

## تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن نیوار بر عملکرد، تعرق و بهره‌وری مصرف آب غلات اصلی در دشت قزوین

هادی رضانی اعتدالی<sup>۱\*</sup>، بهنام آبابایی<sup>۲</sup>، عباس کاویانی<sup>۳</sup>

### چکیده

تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن نیوار بر میزان تعرق و سوخت و ساز نوری گیاه غیرقابل انکار است. در این مطالعه اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در چهار نمایشنامه A1B، A2، B1 و B2 بر عملکرد گندم، جو و ذرت به عنوان غلات اصلی منطقه‌ی دشت قزوین بررسی شد. از نرم‌افزار AquaCrop پس از واسنجی و اعتبارسنجی برای شبیه‌سازی رشد محصولات استفاده شد. در هریک از نمایشنامه‌ها (افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن نیوار، عدم تغییر در داده‌های هواشناسی و فرض ثابت ماندن سطح تأمین آب آبیاری)، عملکرد گندم در دوره‌ی ۲۶ ساله‌ی ۲۰۱۰-۲۰۳۵ نسبت به دوره‌ی ۲۶ ساله‌ی مبنا (۱۹۸۴-۲۰۰۹) به‌طور میانگین بین ۱۱/۵ تا ۱۴/۴ درصد افزایش خواهد یافت. برای جو و ذرت این افزایش به‌ترتیب ۸/۵ تا ۱۱/۳ و ۳/۷ تا ۴/۳ درصد برآورد گردید. میزان تعرق گندم، جو و ذرت به‌ترتیب و به‌طور متوسط در حدود ۷، ۵ و ۱ درصد در نمایشنامه‌های مختلف کاهش خواهند یافت. همچنین میزان افزایش بهره‌وری مصرف آب به‌ترتیب برای گندم، جو و ذرت به‌طور متوسط برابر با ۱۳، ۶ و ۴ درصد برآورد گردید. نتایج این مطالعه، مؤید تأثیرگذاری بیشتر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر گیاهان گروه C3 (گندم و جو) نسبت به گیاهان گروه C4 (ذرت) است.

**واژه‌های کلیدی:** تعرق نسبی، نمایشنامه‌های غلظت دی‌اکسیدکربن، نرم‌افزار AquaCrop.

<sup>۱</sup> هیات علمی گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

تلفن: ۰۲۸۳۳۹۰۱۲۷۸، Email: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

<sup>۲</sup> پژوهشگر The Centre for Crop Science، دانشگاه کوئینزلند، استرالیا

<sup>۳</sup> استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

## مقدمه

در طول دهه‌ی اخیر، اقلیم جهانی به میزان قابل توجهی دچار تغییر شده است. غلظت دی‌اکسیدکربن نیوار از ۱۸۵ ppm در عصر یخبندان به ۲۸۰ ppm در دوران قبل از صنعتی شدن سپس به ۳۳۶ ppm در سال ۱۹۷۹ و در نهایت به ۳۹۳ ppm در ابتدای سال ۲۰۱۲ افزایش پیدا کرده است. در آگوست ۲۰۱۴، غلظت دی‌اکسیدکربن در منطقه‌ی مانوا لوا در جزایر هاوایی در اقیانوس آرام، ۳۹۵ ppm گزارش شده است (آزمایشگاه تحقیقات سیستم زمین، ۲۰۱۴). افزایش سریع غلظت دی‌اکسیدکربن در نیوار یکی از جنبه‌های قطعی تغییر اقلیم در دهه‌های پیش‌رو خواهد بود و از گزارش‌های اخیر می‌توان دریافت، تجمع دی‌اکسیدکربن در نیوار نسبت به آنچه که انتظار می‌رفت سریع‌تر بوده و مقدار آن در حدود ۲ ppm/year خواهد بود (IPCC, ۲۰۰۷).

از سوی دیگر، تغییر غلظت دی‌اکسیدکربن نیوار اثر قابل توجهی را بر تولیدات کشاورزی خواهد داشت. نتایج تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده که با افزایش دی‌اکسیدکربن کارایی مصرف آب، سوخت و ساز نوری خالص، تولید زیست‌توده و عملکرد محصولات افزایش می‌یابد (کیمبل و همکاران، ۲۰۰۲ و تایز و همکاران، ۲۰۰۳). توبرت و همکاران (۲۰۰۴) گزارش کردند که افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در نیوار، تولید زیست‌توده را در سویا (حدود ۴۰ درصد) و ذرت خوشه‌ای (حدود ۳۰ درصد) افزایش می‌دهد.

لولی و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی اثر غلظت دی‌اکسیدکربن و دمای در حال افزایش برای  $ET_c$  و  $ET_0$  در منطقه‌ی مدیترانه پرداختند. ایشان از معادله‌ی پنمن-مانتیت برای شبیه‌سازی تغییرات آینده‌ی  $ET_0$  به وسیله‌ی واسنجی فراسنج مقاومت تاج پوشش استفاده کردند. مصرف آب در دوره‌ی ۲۰۰۶-۱۹۶۱ (اندازه‌گیری‌شده) و ۲۰۱۰-۲۰۷۱ (شبیه‌سازی‌شده) برای ایجاد نمایشنامه اقلیمی آینده مطالعه شد و مشخص گردید که در آینده فعالیت سوخت و ساز نوری افزایش، هدایت روزنه‌ای کاهش و سطح بهره‌وری مصرف آب در گیاه افزایش خواهد یافت.

اثر دی‌اکسیدکربن در گیاهان و شرایط رطوبتی مختلف بسیار متغیر است (آبابایی و همکاران، ۲۰۱۴). با دو برابر شدن غلظت دی‌اکسیدکربن، عملکرد در گیاهان

C3 و C4 به ترتیب ۳۴ و ۱۵ درصد افزایش پیدا می‌کند (آلن، ۱۹۹۰). توبیلو و همکاران (۲۰۰۷) نیز گزارش کردند که گونه‌های C3 و C4 نسبت به افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، واکنش متفاوتی نشان می‌دهند. دو برابر شدن غلظت دی‌اکسیدکربن نیوار باعث افزایش سوخت و ساز نوری به میزان ۳۰ تا ۵۰ درصد در گونه‌های C3 (مثل گندم، سویا، سیب‌زمینی و آفتابگردان) و ۱۰ تا ۲۵ درصد در گونه‌های C4 (مثل ذرت و ذرت خوشه‌ای) می‌شود. بیشترین اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن زمانی حاصل می‌شود که محدودیت رطوبت وجود داشته باشد (ماندرشید و ویگل، ۲۰۰۷). افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن همچنین باعث کاهش خسارات ناشی از خشکسالی می‌گردد، که این تأثیر را می‌توان به علت کاهش هدایت روزنه‌ای به دلیل کاهش اتلاف آب برگ از طریق روزنه‌ها و افزایش کارایی مصرف آب به وسیله گیاه دانست (دونلی و همکاران، ۲۰۰۰). ون یوترخت و همکاران (۲۰۱۱) عملکرد نرم‌افزار AquaCrop را برای شبیه‌سازی رشد و محصول تحت افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن نیوار ارزیابی کردند. افزایش دی‌اکسیدکربن، علاوه بر کاهش هدایت روزنه‌ای و تعرق گیاه می‌تواند تولید محصول را نیز افزایش دهد. در این مطالعه نرم‌افزار AquaCrop استفاده شد و فراسنج WP نرم‌افزار به عنوان بهترین گزینه برای بررسی قدرت جذب گیاه و پاسخ به دی‌اکسیدکربن معرفی گردید.

بنابراین، مشاهده می‌شود که از یک سو افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن نیوار در آینده‌ی نزدیک قابل توجه بوده و از سوی دیگر، اثر این افزایش بر میزان تبخیر-تعرق و سوخت و ساز نوری گیاه غیرقابل انکار است. علاوه بر این، نتایج بسیاری از مطالعات پیشین، از جمله بررسی آبابایی و همکاران (۲۰۱۴) در شبکه‌ی آبیاری قزوین، حاکی از کاهش منابع آب موجود برای کشاورزی به دلیل وقوع تغییرات اقلیمی هستند. در این مطالعه، اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن تحت نمایشنامه‌های تغییر اقلیم بر عملکرد، تعرق و بهره‌وری مصرف آب غلات مهم دشت قزوین (گندم و جو و ذرت) و با فرض ثابت ماندن سطح تأمین آب آبیاری برای محصولات کشاورزی، با استفاده از نرم‌افزار AquaCrop بررسی شد. این فرض بر این استدلال استوار است که معمولاً مطالعات نیاز آبی محصولات کشاورزی در فواصل زمانی طولانی تکرار می‌شوند و به این ترتیب، مقادیر نیاز آب آبیاری در فواصل این مطالعات و

ورودی‌های نرم‌افزار شامل چهار دسته از اطلاعات از جمله داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه هستند. داده‌های اقلیمی مورد نیاز نرم‌افزار عبارتند از حداکثر و حداقل دمای روزانه، تبخیر-تعرق گیاه مرجع ( $ET_0$ )، بارندگی و غلظت دی‌اکسیدکربن (راس و همکاران، ۲۰۰۹). ویژگی‌های مورد نیاز خاک نیز شامل هدایت آبی اشباع ( $K_{sat}$ )، رطوبت حجمی اشباع ( $\theta_{sat}$ )، رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی ( $\theta_{FC}$ ) و رطوبت حجمی در نقطه‌ی پژمردگی ( $\theta_{PWP}$ ) در لایه‌های مختلف هستند. اطلاعات مدیریت مزرعه نیز شامل زمان و مقدار آبیاری‌ها، سطح حاصلخیزی خاک و تأثیر خاکپوش گیاهی است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹). در این تحقیق از نرم‌افزار AquaCrop 4.0 استفاده شد.

پیش از استفاده از نرم‌افزار AquaCrop، ضروری است که واسنجی و اعتبارسنجی آن برای گیاهان مختلف و با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای مناسب در سطح منطقه‌ی مطالعاتی یا مناطق نزدیک به آن صورت پذیرند. به این منظور، از نتایج مطالعات گلکار (۱۳۷۷) برای واسنجی و اعتبارسنجی فراسنج‌های گیاهی گندم، فرهادی بانسوله (۱۳۷۷) برای جو، و میرلطیفی و ستوده‌نیا (۱۳۸۱) برای ذرت دانه‌ای (برای دو سال ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰) استفاده شد. بافت خاک سه مطالعه دارای بافت متوسط بوده و حدود ۱۰۰ سانتیمتر عمق دارد. واسنجی نرم‌افزار برای گندم و جو با تیمارهای آبیاری کامل و ۵۰ درصد کم آبیاری و ارزیابی با بقیه تیمارها انجام شد. در مورد ذرت دانه‌ای نیز واسنجی با تیمار MAD برابر با ۵۰ درصد و با بقیه تیمارها ارزیابی صورت گرفت (جدول ۱).

## نمایشنامه‌های تغییر اقلیم و افزایش غلظت

### دی‌اکسیدکربن نیوار

نمایشنامه‌های A1B، A2، B1 و B2 هیئت بین‌المللی تغییر اقلیم (IPCC) که تحت عنوان نمایشنامه‌های انتشار شناخته می‌شوند، به عنوان نمایشنامه‌های افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن انتخاب شدند. میزان افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن نیوار تحت نمایشنامه‌های مختلف از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۵ در شکل ۱ نمایش داده شده و با همین مقادیر در بازه زمانی ۲۶ ساله ۲۰۰۹-۱۹۸۴ (دوره‌ی مبنا) مقایسه شدند. برای مطالعه‌ی تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر رشد محصولات مورد نظر،

بدون توجه به تغییرات اقلیمی یا وضعیت منابع آب، ثابت باقی می‌ماند. بر این اساس، فرض ثابت ماندن سطح تأمین آب آبیاری برای محصولات کشاورزی، فرضی خوش‌بینانه، اما در کوتاه‌مدت نزدیک به واقعیت است.

## مواد و روش‌ها

### معرفی نرم‌افزار AquaCrop

نرم‌افزار AquaCrop از معادله‌ی دورنبوس و کسام، (۱۹۷۹) (رابطه‌ی ۱) استنتاج شده است که در آن  $ET$  نسبی اساس محاسبه‌ی عملکرد است:

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (1)$$

در این معادله  $Y_x$  حداکثر عملکرد،  $Y_a$  عملکرد واقعی،  $ET_x$  حداکثر تبخیر-تعرق،  $ET_a$  تبخیر-تعرق واقعی و  $K_y$  ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش تبخیر-تعرق نسبی است. AquaCrop به تفکیک تبخیر-تعرق ( $ET$ ) به تعرق از سطح محصول ( $Tr$ ) و تبخیر از سطح خاک ( $E$ ) می‌پردازد. تفکیک  $ET$  به  $Tr$  و  $E$  از اثر مصرف غیرتولیدی آب از طریق  $E$ ، به‌ویژه در شرایط پوشش گیاهی ناکامل جلوگیری می‌کند. تعرق روزانه ( $Tr_i$ ) با استفاده از  $ET_0$  روزانه و بهره‌وری مصرف آب گونه‌ی گیاهی ( $WP$ ) که با استفاده از نیاز تبخیری و غلظت دی‌اکسیدکربن نیواری بهنجار شده است، به وزن قسمت‌های هوایی گیاه تبدیل می‌شود (رابطه‌ی ۲):

$$B_i = WP * \left(\frac{Tr_i}{ET_{0,i}}\right) \quad (2)$$

که در آن،  $WP$  بهره‌وری مصرف آب (زیست‌توده‌ی تولیدشده به ازای هر واحد تعرق) بوده که مقدار آن در شرایط اقلیمی مشابه، تقریباً ثابت و برابر است (هنکس، ۱۹۸۳ و تانر و سینکلر، ۱۹۸۳). با بهنجار کردن  $WP$  برای شرایط اقلیمی متفاوت، مقدار آن به یک فراسنج ثابت تبدیل خواهد شد (استدیوتو و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین، گام گذاشتن از معادله‌ی (۱) به معادله‌ی (۲) دلالت بر صحت و عمومیت نرم‌افزار دارد. برتری دیگر معادله استفاده شده در نرم‌افزار AquaCrop (رابطه‌ی ۲) نسبت به رابطه‌ی (۱) این است که شبیه‌سازی فرایندهای رشد گیاه در آن با استفاده از گام‌های زمانی روزانه صورت می‌گیرد، در حالی که در رابطه‌ی (۱)، شبیه‌سازی به صورت ماهانه یا فصلی انجام می‌شود (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹).

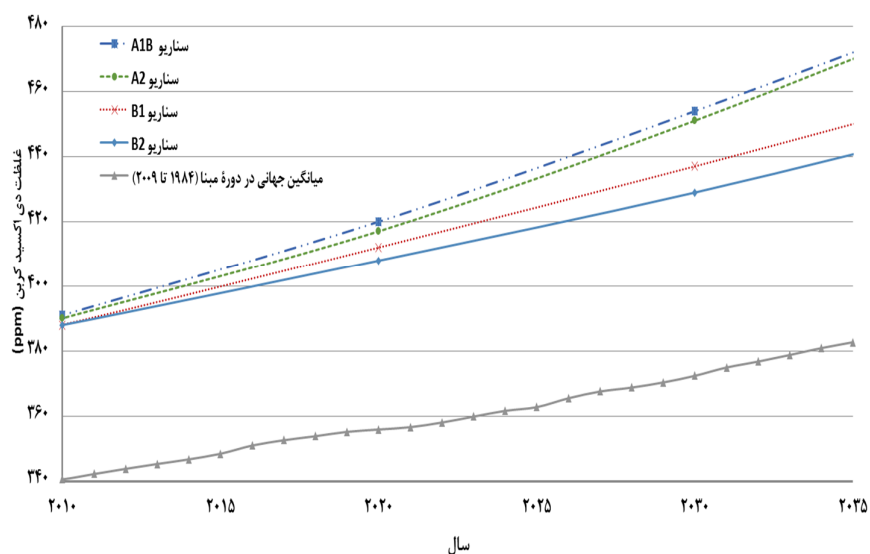
این‌که حتی در شرایط فعلی، منابع آبی در بسیاری از سال‌ها برای تأمین نیاز آبیاری محصولات کشاورزی منطقه مطالعاتی ناکافی هستند، از افزایش میزان آبیاری خودداری شد و فرض گردید حجم آب آبیاری در آینده نسبت به شرایط کنونی بدون تغییر باقی می‌ماند. از تیمارهای آبیاری کامل (T100) برای گندم و جو؛  $MAD=40\%$  برای ذرت دانهای برای مطالعه تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در آینده استفاده شد.

شبیه‌سازی‌های ۲۶ ساله با استفاده از نرم‌افزار AquaCrop و با لحاظ کردن نمایشنامه‌های افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن برای هر سه محصول انجام شدند. داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیک قزوین به عنوان اطلاعات هواشناسی در دوره مینا و دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۵ استفاده شدند، با این تفاوت که در این دوره، داده‌های هواشناسی دوره مینا بدون تغییر استفاده گردید، اما غلظت دی‌اکسیدکربن مطابق با مقادیر فرض شده در نمایشنامه‌های تغییر اقلیم افزایش پیدا کرد. با توجه به

جدول ۱- تیمارهای مختلف آبیاری در غلات مختلف.

تیمارهای آبیاری	گندم	جو	ذرت دانهای <sup>۱</sup>
T110	۱۰٪ بیش آبیاری	-	-
T100	آبیاری کامل	آبیاری کامل	-
T90	۱۰٪ کم آبیاری	۱۰٪ کم آبیاری	-
T80	۲۰٪ کم آبیاری	۲۰٪ کم آبیاری	MAD=80%
T70	۳۰٪ کم آبیاری	۳۰٪ کم آبیاری	-
T60	۴۰٪ کم آبیاری	۴۰٪ کم آبیاری	MAD=60%
T50	۵۰٪ کم آبیاری	۵۰٪ کم آبیاری	MAD=50%
T40	۶۰٪ کم آبیاری	۶۰٪ کم آبیاری	MAD=40%
T30	۷۰٪ کم آبیاری	۷۰٪ کم آبیاری	-
T20	۸۰٪ کم آبیاری	۸۰٪ کم آبیاری	-
T10	۹۰٪ کم آبیاری	۹۰٪ کم آبیاری	-
T0	دیم	دیم	-

۱. تیمار شاهد: MAD=40%



شکل ۱- افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن نیوار در نمایشنامه‌های مختلف

## نتایج و بحث

## واسنجی و اعتبارسنجی نرم افزار AquaCrop

در خلاصه‌ای از اطلاعات گیاهی پس از واسنجی ارائه شده است. پس از واسنجی نرم افزار، اقدام به شبیه‌سازی عملکرد غلات تحت تیمارهای مختلف شد. برای بررسی بهتر کارایی نرم افزار، شاخص‌های آماری مناسب محاسبه شدند (جدول ۳). در ارتباط با گندم، حداقل و حداکثر خطای نسبی به ترتیب ۰/۲ و ۱۴/۲

درصد در تیمارهای T90 و T60 حاصل شده‌اند. همچنین به‌طور میانگین میزان خطای نسبی نرم افزار در تخمین عملکرد در حدود ۵/۳ درصد است. کارایی مدل سازی برابر با ۰/۹۱ است که در سطح قابل قبول ارزیابی می‌گردد. علیزاده و همکاران (۱۳۸۹) کارایی نرم افزار AquaCrop را برای دوره‌های آبیاری ۷ و ۱۴ روز به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۷۶ گزارش نموده‌اند. حداکثر خطای نسبی برای پیش‌بینی عملکرد گندم به وسیله نرم افزار AquaCrop حدود ۲۷ درصد (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹) گزارش شده است.

جدول ۲- فراسنج‌های گیاهی غلات مورد مطالعه

ذرت	جو	گندم	گیاه	روز پس از کاشت
۶	۱۷	۱۷	جوانه زنی	
۶۶	۱۷۵	۱۷۵	گل‌دهی	
۵۴	۱۹۱	۱۹۱	حداکثر پوشش گیاهی	
۱۰۷	۲۰۱	۲۰۱	شروع پیری پوشش گیاهی	
۱۳۲	۲۳۵	۲۳۵	رسیدگی فیزیولوژیکی	
۱۰۸	۹۷	۹۷	حداکثر عمق توسعه ریشه	
۱۳	۱۳	۱۳	طول دوره گلدهی (روز)	
۲۳۰	۱۰۰	۱۰۰	ماکزیمم عمق ریشه (cm)	
۰/۴۹	۳/۱۳	۳/۳۷	پوشش گیاهی اولیه (درصد)	
۹۰	۸۰	۸۰	حداکثر پوشش گیاهی (درصد)	

جدول ۳- مقادیر درصد خطای نسبی (RE) محاسبه شده برای محصولات مختلف (برحسب درصد)

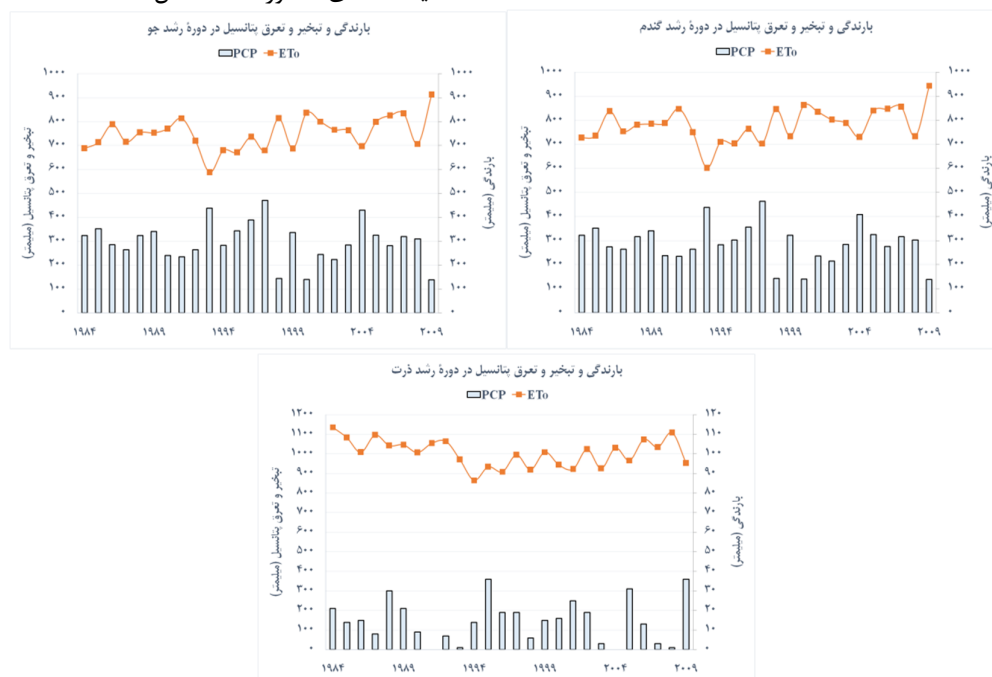
تیمارها	گندم	جو	ذرت ۱۳۷۹	ذرت ۱۳۸۰
T110	۱/۵	-	-	-
T100	-۴/۰	۲/۹	-	-
T90	-۰/۲	۰/۴	-	-
T80	-۰/۴	-۲/۸	-۳/۸	۱/۹
T70	-۵/۷	۰/۷	-	-
T60	۱۴/۲	۰/۱	-۴/۶	۵/۹
T50	۲/۰	-۳/۹	۱/۶	۶/۲
T40	۲/۶	۳/۳	-۷/۲	۱۱/۹
T30	۳/۳	۷/۹	-	-
T20	۱۰/۶	۵/۰	-	-
T10	۹/۴	-۱۵/۲	-	-
T0	-۱۰/۱	-۰/۴	-	-
میانگین قدرمطلق خطاهای نسبی (%)	۵/۳	۳/۹	۴/۳	۶/۵
حداکثر خطا (ME)(Kg/ha)	۶۸۳	۳۹۲	۸۱۸	۱۵۰۰
ریشه دوم میانگین مجذور خطاها (RMSE) (کیلوگرم بر هکتار)	۲۸۶/۶	۲۳۳/۹	۴۴۴/۴	۷۹۶/۳
ضریب تبیین (R <sup>2</sup> )	۰/۹۲۲	۰/۹۳۳	۰/۹۶۲	۰/۹۶۲
کارایی مدل سازی (EF)	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۹۵

ذرت بیشتر است. افزایش بیشتر عملکرد گیاهان C3 (مانند گندم و جو) نسبت به گیاهان C4 (مثل ذرت) نسبت به افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در پژوهش‌های قبلی نیز گزارش شده است. آلن (۱۹۹۰) افزایش ۳۴ و ۱۵ درصدی را به ترتیب برای گیاهان C3 و C4 برای دو برابر شدن غلظت دی‌اکسیدکربن گزارش نموده است. توپیلو و همکاران (۲۰۰۷) نیز افزایش ۳۰ تا ۵۰ درصدی را برای گیاهان C3 و افزایش ۱۰ تا ۲۵ درصدی را برای گیاهان C4 برای همین سطح افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن گزارش کرده‌اند. درصد افزایش عملکرد پیش‌بینی شده در این تحقیق به این دلیل کمتر از این مقادیر است که تا سال ۲۰۳۵ افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در نمایشنامه‌های مختلف حداکثر ۲۲ درصد پیش‌بینی شده است، که در مقایسه با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بررسی شده در این دو مطالعه (۱۰۰ درصد افزایش)، به میزان قابل توجهی کم‌تر است. در ارتباط با گندم و جو، بیشترین درصد افزایش عملکرد در بین نمایشنامه‌های مختلف مربوط به نمایشنامه A1B و در ذرت مربوط به نمایشنامه B2 است. همچنین، برای هر سه محصول در نمایشنامه‌های A1B و A2 و همچنین B1 و B2 درصد افزایش عملکرد تقریباً یکسان پیش‌بینی شده و این یافته، به دلیل مقادیر نزدیک دی‌اکسیدکربن در نمایشنامه‌های مذکور است (شکل ۱).

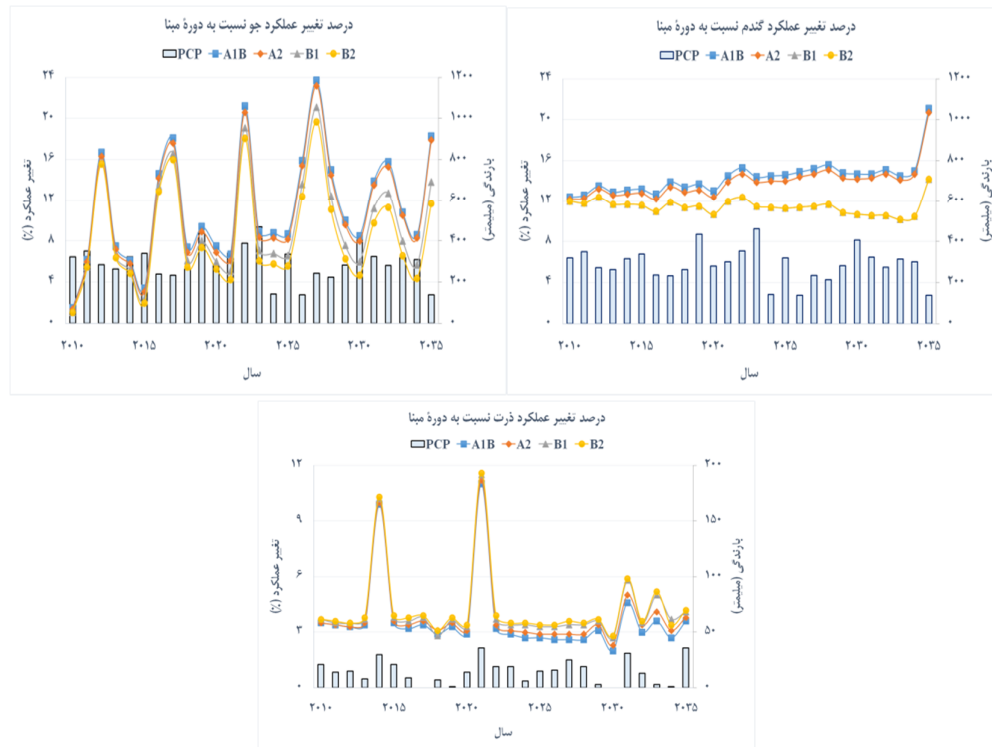
در مورد ذرت، حداقل و حداکثر خطای نسبی به ترتیب ۱/۹ و ۱۱/۹ درصد به ترتیب در تیمارها T80 و T40 در سال ۱۳۸۰ مشاهده شد. همچنین، آنچه در مورد ذرت قابل توجه است اینکه با کاهش آب مصرفی، دقت شبیه‌سازی‌های نرم‌افزار افزایش می‌یابد. قابل ذکر است که در مطالعه‌ی ذرت، تیمارهای کم آبیاری متفاوت با تیمارهای کم آبیاری گندم و جو در نظر گرفته شده‌اند. در تیمار T80 میزان کم آبیاری بیشتر از T40 است. در مجموع، کارایی نرم‌افزار در شبیه‌سازی عملکرد ذرت نیز در سطح مناسب ارزیابی می‌شود. شکل ۲ مقادیر بارندگی و تبخیر-تعرق بالقوه را به ترتیب برای گندم، جو و ذرت و در طول دوره رشد این محصولات نشان می‌دهد.

### تغییرات عملکرد، تعرق و بهره‌وری از مصرف آب

در شکل ۳ درصد تغییرات عملکرد گندم، جو و ذرت بر اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در نمایشنامه‌های مختلف برای دوره‌ی اقلیمی ۲۶ ساله ۲۰۱۰-۲۰۳۵ نسبت به دوره‌ی ۲۶ ساله‌ی مبنا (۲۰۰۹-۱۹۸۴) ارائه شده است. در نمایشنامه‌های تغییر غلظت، عملکرد گندم به‌طور میانگین نسبت به دوره‌ی مبنا بین ۱۱/۵ تا ۱۴/۴ درصد افزایش خواهد یافت. درباره‌ی جو و ذرت نیز این افزایش به‌ترتیب بین ۸/۵ تا ۱۱/۳ و ۳/۷ تا ۴/۳ درصد خواهد بود. بنابراین درصد افزایش عملکرد در گندم و جو نسبت به



شکل ۲- مقادیر بارندگی (PCP) و تبخیر و تعرق بالقوه (ETo) در طول دوره رشد برای دوره مبنا (۱۹۸۴-۲۰۰۹)

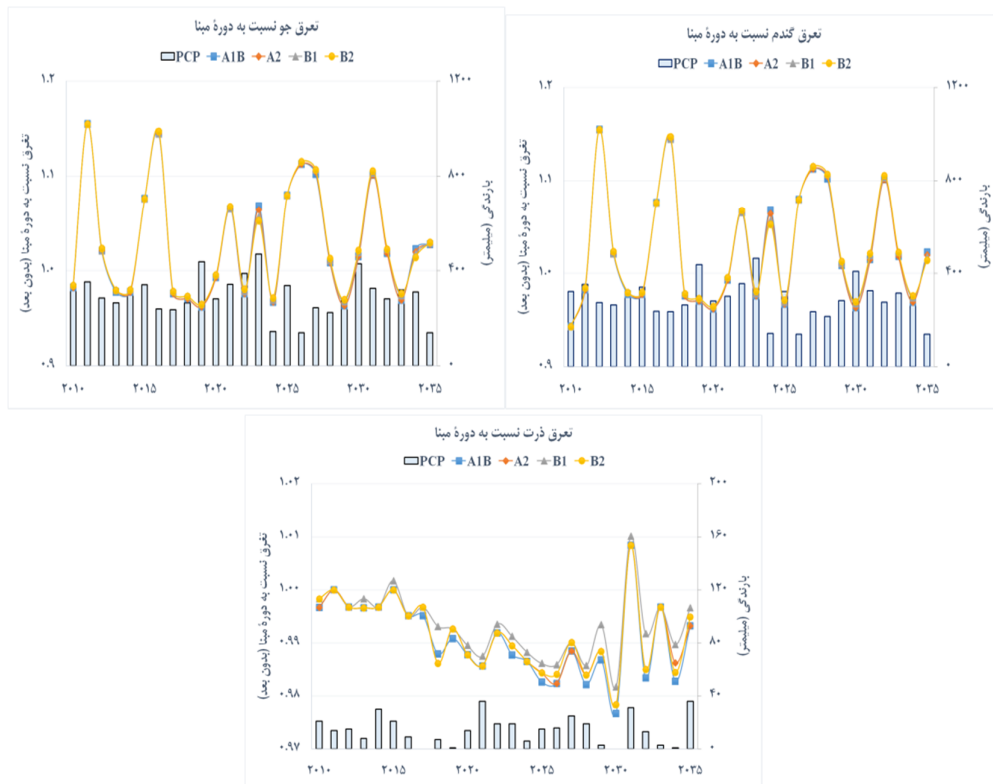


شکل ۳- تغییرات عملکرد تحت نمایشنامه‌های افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در برابر مقادیر بارندگی در فصل رشد (PCP)

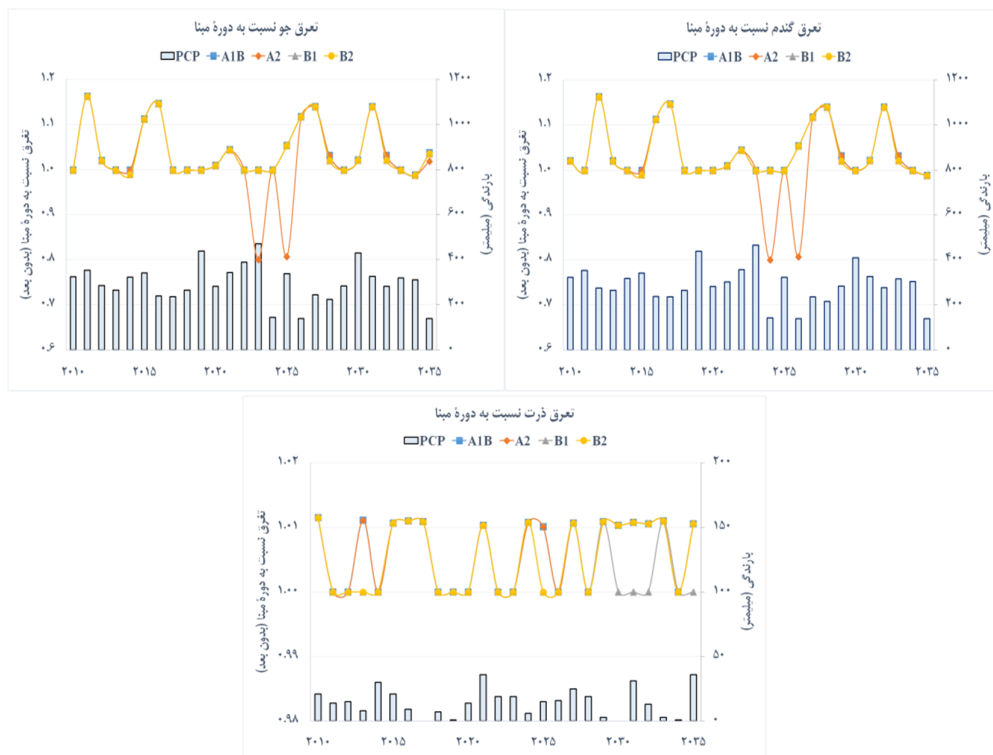
و ذرت به‌طور متوسط به ترتیب در حدود صفر، ۴ و ۱ درصد افزایش پیدا کرده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، میزان تعرق حداکثر یا همان تعرق بالقوه گیاه کاهش پیدا خواهد کرد، هرچند واکنش جو و ذرت به ترتیب بیشتر از واکنش گندم به افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن است. میزان متوسط کاهش تعرق حداکثر در نمایشنامه‌های مختلف نسبت به دوره‌ی مینا برای گندم، جو و ذرت به ترتیب حدود ۷، ۸ و ۱ درصد است. با افزایش عملکرد و کاهش تعرق، میزان بهره‌وری مصرف آب در نمایشنامه‌های مختلف افزایش می‌یابد. این افزایش در گندم، جو و ذرت به ترتیب در حدود ۱۳، ۶ و ۴ درصد برآورد می‌شود. پژوهش‌های قبلی نیز، کاهش تعرق را به دلیل کاهش هدایت روزنه‌ای، استفاده بهینه از آب در شرایط کمبود آب و در نتیجه بهبود بهره‌وری مصرف آب گزارش نموده‌اند (دونلی و همکاران، ۲۰۰۰؛ کیمبل و همکاران، ۲۰۰۲؛ تلیز و زیگر، ۲۰۰۳؛ ماندرشید و ویگل، ۲۰۰۷).

شکل ۴ تغییرات تعرق واقعی (Tr)، شکل ۵ تغییرات تعرق نسبی (نسبت تعرق واقعی به تعرق حداکثر،  $Tr/Tr_{max}$ ) و شکل ۶ تغییرات بهره‌وری مصرف آب (WP) را برای هر سه محصول، همه نمایشنامه‌های افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن و نسبت به دوره مینا نشان می‌دهند. در هر سه محصول، به طور متوسط، میزان تعرق گیاه در نمایشنامه‌های مختلف از دوره‌ی ۲۶ ساله مینا کمتر است، و همچنین تفاوت معنی‌داری بین مقادیر تعرق در نمایشنامه‌های مختلف وجود ندارد. بنابراین با افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، میزان تعرق کاهش خواهد یافت. میزان این کاهش نسبت به دوره‌ی ۲۶ ساله مینا، در گندم، جو و ذرت به ترتیب حدود ۷، ۵ و ۱ درصد خواهد بود.

اما با وجود این، تعرق نسبی (نسبت تعرق واقعی به تعرق حداکثر) برای محصولات مختلف در نمایشنامه‌های اقلیمی نسبت به دوره‌ی ۲۶ ساله مینا به طور متوسط کاهش نداشته است. میزان تعرق نسبی در نمایشنامه‌ها مختلف نسبت به تعرق نسبی دوره‌ی مینا برای گندم، جو

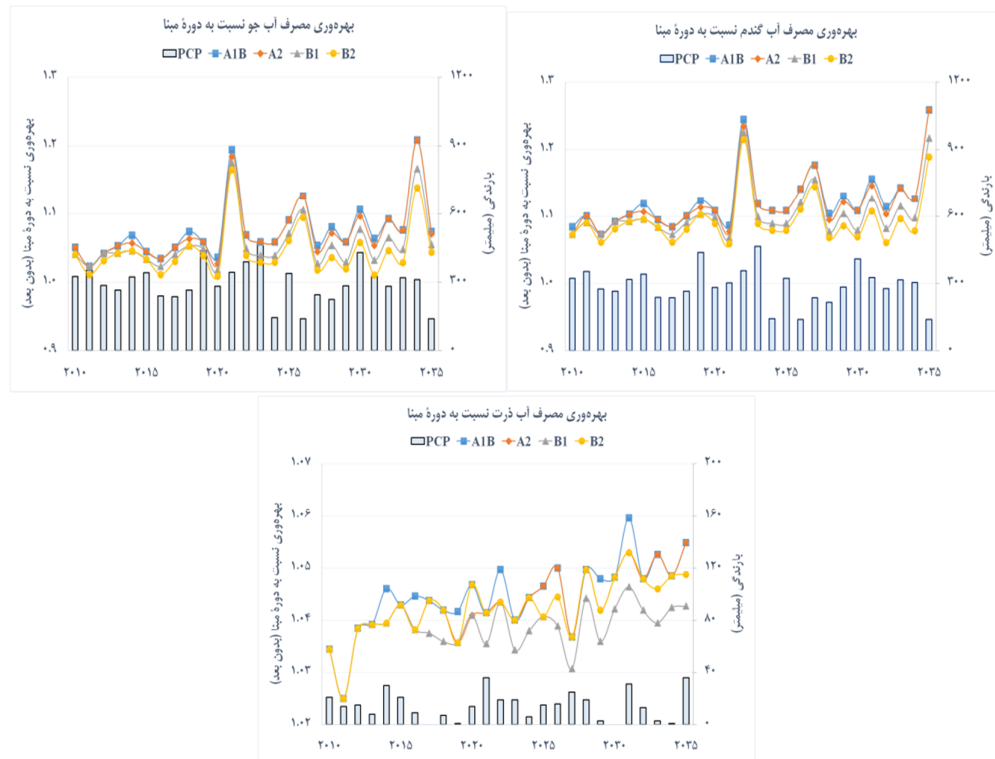


شکل ۴- تغییرات تعرق تحت نمایشنامه‌های افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در برابر مقادیر بارندگی در فصل رشد (PCP)



شکل ۵- تغییرات تعرق نسبی تحت نمایشنامه‌های افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در برابر مقادیر بارندگی در فصل رشد (PCP)





شکل ۶- تغییرات بهره‌وری مصرف آب تحت نمایشنامه‌های افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در برابر مقادیر بارندگی در فصل رشد (PCP)

نتایج نشان دادند که در نمایشنامه‌های مختلف افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، عملکرد گندم به‌طور میانگین بین ۱۱/۵ تا ۱۴/۴ درصد افزایش خواهد یافت. در مورد جو و ذرت نیز این افزایش به‌ترتیب بین ۸/۵ تا ۱۱/۳ و ۳/۷ تا ۴/۳ درصد خواهد بود. همچنین تعرق گندم، جو و ذرت در نمایشنامه‌های مختلف تغییر اقلیم به‌ترتیب و به‌طور میانگین ۰٫۷، ۵ و ۱ درصد کاهش خواهد داشت. کاهش تعرق در اثر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن، به دلیل کاهش تعرق حداکثر محصولات بوده و هیچ کاهشی در میزان تعرق نسبی (نسبت تعرق واقعی به تعرق حداکثر) پیش‌بینی نمی‌شود. میزان بهره‌وری مصرف آب نیز برای گندم، جو و ذرت به‌ترتیب حدود ۱۳، ۶ و ۴ درصد افزایش پیدا کرد.

### منابع

1) Ababaei, B., Sohrabi, T.M., Mirzaei, F. 2014. Development and application of a planning support system to assess strategies related to land and water resources for adaptation to climate change. *Climate Risk Management*. 6 2014: 39-50. DOI:

### نتیجه‌گیری

افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن نیوار پدیده‌ای قطعی در شرایط تغییر اقلیم است. آگاهی از میزان تأثیر این افزایش بر تعرق، سوخت و ساز نوری و عملکرد گیاهان زراعی سؤال‌آلی است که ذهن متخصصین را به خود مشغول داشته است. در این مطالعه اثر افزایش دی‌اکسیدکربن بر عملکرد و نیاز آبی غلات را با استفاده از نرم‌افزار AquaCrop مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که هدف، کمی‌سازی تأثیر افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن بر شاخص‌های گیاهی بود، هیچ تغییری در مقادیر داده‌های هواشناسی متناسب با نمایشنامه‌های تغییر اقلیم اعمال نگردید و برای دوره‌ی ۲۰۱۰-۲۰۳۵ میلادی نیز از همان داده‌های هواشناسی دوره‌ی ۲۶ ساله‌ی مینا (۱۹۸۴-۲۰۰۹) استفاده شد و تنها به افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن نیوار نسبت به دوره‌ی مینا توجه شد. از سوی دیگر سطح تأمین نیاز آبی محصولات کشاورزی نیز ثابت فرض گردید، که با توجه به نتایج تحقیقات پیشین و سابقه‌ی مطالعات در این محدوده، می‌تواند در کوتاه‌مدت فرضی نزدیک به واقعیت باشد.

- 1287-1292.
- 13) Manderscheid, R. and Weigel, H.J. 2007. Drought stress effects on wheat are mitigated by atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment. *Agron. Sustain. Dev.* 27: 79-87.
- 14) Mirlatifi, S.M and Sotoodeh-Nia, A. 2002. Simulating of deficit irrigation effects on maize production. Research report from water resource management organization from Power ministry. Pp 221 (In Persian)
- 15) Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and soft ware description. *Agronomy Journal*. 101:438-447.
- 16) Ramezani-Etedali, H, Nazari. B., Tavakoli, A.R. and Parsi-Nezhad M. 2009. Cropwat assessment in deficit irrigation management on wheat and barley in Karaj. *J. of Soil and Water*. 23(1): 119-129 (In Persian)
- 17) Steduto, P., Hsiao T.C. and Fereres, E. 2007. on the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*. 25:189-207.
- 18) Taiz, L., and Zeiger, E. 2003. *Plant physiology*. 3rd edition. Sunderland: Sinauer Associates, 690 pp.
- 19) Tanner, C.B. and Sinclair, T.R. 1983. Efficient water use in crop production: Research or re-search? p. 1-27. In H.M. Taylor, W.R. Jordan, and T.R. Sinclair (ed.) *Limitations to efficient water use in crop production*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- 20) Torbert, H. A., Prior S. A., Rogers H. H., and Runion, G. B. 2004. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> effects on N fertilization in grain sorghum and soybean. *Field Crops Research*. 88: 57-67.
- 21) Tubiello, F.N., Amthor, J.S., Boote, K.J., Donatelli, M., Easterling, W., Fischer, G., Gifford, R.M., Howden, M., Reilly, J. and Rosenzweig, C. 2007. Crop response to elevated CO<sub>2</sub> and world food supply: a comment on "Food for thought. . ." by Long et al., 2006. *Science* 312:1918-1921. *Eur. J. Agron.* 26, 215-223.
- 22) Van Uytrecht, E., Raes, D. and Williems, P. 2011. Considering sink strength to model crop production under elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Agricultural and Forest Meteorology*. 151: 1753-1762.
- 10.1016/j.crm.2014.11.001.
- 2) Alizadeh, H., Nazari, B., Parsi-Nezhad, M, Ramezani-Etedali, H. and Janbaz H.R. 2010. AquaCrop assessment in deficit irrigation management on wheat and barley in Karaj. *J. of Irrigation and Drainage*. 2(4): 273-283 (In Persian)
- 3) Allen, L.H. 1990. Plant responses to rising carbon dioxide and potential interactions with air pollutants. *J. Environ. Quality*, 19: 15-34.
- 4) Donnelly, A., Jones, M.B., Burke J.I. and Schnieders, B. 2000. Elevated CO<sub>2</sub> provides protection from O<sub>3</sub> induced photosynthetic damage and chlorophyll loss in flag leaves of spring wheat. *Agric. Ecosys. Environ.* 80: 159-168.
- 5) Doorenbos, J. and Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper 33*. FAO, Rome.
- 6) Earth System Research Laboratory (ESRI). 2014. History of atmospheric carbon dioxide from 800,000 years ago until January 2014.
- 7) Farhadi-Bansoleh. B. 1998. Investigation of deficit irrigation on barley production in Karaj and determining of production function. Ms. C. thesis from university of Tehran. Pp 120 (In Persian)
- 8) Golkar, H.R. 1998. Determining of wheat production function and evaluating of water stress effects on wheat production. Ms. C. thesis from university of Tehran. Pp122 (In Persian)
- 9) Hanks, R.J. 1983. Yield and water-use relationships. p. 393-411. In H.M. Taylor, W.R. Jordan, and T.R. Sinclair (ed.) *Limitations to efficient water use in crop production*. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- 10) IPCC. 2007. *Climate change 2007: The physical science basis. Summary for policymakers*. Paris: WMO/UNEP.
- 11) Kimball, B. A., Kobayashi, K., and Bindi, M. 2002. Responses of agricultural crops to free air CO<sub>2</sub> enrichment. *Advances in Agronomy*. 77: 293-368.
- 12) Lovelli, S., Perniola, M., Tommaso, T. Di., Ventrella, D., Moriondo, M. and Amato, M. 2010. Effects of rising atmospheric CO<sub>2</sub> on crop evapotranspiration in a Mediterranean area. *Agricultural Water Management*. 97: