره رشد گندم زمستانه ۱/۵ و ۲/۳ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده: استان خراسان رضوی با مساحتی در حدود ۱۴۴,۶۸۱ کیلومترمربع در شمال شرقی ایران قرار گرفته است. این مطالعه در چهار شهرستان این استان شامل قوچان، گناباد، سبزوار و تربت حیدریه، واقع در محدوده عرض جغرافیایی $34^{\circ}2'$ و $37^{\circ}4'$ شمالی و طول جغرافیایی $57^{\circ}4'$ و $59^{\circ}1'$ شرقی، انجام شد (جدول ۱، شکل ۱). داده‌های اقلیمی روزانه مربوط به دوره پایه (سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰) از بانک آمار و اطلاعات سازمان هواشناسی دریافت گردید. داده‌های اقلیمی شامل حداقل و حداکثر دما ($^{\circ}C$)، بارندگی (mm) و ساعت آفتابی (h) بودند. از آنجایی که برای شبیه‌سازی توسط مدل‌های گیاهی، تشعشع روزانه ($MJ m^{-2} d^{-1}$) مورد نیاز است، با استفاده از رابطه آنگستروم تعداد ساعت آفتابی به تشعشع روزانه تبدیل شد (۲۹) و سپس داده‌های پرت و گم شده با استفاده از برنامه WeatherMan^۱ اصلاح و بازسازی شدند (۱۴).

موجب جبران اثرات منفی تغییر اقلیم بر عملکرد گندم زمستانه در حالت دیم و آبیاری خواهد شد (۲۸). با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران و اهمیت آب به‌عنوان یکی از عوامل اصلی محدودکننده تولید (۳۱)، انتظار می‌رود که تغییرات اقلیمی در آینده باعث ایجاد تغییرات محسوسی در تولید محصولات اصلی زراعی مانند گندم شوند. در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴، خراسان رضوی با ۱۷۵ هزار هکتار سطح زیر کشت و تولید بیش از ۶۴۷ هزار تن گندم آبی در رتبه سوم کشور از نظر تولید گندم آبی قرار گرفته است (۱). از این‌رو، با توجه به حساسیت این گیاه زراعی به تغییرات اقلیمی (۲۸) هدف از انجام این مطالعه ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد، میزان تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب گندم آبی، در دوره آینده (۲۰۵۰) در چهار شهرستان از استان خراسان رضوی با تأکید بر نقش غلظت دی‌اکسیدکربن و نیز ارزیابی اثرات تغییر تاریخ کاشت به‌عنوان راهکار سازگاری و تعیین بهترین تاریخ کاشت گندم آبی در منطقه مورد مطالعه با توجه به عملکرد و کارایی مصرف آب گندم بود.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محل انجام تحقیق.

Fig. 1. Geographical position of study locations.

1- Weather Data Manager

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی، حداقل دما، حداکثر دما، میزان بارندگی تجمعی سالانه و تعداد دفعات آبیاری در شهرستان‌های مورد مطالعه.

Table 1. Geographical details, the average of annual maximum and minimum temperatures (T_{max} , T_{min}) and the annual rainfall in the study locations and the number of irrigation at each location.

تعداد دفعات آبیاری	بارندگی تجمعی سالانه	میانگین بلندمدت	میانگین بلندمدت	ارتفاع از سطح دریا	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	منطقه
Number of irrigation	Annual Rainfall (mm)	حداکثر دما T_{max} (°C)	حداقل دما T_{min} (°C)	Altitude (m)	Longitude	Latitude	Location
6	308.4	19.4	6.2	1287	58°3'	37°4'	قوچان Ghoochan
9	137.4	24	10.9	1056	58°4'	34°2'	گناباد Gonabad
6	186.6	24.7	11.6	972	57°4'	36°1'	سبزوار Sabzevar
9	267.7	20.9	7.7	1451	59°1'	35°2'	تربت حیدریه Torbate Heydaryeh

۱۹۶۰ تا ۲۰۰۰ برای شرایط ایران بوده است (۱۲). RCP ها از سوی IPCC و بر اساس میزان واداشت تابشی آن‌ها (بر حسب وات بر مترمربع) در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند. بدون اتخاذ هیچ‌گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب و هوای کره زمین در خط سیر RCP8.5 پیش خواهد رفت. به طوری که ادامه این روند تا سال ۲۱۰۰، منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع و افزایش دما به میزان ۴/۹ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. در RCP4.5 نیز میزان افزایش دما ۲/۴ درجه سانتی‌گراد خواهد بود (۴۴).

مدل گیاهی و تنظیمات شبیه‌سازی: رشد و عملکرد گندم با استفاده از یک مدل مکانیزم‌گرا که به‌عنوان شبیه‌ساز نظام‌های تولید کشاورزی (APSIM) شناخته می‌شود شبیه‌سازی شد. این مدل مراحل نموی، تجمع و تخصیص زیست‌توده، شاخص سطح برگ و نیز رشد ریشه، ساقه، برگ و دانه را در مقیاس روزانه از مرحله کاشت تا رسیدگی شبیه‌سازی می‌کند. در مدل APSIM-Wheat تجمع زیست‌توده گیاه زراعی در طول یک دوره زمانی با استفاده از مفهوم

مدل و سناریوهای اقلیمی: داده‌های اقلیمی مربوط به دوره پایه (شامل دمای کمینه و بیشینه، بارندگی و تابش) به‌عنوان ورودی مدل اقلیمی برای تولید سناریوهای آینده و نیز مبنایی برای مقایسه با داده‌های پیش‌بینی شده برای دوره آینده و تعیین میزان تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار گرفتند. سناریوهای اقلیمی و ریزمقیاسی زمانی و مکانی با روش دلتا و با استفاده از کدهای نوشته شده به زبان R که توسط AgMIP^۱ ارائه شده‌اند، در فرمت مورد نیاز برای APSIM^۲ تولید شدند (۱۵ و ۳۰). در همین راستا پیش‌بینی اقلیم آینده (۲۰۶۹-۲۰۴۰) برای شهرستان‌های مورد مطالعه با استفاده از مدل گردش عمومی (GCM)^۳ MPI-ESM-MR^۴ و تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 انجام شد. مدل MPI-ESM-MR، براساس یافته‌های پژوهشی قهرمان و همکاران (۲۰۱۵) در میان ۳۷ مدل انتخاب شده از CMIP5، دارای بیش‌ترین دقت برای تولید داده‌های دما و بارش برای سال‌های

- 1- The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project
- 2- Agricultural Production Systems simulator
- 3- Global Circulation Models
- 4- Max Planck Institute-Earth system model-MR

کارایی مصرف نور^۱ (RUE) و کارایی تعرق^۲ (TE) بسته به این‌که کدام یک از عوامل فراهمی انرژی یا آب محدودکننده رشد هستند، محاسبه می‌شود. در این مدل سرعت تبخیر آب خاک و تعرق گیاه به‌صورت جداگانه و توسط نیاز بوم‌نظام سیستم و توانایی خاک برای تأمین آب در پاسخ به این نیاز محاسبه می‌شود (۹). داده‌های اقلیمی مورد نیاز برای شبیه‌سازی در مدل APSIM، تشعشع، بارندگی، بیشینه و کمینه دما می‌باشد که در این پژوهش از خروجی به‌دست آمده از AgMIP برای این منظور استفاده شد.

غلظت دی‌اکسیدکربن یک متغیر مهم مورد نیاز در شبیه‌سازی رشد گیاهان C3 است. در همین راستا آزمایش‌های شبیه‌سازی رشد و نمو گندم برای دوره آینده با دو سناریو انجام شد. در یک سناریو (CC) تغییرات اقلیمی (افزایش دما و نوسانات بارش) به همراه افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و در سناریوی بعدی (FC) تغییرات اقلیمی در شرایط ثابت در نظر گرفتن دی‌اکسیدکربن در سطح فعلی، در نظر گرفته شد. در این پژوهش غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفری برای دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۰) ۳۶۰ پی‌پی‌ام و برای دوره آینده (۲۰۵۰) تحت RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۴۸۷ و ۵۴۱ پی‌پی‌ام در نظر گرفته شد (۲۴). در مدل APSIM، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن جو از طریق تأثیر بر کارایی مصرف نور، کارایی تعرق و غلظت بحرانی نیتروژن برگ بر رشد گیاه زراعی تأثیر می‌گذارد (۴۰).

از دیگر ورودی‌های مدل پارامترهای مربوط به رقم (چمران) بودند، که پیش‌تر توسط نویسندگان با استفاده از آزمایش‌های قبلی واسنجی و اعتبارسنجی شده است (۷). ارزیابی مدل شامل دو بخش واسنجی

و اعتبارسنجی است که با استفاده داده‌های به‌دست آمده از چندین آزمایش انجام شد. واسنجی مدل با روش گام‌به‌گام و به‌صورت دستی انجام شد. در این مرحله با تغییر پارامترهای مربوط به رقم در مدل برای تیمار عدم محدودیت آبی، مقادیر عملکرد مشاهده‌شده به شبیه‌سازی نزدیک گردید. سپس اعتبارسنجی مدل با روش جذر میانگین مربعات خطا صورت گرفت. بر اساس این روش، انحراف مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل از مقادیر اندازه‌گیری‌شده برآورد می‌شود که توصیفی از قابلیت پیش‌بینی مدل را ارائه می‌کند (۷). پارامترهای خاکی مورد نیاز مدل نیز با استفاده از برنامه تخمین پارامترهای خاک^۳ (SOILPAR) برآورد شدند. بدین ترتیب در مدل APSIM برای هر شهرستان یک فایل خاک شامل توصیف خاک، طبقه‌بندی خاک، طول و عرض جغرافیایی، pH، ضخامت لایه، وزن مخصوص ظاهری، محتوای آب اشباع^۴ (SAT)،^۵ DUL و LL^۶ در پایگاه داده‌ای APSOIL ذخیره شد. سایر عوامل مدیریتی شامل تراکم کاشت ۳۵۰ بوته در مترمربع، فاصله ردیف کاشت ۲۵۰ میلی‌متر و عمق کاشت ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

در تمام شبیه‌سازی‌ها، میزان آب، مواد آلی و معدنی خاک در ابتدای هر سال شبیه‌سازی، تنظیم مجدد (reset) شد تا اثرات آب و کود باقی‌مانده در خاک که مربوط به سال قبل می‌باشد حذف شده و به سال بعدی منتقل نشود. بدین ترتیب امکان ارزیابی اثرات مستقیم تغییر اقلیم بر گیاه زراعی وجود دارد (۴۰). سپس در هر سال برای جلوگیری از هر گونه تنش نیتروژن، سطوح بالای کود نیتروژن در ابتدای فصل رشد و نیز مراحل حساس نمودی در نظر گرفته

- 3- Soil Parameter Estimator
- 4- Saturated water content
- 5- Drained Upper Limit
- 6- Crop Lower Limit

- 1- Radiation Use Efficiency
- 2- Transpiration Efficiency

نتایج و بحث

تغییرات دما و بارندگی شبیه‌سازی شده: با پیش‌بینی اقلیم آینده تحت دو سناریوی RCP. تغییرات دما و بارندگی در طول دوره رشد برای چهار شهرستان محاسبه شد (شکل ۲). به‌طور کلی RCP8.5 افزایش دمای بیش‌تری را نسبت به RCP4.5 پیش‌بینی کرد. در سال ۲۰۵۰، میانگین افزایش دما در طول دوره رشد گندم برای چهار شهرستان مورد مطالعه در RCP4.5 ۱/۴ درجه سانتی‌گراد و در RCP8.5 ۱/۸ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شد. در حالی که میانگین بارندگی در همین دوره زمانی و در دو RCP به ترتیب ۶ و ۵/۷ درصد کاهش یافت. بیش‌ترین افزایش دما در تربت‌حیدریه با ۱/۴۸ درجه سانتی‌گراد در RCP4.5 و ۱/۹۸ درجه سانتی‌گراد در RCP8.5 پیش‌بینی شد. کم‌ترین افزایش دما نیز مربوط به گناباد با ۱/۲۸ و ۱/۷۱ درجه سانتی‌گراد (به ترتیب در دو RCP) بود. تغییرات بارندگی در طول فصل رشد تا سال ۲۰۵۰ در شهرستان‌های مورد بررسی متنوع تر از تغییرات دما بود. به‌طوری‌که تغییرات از ۵/۲۲ درصد افزایش در قوچان (RCP8.5) تا ۱۵/۰۷ درصد کاهش در گناباد (RCP8.5) پیش‌بینی شد. کم‌ترین تغییرات بارندگی در طول فصل رشد مربوط به سبزوار با ۱/۱ و ۰/۸۷ درصد کاهش و بیش‌ترین تغییرات مربوط به گناباد با ۱۳/۷۹ و ۱۵/۰۷ درصد کاهش (در هر دو شهرستان به ترتیب در RCP4.5 و RCP8.5) بود.

نتایج پژوهش کوچکی و نصیری محلاتی (۲۰۰۸) نیز نشان داده است که میانگین درجه حرارت سالانه در مناطق مختلف کشور تا سال ۲۰۵۰، در محدوده ۳/۵ تا ۴/۴ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت (۲۰). وانگ و همکاران (۲۰۱۷a) نیز در پژوهشی در شرق استرالیا افزایش دمای ۲/۱ و ۳/۷ درجه سانتی‌گرادی و کاهش بارندگی به میزان ۳/۱ و ۳/۹ درصد (به ترتیب در RCP8.5 و RCP4.5) برای سال‌های ۲۰۶۱-۲۱۰۰

شد. پس از آن برای تعیین میزان آب خاک در شرایط محدودیت آب با توجه به میانگین تعداد دفعات آبیاری در هر شهرستان (جدول ۱) (۷)، انجام آبیاری در مدل در هر یک از مراحل حساس نموی کد نویسی شد. در همین راستا میزان آب مصرفی در هر آبیاری ۴۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

در این پژوهش علاوه بر شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم (دما × دی‌اکسیدکربن) در شرایط محدودیت آب بر رشد و عملکرد گندم، چندین سناریوی تاریخ کاشت به‌عنوان راهکارهای سازگاری به تغییر اقلیم بررسی شد. بر این اساس، علاوه بر تاریخ کاشت مرسوم در هر شهرستان به‌عنوان شاهد (تاریخ ۷ مهر در قوچان و تربت‌حیدریه و ۲۱ آبان در گناباد و سبزوار)، تاریخ کاشت‌های دو هفته زودتر و دو هفته دیرتر برای ارزیابی اثر تغییر تاریخ کاشت بر عملکرد و کارایی مصرف آب گندم در آینده در نظر گرفته شدند. در نهایت در هر شهرستان فنولوژی گندم، عملکرد، تبخیر آب خاک و تعرق گیاه در طی دوره رشد برای سناریوهای مختلف شبیه‌سازی شد و کارایی مصرف آب^۱ (WUE) بر حسب کیلوگرم بر هکتار بر میلی‌متر، طبق رابطه‌های ۱ و ۲ و بر اساس عملکرد دانه (Y) به‌ازای هر واحد آب مصرف شده توسط تبخیر^۲ (ES) و تعرق^۳ (EP) تخمین زده شد (۱۷ و ۴۰):

$$ET=ES+EP \quad (1)$$

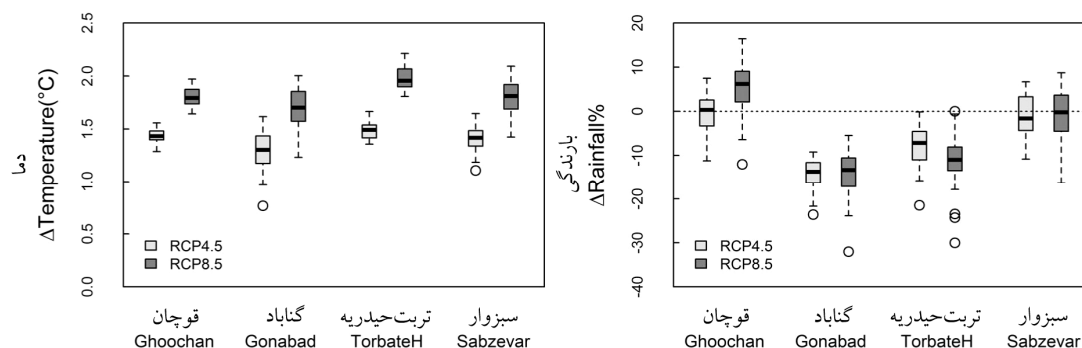
$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (2)$$

در این مطالعه برای رسم نمودارها از نرم‌افزار R استفاده گردید (۳۰).

- 1- Water Use Efficiency
- 2- Soil water evaporation
- 3- Plant transpiration

۳۹ میلی‌متری بارندگی تا سال ۲۰۵۰ در منطقه مدیترانه پیش‌بینی شد (۳۳).

پیش‌بینی کردند (۴۰). در پژوهش دیگری نیز میانگین افزایش ۱/۵۷ درجه سانتی‌گراد دما و میانگین کاهش



شکل ۲- تغییرات دما (°C) و بارندگی (%) در طول فصل رشد گندم در آینده (۲۰۵۰) نسبت به دوره پایه در شهرستان‌های مورد مطالعه. میانگین بلندمدت دما و بارندگی دوره پایه در جدول ۲ ارائه شده است.

Fig. 2. Projected changes in mean temperature (°C) and rainfall (%) in the future in comparison with baseline in study locations. Average of long term temperature and rainfall represented in Table 2.

و ۴/۷۷ درصد در RCP8.5 افزایش یابد. در همین زمان تغییرات عملکرد در تربت‌حیدریه بر خلاف سایر شهرستان‌ها کاهشی خواهد بود (به ترتیب ۳/۴۷ و ۴/۹۶ درصد کاهش در دو RCP). در شهرستان‌های دیگر درصد تغییرات عملکرد متغیر بوده و از ۰/۹۲ در قوچان در RCP4.5 تا ۱۱/۹۲ در سبزوار در RCP8.5 پیش‌بینی شد. نتایج نشان می‌دهند که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن به همراه افزایش دما در زمستان باعث افزایش سرعت فتوسنتز گندم و در نتیجه افزایش بیوماس و عملکرد محصول می‌شود (۶ و ۳۵). بر خلاف نتایج به دست آمده در این پژوهش، کوچکی و نصیری محلاتی (۲۰۰۸) پیش‌بینی کرده‌اند که علی‌رغم تأثیر نسبی افزایش دی‌اکسیدکربن، عملکرد گندم آبی کشور بسته به مناطق مختلف تولید و نوع مدل گردش عمومی به کار رفته در دامنه‌ای بین ۱۳ تا ۲۸ درصد برای سال ۲۰۵۰ میلادی کاهش خواهد داشت (۲۰).

اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گندم: در دوره پایه میانگین عملکرد شبیه‌سازی شده دانه گندم در شهرستان‌های مورد مطالعه ۶/۹۶ تن در هکتار بود (جدول ۲). سبزوار با ۶/۱۹ تن در هکتار دارای کم‌ترین و تربت‌حیدریه با ۷/۷۷ تن در هکتار دارای بیش‌ترین عملکرد دانه گندم در این دوره بودند.

هر چند کم‌ترین و بیش‌ترین میزان بارندگی در طول دوره رشد مربوط به شهرستان‌های گناباد و قوچان بود (جدول ۲) ولی مجموع بارندگی در دوره پایه و میزان آب مصرفی در آبیاری گندم در طول دوره رشد در شهرستان‌های مختلف (با توجه به تعداد دفعات آبیاری در هر شهرستان، جدول ۱) از ۴۱۷ میلی‌متر در سبزوار تا ۶۱۳/۷ میلی‌متر در تربت‌حیدریه متغیر بود.

طبق نتایج شبیه‌سازی‌ها (شکل ۳) انتظار می‌رود که در سناریوی CC (سناریوی تغییرات اقلیمی همراه با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن) تا سال ۲۰۵۰ میانگین عملکرد دانه گندم ۴/۹۱ درصد در RCP4.5

جدول ۲- میانگین دما (درجه سانتی‌گراد) و بارندگی تجمعی (میلی‌متر) در طول دوره رشد و نیز عملکرد (کیلوگرم در هکتار)، تبخیر و تعرق (میلی‌متر) و کارایی مصرف آب (کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر) گندم، در شهرستان‌های مورد مطالعه در دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۱۰).

Table 2. The average temperature (T_{ave}) and cumulative rainfall (mm) during growth season, grain yield (kg/ha), evapotranspiration (mm) and water use efficiency (kg/ha/mm) of wheat, in the study location at baseline (1980-2010).

منطقه Location	میانگین دما T_{ave} (°C)	بارندگی تجمعی Rainfall (mm)	عملکرد Yield (kg/ha)	تبخیر و تعرق ET (mm)	کارایی مصرف آب WUE (kg/ha/mm)
قوچان Ghoochan	8.3	292.9	7176.6	475.3	15.1
گناباد Gonabad	10.9	129.4	6708.9	468.7	14.3
سبزوار Sabzevar	11.1	176.9	6189.5	441.7	14
تربت‌حیدریه Torbate Heydaryeh	8.9	253.7	7768.1	504.8	15.3

نیز سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای متفاوت و نیز اختلاف در دوره‌های زمانی آینده (آینده دور و یا نزدیک) و مدل‌های گیاهی باشد (۳).

اهمیت افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر تولید گندم با شبیه‌سازی عملکرد در آینده و با در نظر گرفتن تنها تغییرات اقلیمی (تغییرات دما و بارندگی) و بدون در نظر گرفتن افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن مشخص می‌گردد. در سناریوی FC (سناریوی تغییرات اقلیمی با ثابت در نظر گرفتند دی‌اکسیدکربن در سطح فعلی) تغییرات عملکرد در تمام شهرستان‌های مورد مطالعه و در هر دو سناریوی RCP4.5 کاهش بود به جز گناباد که در RCP4.5 به میزان ۰/۷۲ درصد افزایش نشان داد. در این سناریو میانگین کاهش عملکرد در RCP4.5 به میزان ۴/۹۸ درصد و در RCP8.5 به میزان ۷/۵۶ درصد بود. از آنجایی‌که در سناریوی CC (سناریوی تغییرات اقلیمی همراه با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن) تغییرات عملکرد افزایشی بود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در منطقه مورد مطالعه افزایش دی‌اکسیدکربن به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای اثرات منفی اقلیمی

نتایج پژوهش‌های مختلف در سراسر دنیا برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد گندم در آینده متفاوت می‌باشد. برای مثال یانگ و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از ۱۸ مدل گردش عمومی و مدل گیاهی اسیسم و سناریوی اقلیمی A2، کاهش عملکرد گندم در مناطق گندم‌خیز استرالیا در دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ را پیش‌بینی کردند (۴۸). از سوی دیگر شبیه‌سازی‌های وانگ و همکاران (۲۰۱۷a) در همان منطقه ولی در دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۰۶۱ و با استفاده از جدیدترین سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای (RCPs) افزایش عملکردی به میزان ۰/۲ درصد در RCP4.5 و ۹ درصد در RCP8.5 نشان داد (۴۰). رحمانی و همکاران (۲۰۱۶) نیز در پژوهش خود در دشت بیرجند پیش‌بینی کردند که در دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۰۳۹ نسبت به دوره پایه نیاز آبی و عملکرد گندم به‌ترتیب ۱۹/۵ و ۳۰ درصد کاهش خواهد یافت. آن‌ها دلیل این کاهش‌ها را کوتاه شدن دوره رشد گندم در اثر تغییر اقلیم دانستند (۳۱). با توجه به این‌که در تمامی پژوهش‌های ذکرشده افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در آینده در نظر گرفته شده است، این تنوع در نتایج مختلف ممکن است به دلیل انتخاب مدل‌های اقلیمی و

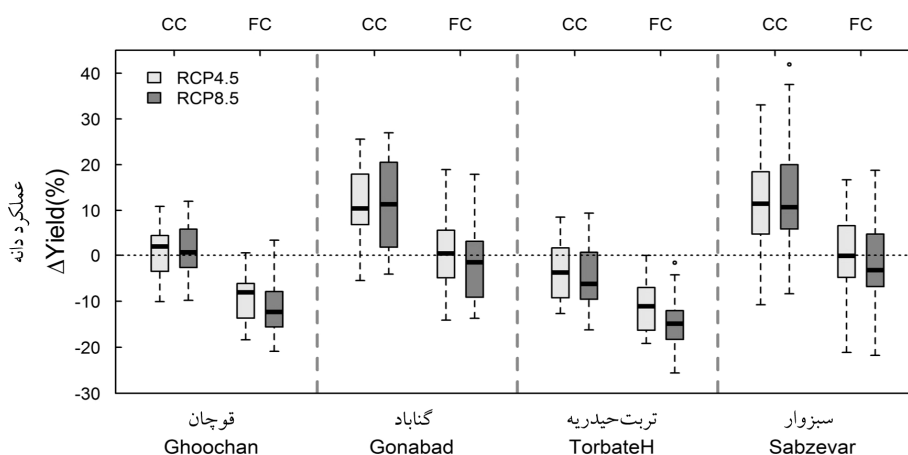
اثر تغییر اقلیم بر عملکرد در شرایط محدودیت آب، وابسته به منطقه مورد مطالعه است. با در نظر گرفتن تغییر اقلیم در آینده در مناطق گرم و خشک گلدهی گندم زودتر انجام شده و در نتیجه دوره پر شدن دانه در روزهای خنک‌تر و مرطوب‌تر فصل رشد صورت گرفته و در نتیجه عملکرد افزایش می‌یابد (۲۵). بر خلاف آن در مناطق سرد و مرطوب دمای بالاتر در آینده نمو فنولوژیکی را سرعت بخشیده و در نتیجه هماهنگی زمانی میان دریافت مواد مغذی و دریافت نور از بین می‌رود و در نتیجه تولید زیست‌توده در طول دوره رشد کاهش می‌یابد (۴۱).

نتایج شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش نشان دادند که میزان عملکرد گندم در دوره آینده در RCP4.5 بیش از RCP8.5 خواهد بود. همچنین در سناریوی CC در مقایسه با FC تفاوت تغییرات عملکرد در دو RCP بیش‌تر بود. به عبارت دیگر در اینجا افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن قادر به جبران اثرات منفی افزایش دما نبوده است که این مخالف نتایج به دست آمده در پژوهش‌های دیگر است (۳ و ۴).

را خشتی کرده است. نتایج مطالعات FACE^۱ در مناطق خشک استرالیا نیز نشان داده است که در غلظت ۵۵۰ پی‌پی‌ام دی‌اکسیدکربن جو و تحت شرایط بدون تنش، عملکرد گندم ۲۶ درصد افزایش می‌یابد (۲۶). اثرات افزایشی دی‌اکسیدکربن فرایند پیچیده‌ای است که به مشخصات گیاه زراعی و شرایط محیطی وابسته است (۳۸). با این وجود، تقابل میان اثرات افزایشی دی‌اکسیدکربن و عوامل محدودکننده به‌ویژه تنش‌های دما و خشکی به خوبی شناخته شده است (۱۰).

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در میان شهرستان‌های مورد مطالعه، سبزوار و گناباد که دارای میانگین دمای بالاتر و میانگین بارندگی کم‌تر در دوره پایه بودند از اثرات افزایشی دی‌اکسیدکربن بر عملکرد (همانند کارایی مصرف آب) بهره بیش‌تری بردند.

نتایج پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۱۷b) نیز نشان داده است عملکرد شبیه‌سازی شده گندم در اقلیم آینده و در شرایط محدودیت آب، در مناطق سرد و مرطوب کاهش و در مناطق گرم و خشک افزایش خواهد یافت (۴۱). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که



شکل ۳- درصد تغییرات عملکرد دانه (%ΔYield) در آینده (۲۰۵۰) نسبت به دوره پایه در شهرستان‌های مورد مطالعه. CC: سناریوی تغییرات اقلیمی به همراه افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و FC: سناریوی تغییرات اقلیمی با ثابت در نظر گرفتن دی‌اکسیدکربن در سطح فعلی.

Fig. 3. The changes in grain yield (%ΔYield) in future (2050) in comparison with baseline in study locations. CC: the scenario of climate change along with increasing CO₂ concentration, FC: the scenario of climate change without increasing CO₂ concentration.

میانگین WUE شبیه‌سازی شده در دوره پایه در شهرستان‌های مورد مطالعه ۱۴/۷ کیلوگرم بر هکتار بر میلی‌متر بود. میزان تغییرات WUE در آینده (شکل ۵) با تغییرات ET تفاوت زیادی داشت. به طوری که میزان WUE در سناریوی RCP4.5 در ۱۲/۲۱CC درصد در RCP4.5 و ۱۵/۳۵ درصد در RCP8.5 افزایش یافت و سبزوار و تربت‌حیدریه دارای بیش‌ترین و کم‌ترین درصد افزایش بودند. ولی در سناریوی FC میانگین WUE با افزایش تنها ۰/۳۳ و کاهش ۰/۴۱ درصدی (به ترتیب در دو RCP) همراه بود و در این شرایط سبزوار دارای بیش‌ترین درصد افزایش و تربت‌حیدریه دارای بیش‌ترین درصد کاهش در میزان WUE در دوره آینده بودند.

همچنین نتایج پیش‌بینی‌ها نشان داد که تغییرات عملکرد متناسب با تغییرات در مصرف آب نبوده و در سناریوی CC در مقایسه با FC، با وجود کاهش بیش‌تر ET، عملکرد افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر از آنجایی که اختلاف در تغییرات عملکرد در بین این دو سناریو بیش‌تر از اختلاف در تغییرات ET بود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت WUE پیش‌بینی شده در آینده بیش از آن‌که با کاهش مصرف آب مرتبط باشد، تحت‌تأثیر عملکرد گندم می‌باشد. نتایج یک پژوهش فراتحلیلی نیز نشان داد که در سطح جهانی تغییر اقلیم بدون افزایش دی‌اکسیدکربن تا سال ۲۰۸۰ اثرات منفی شدیدی بر عملکرد و از سوی دیگر اثرات منفی کم‌تری بر تبخیر و تعرق پتانسیل خواهد داشت که در مجموع موجب کاهش ۲۶-۱۳ درصدی در WUE در دوره آینده می‌شود (۸). بر خلاف آن در شرایط تغییر اقلیم به همراه افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن اثرات منفی بر عملکرد گندم به‌طور کامل جبران و در اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تبخیر و تعرق پتانسیل جهانی برای گندم حدود ۱۸-۷ درصد کاهش خواهد یافت. نتایج این پژوهش فراتحلیلی نشان داد ترکیب

تغییرات در ET و WUE شبیه‌سازی شده: میانگین ET^۱ شبیه‌سازی شده گندم در دوره پایه ۴۷۲/۶ میلی‌متر و در شهرستان‌های مورد مطالعه از ۴۴۱/۶۹ در سبزوار تا ۵۰۴/۸۲ میلی‌متر در تربت‌حیدریه متغیر بود (جدول ۲). این نتایج نشان می‌دهند که میزان تبخیر و تعرق گندم در شهرستان‌های مورد مطالعه با میزان آب مصرفی در طول دوره رشد (مجموع بارندگی و آب آبیاری) نسبت مستقیم دارد (جدول‌های ۱ و ۲).

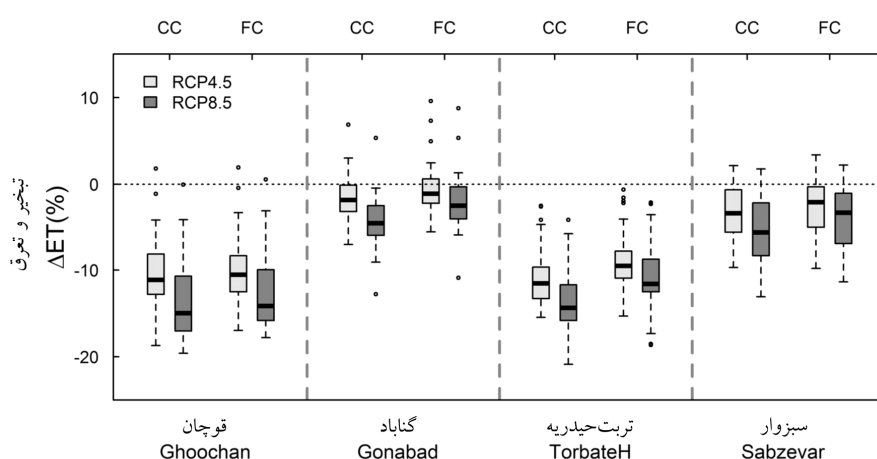
نتایج شبیه‌سازی‌ها در این پژوهش نشان داد (شکل ۴) که تحت شرایط تغییر اقلیم، در سناریوهای CC و FC و در هر دو RCP تا سال ۲۰۵۰ در تمام شهرستان‌های مورد مطالعه ET کاهش خواهد یافت. میانگین کاهش ET نسبت به دوره پایه در سناریوی CC از ۶/۵۷ تا ۹/۲۴ درصد و در سناریوی FC از ۵/۳۴ تا ۷/۲۲ درصد متغیر بود (به ترتیب در RCP4.5 و RCP8.5). گناباد و سبزوار دارای کم‌ترین درصد کاهش و تربت‌حیدریه و قوچان دارای بیش‌ترین درصد کاهش در میزان ET بودند. پیش‌بینی کاهش ET گندم در دوره آینده با نتایج پژوهش‌های دیگر هم‌خوانی دارد (۴۰، ۴۳ و ۴۷). مصرف آب در اقلیم آینده به تغییرات دما و بارندگی و نیز افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن به‌شدت وابسته است. علاوه بر آن‌که با افزایش دما دوره رشد گیاه کوتاه می‌شود، با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن هدایت روزنه‌ای کاهش یافته و به دنبال آن سرعت ET کاهش می‌یابد (۴۳).

نتایج به‌دست آمده در این پژوهش همچنین نشان می‌دهد که افزایش بیش‌تر دما موجب کاهش بیش‌تر ET در شهرستان‌های مورد مطالعه خواهد شد. از سوی دیگر در سناریوی CC در مقایسه با FC کاهش بیش‌تری در مصرف آب (ET) پیش‌بینی شد که نشان‌دهنده اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر کاهش مصرف آب در گندم است.

تربت‌حیدریه) سود می‌برد. در مجموع این اثرات سودمند بر WUE موجب کاهش کلی مصرف آب گیاه زراعی با کاهش قابل‌توجه در مصرف آب آبیاری می‌شود که با توجه به رقابت مستقیم برای منابع آب با مصارف دیگر مانند خانوار، صنعت و حفظ دیگر خدمات اکوسیستمی دارای اهمیت است (۸).

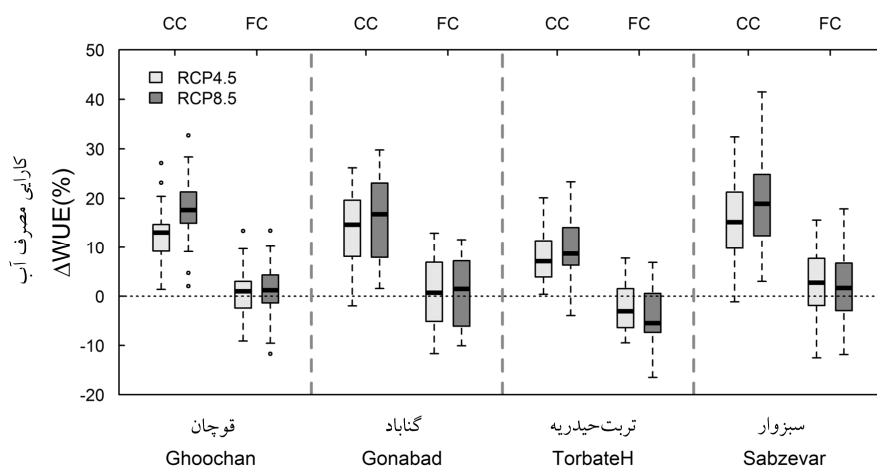
اثرات تغییر اقلیم و افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر عملکرد و تبخیر و تعرق پتانسیل موجب افزایش قابل‌توجه کارایی مصرف آب در گندم (۲۷ درصد) خواهد شد.

نتایج این پژوهش همچنین نشان داد که WUE در اقلیم خشک (گناباد و سبزوار) از اثرات افزایش دی‌اکسیدکربن بیش‌تر از اقلیم مرطوب (قوچان و



شکل ۴- درصد تغییرات تبخیر و تعرق (% ΔET) در آینده (۲۰۵۰) نسبت به دوره پایه در شهرستان‌های مورد مطالعه. CC: سناریوی تغییرات اقلیمی به همراه افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و FC: تغییرات اقلیمی با ثابت در نظر گرفتن دی‌اکسیدکربن در سطح فعلی.

Fig. 4. The changes in evapotranspiration (% ΔET) in future (2050) in comparison with baseline in study locations. CC: the scenario of climate change along with increasing CO_2 concentration, FC: the scenario of climate change without increasing CO_2 concentration.



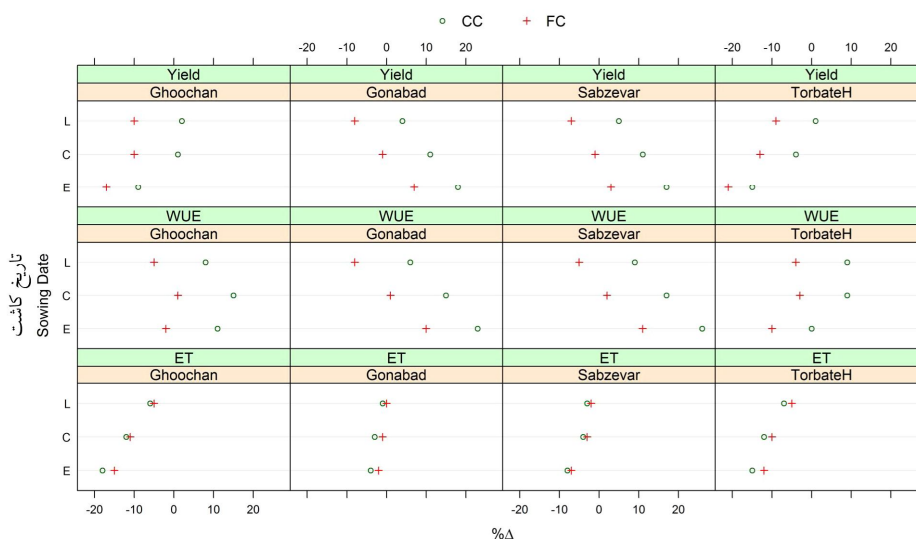
شکل ۵- درصد تغییرات کارایی مصرف آب (% ΔWUE) در آینده (۲۰۵۰) نسبت به دوره پایه در شهرستان‌های مورد مطالعه. CC: سناریوی تغییرات اقلیمی به همراه افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و FC: تغییرات اقلیمی با ثابت در نظر گرفتن دی‌اکسیدکربن در سطح فعلی.

Fig. 5. The changes in water use efficiency (% ΔWUE) in future (2050) in comparison with baseline in study locations. CC: the scenario of climate change along with increasing CO_2 concentration, FC: the scenario of climate change without increasing CO_2 concentration.

داشت. ولی در قوچان و تربت‌حیدریه با تغییر تاریخ کاشت WUE کاهش یافت.

در مجموع به‌نظر می‌رسد که راهکارهای مدیریتی برای اقلیم فعلی مناسب هستند ممکن است برای اقلیم آینده مناسب نباشند. نتایج این پژوهش نشان دادند که در آینده در گناباد و سبزوار با کاشت گندم در زمان دو هفته زودتر از تاریخ کاشت مرسوم علاوه بر آن‌که عملکرد و WUE افزایش می‌یابد، مصرف آب (ET) نیز کاهش می‌یابد. در صورتی‌که در تربت‌حیدریه و قوچان با جابجایی تاریخ کاشت به دو هفته دیرتر از مرسوم، هم زمان با افزایش عملکرد، ET نیز افزایش یافته و WUE کاهش خواهد یافت. از آنجایی‌که کمبود آب عامل اصلی محدودیت در مناطق خشک می‌باشد، راهبردهای سازگاری به اقلیم آینده بر افزایش WUE تأکید دارند (۳۲ و ۴۷)، بنابراین بهترین تاریخ کاشت در آینده با توجه به تغییرات WUE تعیین می‌شود.

اثر تغییر تاریخ کاشت بر عملکرد، ET و WUE: واکنش عملکرد به تغییر تاریخ کاشت در آینده در هر کدام از شهرستان‌های مورد مطالعه متفاوت بود (شکل ۶). در سناریوی CC، در گناباد و سبزوار تاریخ کاشت دو هفته زودتر از مرسوم موجب افزایش عملکرد بیش‌تری در مقایسه با تاریخ کاشت مرسوم شد. در حالی‌که در تربت‌حیدریه تاریخ کاشت دو هفته دیرتر از مرسوم کاهش عملکرد در آینده را جبران کرد. در سناریوی FC نیز همین روند برای واکنش عملکرد به تاریخ کاشت وجود داشت و به غیر از قوچان در بقیه شهرستان‌ها کاهش عملکرد در آینده با تغییر تاریخ کاشت تا حدودی جبران شد. نتایج نشان دادند که ET در تمامی شهرستان‌ها در تاریخ کاشت دو هفته زودتر از مرسوم در آینده کاهش بیش‌تری خواهد داشت و اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در این تاریخ کاشت افزایش می‌یابد. WUE نیز در گناباد و سبزوار تغییراتی مشابه عملکرد



شکل ۶- مقایسه درصد تغییرات عملکرد، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب گندم آبی در سه تاریخ کاشت مرسوم (C)، دو هفته زودتر از مرسوم (E) و دو هفته دیرتر از مرسوم (L) در آینده (۲۰۵۰) در مقایسه با دوره پایه. CC: سناریوی تغییرات اقلیمی به همراه افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و FC: تغییرات اقلیمی با ثابت در نظر گرفتن دی‌اکسیدکربن در سطح فعلی.

Fig. 6. Changes in yield, evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) of irrigated wheat at three sowing dates: common (C), two weeks earlier (E) and two weeks later (L) in future in comparison with baseline. CC: the scenario of climate change along with increasing CO₂ concentration, FC: the scenario of climate change without increasing CO₂ concentration.

نتیجه‌گیری کلی

بارندگی کم‌تری در طول فصل رشد در دوره پایه هستند، هر چند تبخیر و تعرق در آینده نسبت به قوچان و تربت‌حیدریه کاهش کم‌تری دارد ولی برای عملکرد و کارایی مصرف آب افزایش بیش‌تری پیش‌بینی می‌شود. در این پژوهش با در نظر گرفتن عملکرد، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب می‌توان نتیجه گرفت که بهترین تاریخ کاشت در آینده برای گناباد و سبزوار تاریخ کاشت دو هفته زودتر از مرسوم و برای قوچان و تربت‌حیدریه تاریخ کاشت مرسوم می‌باشد.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که تا سال ۲۰۵۰ دمای طول دوره رشد در شهرستان‌های قوچان، گناباد، تربت‌حیدریه و سبزوار افزایش و بارندگی کاهش می‌یابد. اثرات این تغییرات بر عملکرد در صورت افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن جو، افزایشی و در صورت ثابت ماندن غلظت دی‌اکسیدکربن کاهشی می‌باشد. با تغییرات اقلیمی در آینده مصرف آب (ET) گندم آبی کاهش و کارایی مصرف آب (WUE) افزایش می‌یابد و البته این تغییرات با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تشدید می‌شود. در گناباد و سبزوار که دارای میانگین دمای بالاتر و

منابع

- Ahmadi, K.G., Ebadzadeh, H., Hatami, F., Fazli, M., Hosseinpour, R., Kazemian, A. and Rafiei, M. 2016. Agricultural products statistics. Ministry of Agriculture, Department of Planning and Economy, Center for Information and Communication Technology, 163p. (In Persian)
- Alizadeh, A., Sayari, N., Hesami, K.M., Banayan, A.M. and Faridhosseini, A. 2010. Assessment of Climate Change Potential Impacts on Agricultural Water Use and Water Resources of Kashaf rood basin. *J. Water Soil.* 24: 815-835. (In Persian)
- Araya, A., Hoogenboom, G., Luedeling, E., Hadgu, K.M., Kisekka, I. and Martorano, L.G. 2015. Assessment of maize growth and yield using crop models under present and future climate in southwestern Ethiopia. *Agric. For. Meteorol.* 214: 252-265.
- Balkovič, J., van der Velde, M., Skalský, R., Xiong, W., Folberth, C., Khabarov, N., Smirnov, A., Mueller, N.D. and Obersteiner, M. 2014. Global wheat production potentials and management flexibility under the representative concentration pathways. *Glob. Planet Change.* 122: 107-121.
- Burkart, S., Manderscheid, R., Wittich, K.P., Löpmeier, F. and Weigel, H.J. 2011. Elevated CO₂ effects on canopy and soil water flux parameters measured using a large chamber in crops grown with free-air CO₂ enrichment. *Plant Biol.* 13: 258-269.
- Cho, K., Falloon, P., Gornall, J., Betts, R. and Clark, R. 2012. Winter wheat yields in the UK: uncertainties in climate and management impacts. *Clim. Res.* 54: 49-68.
- Deihimfard, R., Mahallati, M.N. and Koocheki, A. 2015. Yield gap analysis in major wheat growing areas of Khorasan province, Iran, through crop modelling. *Field Crop. Res.* 184: 28-38.
- Deryng, D., Elliott, J., Folberth, C., Müller, C., Pugh, T.A., Boote, K.J., Conway, D., Ruane, A.C., Gerten, D. and Jones, J.W. 2016. Regional disparities in the beneficial effects of rising CO₂ concentrations on crop water productivity. *Nat. Clim. Change.* 6: 786-790.
- Dietzel, R., Liebman, M., Ewing, R., Helmers, M., Horton, R., Jarchow, M. and Archontoulis, S. 2016. How efficiently do corn-and soybean-based cropping systems use water? A systems modeling analysis. *Glob. Change Biol.* 22: 666-681.

10. Erda, L., Wei, X., Hui, J., Yinlong, X., Yue, L., Liping, B. and Liyong, X. 2005. Climate change impacts on crop yield and quality with CO₂ fertilization in China. *Biol. Sci.* 360: 2149-2154.
11. Ghahramani, A., Kokic, P.N., Moore, A.D., Zheng, B., Chapman, S.C., Howden, M.S. and Crimp, S.J. 2015. The value of adapting to climate change in Australian wheat farm systems: farm to cross-regional scale. *Agric. Ecosyst. Environ.* 211: 112-125.
12. Ghahreman, N., Tabatabaei, M. and Babaieian, I., 2015. Investigation of Uncertainty in the IPCC AR5 Precipitation and Temperature Projection over Iran under RCP Scenarios. Poster on COP21-CMP11, Paris.
13. Hillel, D. and Rosenzweig, C. 2010. Handbook of climate change and agroecosystems: impacts, adaptation, and mitigation. World Scientific. 439p.
14. Hoogenboom, G., Jones, J., Wilkens, P., Porter, C., Batchelor, W., Hunt, L., Boote, K., Singh, U., Uryasev, O. and Bowen, W. 2004. Decision support system for agrotechnology transfer version 4.0 [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, HI. 1: 235-265.
15. Hudson, N. and Ruane, A. 2013. Guide for Running AgMIP Climate Scenario Generation Tools with R. AgMIP. Available online: <http://www.agmip.org/wp-content/uploads/2013/10/Guide-for-Running-AgMIPClimate-Scenario-Generation-with>.
16. IPCC. 2014. Climate Change 2014- Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects. Cambridge University Press. 1820p.
17. Jalota, S., Kaur, H., Kaur, S. and Vashisht, B. 2013. Impact of climate change scenarios on yield, water and nitrogen-balance and-use efficiency of rice-wheat cropping system. *Agric. Water Manag.* 116: 29-38.
18. Karimi, T., Stöckle, C., Higgins, S. and Nelson, R. 2017. Climate change and dryland wheat systems in the US Pacific Northwest. *Agric. Syst.* 159: 144-156.
19. Koocheki, A., Mahallati, M.N. and Jafari, L. 2016. Evaluation of Climate Change Effect on Agricultural Production of Iran; I. Predicting the Future Agroclimatic Conditions. *Iran. J. Field Crop. Res.* 13: 651-664.
20. Kouchaki, A. and Nasiri Mahalati, M. 2008. Impacts of climate change and CO₂ concentration on wheat yield in Iran and adaptation strategies. *Iran. J. Field Crop. Res.* 6: 139-153.
21. Kristensen, K., Schelde, K. and Olesen, J.E. 2011. Winter wheat yield response to climate variability in Denmark. *J. Agric. Sci.* 149: 33-47.
22. Long, S.P., Ainsworth, E.A., Leakey, A.D., Nösberger, J. and Ort, D.R. 2006. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations. *Sci.* 312: 1918-1921.
23. Luo, Q., Bellotti, W., Williams, M. and Wang, E. 2009. Adaptation to climate change of wheat growing in South Australia: analysis of management and breeding strategies. *Agric. Ecosyst. Environ.* 129: 261-267.
24. Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M., Lamarque, J.F., Matsumoto, K., Montzka, S., Raper, S. and Riahi, K. 2011. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climat. Chang.* 109: 213-241.
25. Moriondo, M., Giannakopoulos, C. and Bindi, M. 2011. Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation. *Climat. Chang.* 104: 679-701.
26. O'leary, G.J., Christy, B., Nuttall, J., Huth, N., Cammarano, D., Stöckle, C., Basso, B., Shcherbak, I., Fitzgerald, G. and Luo, Q. 2015. Response of wheat growth, grain yield and water use to elevated CO₂ under a free-air CO₂ enrichment (FACE) experiment and modelling in a semi-arid environment. *Glob. Chang. Biol.* 21: 2670-2686.
27. Olesen, J.E., Trnka, M., Kersebaum, K., Skjelvåg, A., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J. and Micale, F. 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *EUR. J. Agron.* 34: 96-112.

28. Paymard, P., Bannayan, M. and Haghghi, R.S. 2018. Analysis of the climate change effect on wheat production systems and investigate the potential of management strategies. *Nat. Hazards*. 91: 1237-1255.
29. Prescott, J. 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *T. Roy. Soc. South Aust.* 64: 114-118.
30. R Core Team. 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
31. Rahmani, M., Shahidi, A. and Azghandi, M.H. 2016. Effects of climate change on the length of growth stages and water requirement of wheat and barley (Case study: Birjand Plain). *J. Agroecol.* 7: 443-460.
32. Rockström, J., Karlberg, L., Wani, S.P., Barron, J., Hatibu, N., Oweis, T., Bruggeman, A., Farahani, J. and Qiang, Z. 2010. Managing water in rainfed agriculture-The need for a paradigm shift. *Agric. Water Manag.* 97: 543-550.
33. Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L.S., Pizzigalli, C. and Lionello, P. 2015. Climate change and Mediterranean agriculture: impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agric. Water Manag.* 147: 103-115.
34. Semenov, M.A. and Shewry, P.R. 2011. Modelling predicts that heat stress, not drought, will increase vulnerability of wheat in Europe. *Sci. rep. UK.* 66: 1-5.
35. Southworth, J., Pfeifer, R., Habeck, M., Randolph, J., Doering, O. and Rao, D.G. 2002. Sensitivity of winter wheat yields in the Midwestern United States to future changes in climate, climate variability, and CO₂ fertilization. *Climat. Res.* 22: 73-86.
36. Tubiello, F.N., Donatelli, M., Rosenzweig, C. and Stockle, C.O. 2000. Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: model predictions at two Italian locations. *EUR. J. Agron.* 13: 179-189.
37. Turrall, H., Burke, J.J. and Faures, J.M. 2011. Climate change, water and food security. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy. 174p.
38. Van Ittersum, M., Howden, S. and Asseng, S. 2003. Sensitivity of productivity and deep drainage of wheat cropping systems in a Mediterranean environment to changes in CO₂, temperature and precipitation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 97: 255-273.
39. Vanuytrecht, E., Raes, D. and Willems, P. 2011. Considering sink strength to model crop production under elevated atmospheric CO₂. *Agric. Forest Meteorol.* 151: 1753-1762.
40. Wang, B., Li Liu, D., Asseng, S., Macadam, I., Yang, X. and Yu, Q. 2017a. Spatiotemporal changes in wheat phenology, yield and water use efficiency under the CMIP5 multimodel ensemble projections in eastern Australia. *Climat. Res.* 72: 83-99. 5
41. Wang, B., Li Liu, D., Asseng, S., Macadam, I. and Yu, Q. 2017b. Modelling wheat yield change under CO₂ increase, heat and water stress in relation to plant available water capacity in eastern Australia. *EUR. J. Agron.* 90: 152-161.
42. Wang, J., Wang, E. and Li Liu, D. 2011. Modelling the impacts of climate change on wheat yield and field water balance over the Murray-Darling Basin in Australia. *Theor. Appl. Climatol.* 104: 285-300.
43. Wang, J., Wang, E., Luo, Q. and Kirby, M. 2009. Modelling the sensitivity of wheat growth and water balance to climate change in Southeast Australia. *Climat. Chang.* 96: 79-96.
44. Wayne, G. 2013. The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways. *Skeptical science.* 24p.
45. Wheeler, T., Hong, T., Ellis, R., Batts, G., Morison, J. and Hadley, P. 1996. The duration and rate of grain growth, and harvest index, of wheat (*Triticum aestivum* L.) in response to temperature and CO₂. *J. Exp. Bot.* 47: 623-630.

46. Wilcox, J. and Makowski, D. 2014. A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies. *Field Crop. Res.* 156: 180-190.
47. Yang, Y., Li Liu, D., Anwar, M.R., O'Leary, G., Macadam, I. and Yang, Y. 2016. Water use efficiency and crop water balance of rainfed wheat in a semi-arid environment: sensitivity of future changes to projected climate changes and soil type. *Theor. Appl. Climatol.* 123: 565-579.
48. Yang, Y., Li Liu, D., Anwar, M.R., Zuo, H. and Yang, Y. 2014. Impact of future climate change on wheat production in relation to plant-available water capacity in a semiarid environment. *Theor. Appl. Climatol.* 115: 391-410.

