نشریه پژوهش‌های اقلیم شناسی
سال دوازدهم | شماره چهل و پنجم | بهار ۱۴۰۰
وصول: ۹۸/۱۰/۲۰ پذیرش: ۹۹/۰۸/۱۷
صص ۸۰-۶۷

چشم انداز آب مجازی گیاهان عمده زراعی تحت سناریوهای واداشت تابشی تغییر اقلیم (مطالعه موردی استان کرمان)

مژده محمدرضایی[۱]، نوذر قهرمان*[۲]
۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی دانشگاه تهران
۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

چکیده

تحقیق حاضر، با هدف بررسی اثرات تغییر اقلیم بر آب مجازی گیاهان گندم، جو، ذرت، سیب‌زمینی و گوجه‌فرنگی در سه شهرستان کرمان، بم و جیرفت در جنوب ایران تحت دو سناریوی واداشت تابشی اجرا شد. میزان آب مجازی به دست آمده برای همه گیاهان مورد مطالعه روند افزایشی دارد اما این افزایش برای جو و گندم به‌طور متوسط در دوره آینده ۲۱۰۰-۲۰۱۸ تحت هر دو سناریو افزایش بیشتری از خود نشان می‌دهد. همچنین به‌طور متوسط کمترین میزان آب مجازی مربوط به گوجه‌فرنگی می‌باشد. در منطقه بم بیشترین میزان آب مجازی تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ مربوط به گیاه جو به میزان ۴۸۵۳/۰۸ و ۵۱۵۳/۱۵ مترمکعب بر تن، در جیرفت بیشترین آب میزان مجازی تحت سناریو RCP4.5 مربوط به گندم برای دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ برابر با ۴۹۸۴مترمکعب بر تن و تحت سناریو RCP8.5 بیشترین مقدار مربوط به جو در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ می باشد. در کرمان بیشترین آب مجازی تحت سناریو RCP4.5 مربوط به گندم در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ برابر با ۴۶۳۷ و تحت سناریو RCP4.5 بیشترین میزان پیش نگری شده متعلق به گیاه جو برابر با ۴۲۵۶/۱ مترمکعب بر تن در دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰تعیین شد. تدقیق برآوردهای نیاز آبی و مطالعه آب مجازی گیاهان راهبردی در سایر مناطق کشور تحت سناریوهای جدید تغییر اقلیم برای ارائه الگوی کشت مناسب و افزایش بهره وری آب توصیه می شود.

کلید واژه‌ها: ایران، آب مجازی، تبخیر تعرق، تغییر اقلیم، عملکرد.

* نویسنده مسئول: ۰۲۶-۳۲۲۴۱۱۱۹
Email: nghahreman@ut.ac.ir

مقدمه

کمبود آب و پیامدهای تغییر اقلیم چالشی بزرگ فرآروی امنیت غذایی در کشور است. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۲۵ میلادی، حداقل نیمی از مردم جهان با تنش آب و مشکلات ناشی از کم‌آبی مواجه شوند. این شرایط برای کشورهای واقع شده در نواحی خشک و نیمه‌خشک مانند ایران وخیم‌تر است. مطالعات پیشین عمدتاً معطوف به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر کشاورزی یا منابع آب بوده‌است، لیکن پژوهش‌هایی که مرتبط کننده این دو به یکدیگر با لحاظ تأثیرات تغییر اقلیم باشند و نشان دهند که چگونه گرمایش فراگیر جهانی میزان آب مصرفی برای تولید واحد محصول یا مقدار آب مجازی را تحت تأثیر قرار خواهد داد، اندک است. یکی از مفاهیمی که در دو دهه اخیر به ادبیات علمی در منابع آب کشاورزی وارد شده‌است، تجارت آب مجازی است. آب یک نهاده مهم و حیاتی در تولید محصولات کشاورزی و همچنین بسیاری از محصولات صنعتی و خدماتی است. هر واحد تولید این محصولات دربرگیرنده مصرف مقادیر متنابهی آب بوده که از آن با عنوان آب مجازی یاد می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، آب مجازی مقدار آبی است که یک فرآورده کشاورزی یا تولید صنعتی در مراحل مختلف زنجیره تولید از لحظه شروع تا پایان مصرف می‌کند. اما نکته قابل‌توجه این است که در خصوص تجارت آب مجازی دو دیدگاه کلی وجود دارد. در دیدگاه اول تجارت آب مجازی می‌تواند جایگزین مناسبی به‌جای انتقال بین حوضه‌های آب در کشورها باشد. بر این اساس، می‌توان به‌جای سرمایه‌گذاری برای انتقال فیزیکی آب، آن را به‌صورت مجازی وارد یا صادر کرد که این روش ارزان‌تر از سرمایه‌گذاری در پروژه‌های بزرگ‌مقیاس انتقال بین حوضه‌های آب است. در تئوری تجارت آب مجازی، برای کاهش فشار بر منابع آب، به کشورهای کم‌آب داخلی را برای فعالیت‌های تجاری پرسود اختصاص دهند. درواقع گزینه تجارت مجازی آب از طریق تبادل کالاهای کشاورزی، چه داخلی و چه خارجی، راهکاری است که می‌توان با استفاده از آن از بحران و کمبود آب در سطح ملی، منطقه‌ای و جهانی جلوگیری کرد و مانع تبعات منفی اقتصادی، اجتماعی و سیاسی آن شد. در دیدگاه دوم خودکفایی نسبی و سرمایه‌گذاری برای امنیت غذایی بر تجارت آب مجازی اولویت داده شده است. دلایل ارائه دیدگاه دوم این است که تجارت آب مجازی وضعیت اقتصادی آتی کشاورزان را نادیده گرفته و وابستگی درآمدی زارعین به کشاورزی را لحاظ نمی‌کند. از سوی دیگر، مشکلات به وجود آمده ناشی از بیکار شدن بخشی از جامعه بیشتر از منافع حاصل از تجارت آب مجازی است. بنابراین، از الزامات استفاده از ابزار تجارت آب مجازی برای مدیریت منابع آب آن است که به هردوی دیدگاهای اشاره شده در بالا توجه شود. برای مثال، اگر بر اساس رویکرد اول مقرر باشد برای یک گیاه مشخص، واردات جایگزین تولید شود، حتماً برای ایجاد اشتغال و یا پیشنهاد یک محصول جایگزین با مصرف آب پایین تر، برنامه‌ریزی شده باشد. مطالعات متفاوتی در داخل و خارج کشور در خصوص آب مجازی صورت گرفته است. فنگ و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از اطلاعات مشاهداتی هواشناسی و هیدرولوژیک منطقه، منابع سطحی و آب زیرزمینی حوضه تورپان در چین را محاسبه و ارزیابی نموده سپس با کمک فرمول پنمن اصلاح شده، آب مجازی پتانسیل در سال ۲۰۰۴ را محاسبه نمودند. نتایج نشان داد میانگین کل آب سطحی قابل‌استفاده در سال در دهه‌ی گذشته حدود ۶۶۷/۳ میلیون مترمکعب بود درحالی‌که حجم آب‌های سطحی در سال ۲۰۰۳ حدود ۴۹۴ میلیون مترمکعب بود که این بدان معنی است که قسمت عمده حوضه دارای محدودیت منابع آبی است در نتیجه بحران‌ها و محدودیت‌های جدی در حوضه وجود خواهد داشت. مقدار برداشت از آب‌های زیرزمینی در حوضه تورپان در سال ۲۰۰۳ حدود ۶۱۲ میلیون مترمکعب بوده که اساساً به حد بالاتری رسیده و سطح آب زیر زمینی حدود ۴۰-۱۰ متر در سال‌های اخیر کاهش یافته است. میزان آب مورد نیاز گیاه در سال ۲۰۰۴ حدود ۱۰۵۳/۳۹ میلی‌متر و پتانسیل کل آب مجازی موجود در ۶ محصول اصلی حدود ۵۲۵ میلیون مترمکعب بوده است. ارزیابی علمی منابع آب و استراتژی آب مجازی منطقه‌ای، فواید زیادی در زمینه‌های اجتماعی، اکولوژیکی، اقتصادی و توسعه پایدار به دنبال خواهد داشت. یوو و همکاران (۲۰۱۲) به محاسبه و بررسی مقدار آب مجازی و جریان آب مجازی بین‌المللی ۲۸ فرآورده حاصل از ۱۳ محصول طی سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۳ پرداختند. نتایج نشان داد که مقدار آب مجازی وارداتی و صادراتی به ترتیب

برابر ۱۶۸۰۴ و ۲۲۶ میلیون مترمکعب بود و خالص واردات آب مجازی برابر ۱۵۵۷۸ میلیون مترمکعب به دست آمد. عمده واردات آب مجازی مربوط به محصولات گندم، برنج، ذرت و سویا بود. برای کشور کره جنوبی ۹۶ درصد واردات آب مجازی از تعداد کمی از کشورها نظیر ایالت متحده آمریکا، چین، برزیل و ... تأمین می‌شود که این امر نشان دهنده وابستگی شدید کره جنوبی به این کشورهاست. میانگین ذخیره آب در مقیاس ملی و جهانی در تجارت تولیدات محصولات ذکر شده در دوره مورد مطالعه به ترتیب برابر ۲۳۸۷۰/۳ و ۷۲۵۳ میلیون مترمکعب برآورد گردید. که ۹۵/۳ درصد این ذخیره آب مجازی در مقیاس ملی مربوط به سه محصول گندم، ذرت و سویا بود. عربی و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی ردپای اکولوژیک آب بر مبنای داده‌های واردات و صادرات مواد غذایی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که رد پای اکولوژیک آب کشور در سال مذکور ۱۰۴ میلیارد مترمکعب بوده است و کشور با واردات خالص آب مجازی و کسر صادرات آب مجازی بدون در نظر گرفتن راندمان، ۱۲ و بر مبنای راندمان ۶۰ درصد ۲۰ میلیارد مترمکعب از منابع آب داخلی خود را ذخیره کرده است که اگر قرار بود این مقدار محصول در داخل کشور تهیه شود لازم بود ۱۱۲ میلیارد مترمکعب آب کشاورزی مصرف شود که چنین مقداری در دسترس نمی‌باشد. بابا زاده و سرائی تبریزی (۱۳۹۱) وضعیت کشاورزی استان هرمزگان از دیدگاه آب مجازی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که کل واردات و صادرات آب مجازی استان هرمزگان به‌ترتیب ۱۲۸۴/۳ و ۱۱۳۱/۱ میلیون متر مکعب در سال می‌باشد. سهم بخش زراعی، باغی و دامی از صادرات آب مجازی به ترتیب ۳۵/۳۲، ۵۹/۱۸ و ۵/۵ درصد بدست آمد. یکی از مهم‌ترین دلایل صادرات آب مجازی در استان هرمزگان تولید محصولات آب بر مانند خرما، سبزیجات و صیفی‌جات می‌باشد. مهم‌ترین منبع واردات آب مجازی به استان ناشی از وارد کردن برنج و گندم است. بذرافشان و گرکانی نژاد (۱۳۹۶) در تحقیقی تغییرات زمانی و مکانی آب مجازی و ردپای آب در محصول گوجه‌فرنگی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی طی دوره (۱۳۸۱-۱۳۹۵) پرداختند، تا بر این اساس ارزش و حجم آب مجازی مبادلاتی در هر شهرستان استان هزمرگان محاسبه و تأثیر تغییر متغیرهای اقلیمی مؤثر بر ردپای آب مشخص گردد. نتایج نشان داد، متوسط وزنی رپای آب در تولید گوجه فرنگی ۰/۹۳۶ مترمکعب در کیلوگرم بوده که بیشترین و کمترین میزان ردپای آب مربوط به شهرستان جاسک و بستک با مقدار ۱/۵۴ و ۰/۶۶ مترمکعب بر کیلوگرم است. متوسط حجم ردپای صادرات آب مجازی گوجه فرنگی ۸/ ۱۰ میلیون متر مکعب با ارزش ۲۸ میلیون ریال می‌باشد که بیشترین و کمترین سهم را به ترتیب شهرستان بندرعباس و بشاگرد داشته‌اند، اما به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین ارزش آب مجازی مربوط به شهرستان بستک و جاسک است. تغییرات زمانی ردپای آب نشان می-دهد، روند ردپا در بخش مرکزی رو به کاهش و در سایر بخش‌ها فاقد روند معنی‌دار است.

طباطبایی و قهرمان (۱۳۹۴) در تحقیقی با هدف امکان‌سنجی ارائه یک الگوی مناسب برای مدیریت کشت در شرایط آتی اقلیم، با توجه به رویکرد جدید در گزارش IPCC AR5 در دو ناحیه ایران، از خروجی‌های ریزمقیاس شده مدل EC-EARTH و نیز دو سناریو RCP4.5 وRCP8.5 از مجموعه سناریوهای IPCC AR5در دو منطقه خراسان و خوزستان استفاده کردند. نتایج حاصل نشان داد به جز در ایستگاه دزفول، بارش فصل رشد گیاه نیشکر، نسبت به میانگین اقلیمی، افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که این افزایش به ۳۵ درصد نیز خواهد رسید. همچنین طول دوره رشد در سناریو RCP8.5 به شکل معنی‌داری برای تمامی ایستگاه‌ها کاهش نشان می‌داد، اما تغییرات تبخیر تعرق گیاه در طول دوره رشد معنی‌دار نبوده و کمتر از ۵ درصد است. حلمی (۱۳۹۵) به بازنگری در برآوردهای نیاز آبیاری گیاهان زراعی گندم و ذرت تحت سناریوهای جدید RCP4.5 و RCP8.5 تغییر اقلیم تحت مدل اقلیم جهانی EC-EARTH در البرز جنوبی پرداختند. نتایج نشان داد که در دوره پایه در ایستگاه‌های کرج و قزوین با آمار بلندمدت، روند افزایشی در دما و تبخیر- تعرق وجود دارد به‌گونه‌ای که در دهه ۲۰۰۶-۲۰۱۵ نسبت به دهه ۱۹۸۵-۱۹۹۴، در ایستگاه قزوین ۰/۹۶ درجه سانتی‌گراد و در ایستگاه کرج ۰/۶۵ درجه سانتی‌گراد افزایش در میانگین دما دهه مشاهده می‌شود. این روند افزایشی در سناریوها تا سال ۲۱۰۰بیشتر خواهد شد به‌نحوی‌که میانگین دمای سالانه هوا در دهه ۲۱۰۰-۲۰۹۱ تحت سناریو RCP4.5، نسبت به دهه ۲۰۱۹-۲۰۱۰ در ایستگاه قزوین،

۲/۳ درجه سانتی‌گراد و در ایستگاه کرج ۲/۵ افزایش پیدا خواهد کرد. تغییر تاریخ کاشت تا حدی می‌تواند اثر افزایش دما بر تبخیر- تعرق و نیاز آبیاری گیاه را در طول فصل رشد برای گیاهان گندم و ذرت، در دوره‌های آتی تعدیل کند. بذرافشان و گرکانی نژاد (۱۳۹۶) در تحقیقی، به بررسی تغییرات زمانی و مکانی آب مجازی و ردپای آب در محصول گوجه‌فرنگی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی طی دوره (۱۳۸۱-۱۳۹۵) پرداختند، تا بر این اساس، ارزش و حجم آب مجازی مبادلاتی در هر شهرستان استان هزمرگان محاسبه و تأثیر تغییر متغیرهای اقلیمی مؤثر بر ردپای آب مشخص گردد. نتایج نشان داد متوسط وزنی ردپای آب در تولید گوجه فرنگی ۰/۹۳۶ مترمکعب در کیلوگرم بوده که بیشترین و کمترین میزان ردپای آب مربوط به شهرستان جاسک و بستک با مقدار ۱/۵۴ و ۰/۶۶ مترمکعب بر کیلوگرم است. متوسط حجم ردپای صادرات آب مجازی گوجه فرنگی ۸/ ۱۰ میلیون متر مکعب با ارزش ۲۸ میلیون ریال می‌باشد که بیشترین و کمترین سهم را به ترتیب شهرستان بندرعباس و بشاگرد داشته‌اند اما به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین ارزش آب مجازی مربوط به شهرستان بستک و جاسک است. تغییرات زمانی ردپای آب نشان می‌دهد، روند ردپا در بخش مرکزی رو به کاهش و در سایر بخش‌ها فاقد روند معنی‌دار است. نیکبخت شهبازی (۱۳۹۶) به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر میزان آب مجازی محصولات منتخب شامل گندم، جو، برنج، ذرت دانه‌ای و نیشکر در افق آینده در خوزستان با استفاده از مدل CanESM2 تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 پرداخت. نتایج نشان داد میزان دما به طور میانگین در همه ایستگاه‌های اهواز، آبادان، مسجد سلیمان، دزفول، بستان و رامهرمز و در همه سناریو ها افزایش می‌یابد و این افزایش در مورد سناریوی RCP8.5 بیشتر از سناریوی RCP4.5 می‌باشد. میزان میانگین بارش نیز در دوره‌های ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ کاهش می‌یابد. میزان آب مجازی به دست آمده برای تمامی محصولات کشاورزی مورد مطالعه روند افزایشی دارد اما این افزایش برای محصول برنج و ذرت دانه‌ای به طور متوسط در دوره ۲۰۶۰ و ۲۰۹۰ افزایش بیشتری از خود نشان می‌دهد.بررسی منابع علمی نشان می دهد، علیرغم تنوع و تعدد مطالعات مرتبط با آب مجازی و نیز و پیامدهای تغییر اقلیم بر تولیدات کشاورزی در ایران، پژوهشهای محدودی در زمینه پیش نگری کمی اثرات تغییر اقلیم بر میزان آب مجازی به ویژه با سناریوهای واداشت تابشی انجام شده است لذا این مطالعه با رویکرد تکمیل این مجموعه تحقیقات به انجام رسید.

داده ها و روش کار

منطقه مورد بررسی

منطقه مورد مطالعه در تحقیق حاضر ، بخشهای از جنوب ایران در استان کرمان است. در این مطالعه از ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمان شامل ۳ ایستگاه کرمان، بم، جیرفت استفاده شده و که هر ۳ ایستگاه دارای آمار بلندمدت بوده است. جدول (۱) نام و موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در مطالعه و شکل ۱ تصویر منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول۱- نام و مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد استفاده در مطالعه

ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
کرمان	۵۷/۰۸	۳۰/۲۹	۱۷۵۹/۲
بم	۵۸/۳۵	۲۹/۱	۱۱۰۱/۱
جیرفت	۵۷/۷۴	۲۸/۶۷	۶۸۶/۶

شکل ۱- موقعیت منطقه و ایستگاه‌های مطالعاتی

داده‌های اقلیمی منطقه

داده‌های اقلیمی مورد استفاده در این تحقیق مربوط به سه ایستگاه کرمان، بم و جیرفت از سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. این داده‌ها شامل میانگین روزانه دمای کمینه، بیشینه، ساعت آفتابی، سرعت باد، رطوبت نسبی می‌باشد.

برونداد مدل‌های اقلیمی

امروزه تهیه و استخراج داده‌های خروجی مدل‌های اقلیمی (در مقیاس سالانه، ماهانه و روزانه) از طریق مراکز مختلف تحقیقاتی امکان پذیر است. یکی از معتبرترین مراکز ارائه دهنده داده‌های ریز مقیاس شده، سایت ESGF که متعلق به مرکز هیدرولوژی و هواشناسی سوئد (SMHI) می‌باشد. مدل مورد استفاده در این پژوهش، CNRM-Cm5 است. این مدل در مرکز CNRM فرانسه طراحی شده است. تفکیک مکانی داده‌های ریزمقیاس شده در این مدل ۰/۵ درجه عرض جغرافیایی در ۰/۵ درجه طول جغرافیایی است (ESGF). خروجی مدل ریز مقیاس شده برای دوره تحت هر یک از دو سناریو مورد مطالعه در دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۰۶ می‌باشد که به‌صورت سال‌های ۳۶۵ و ۳۶۶ روزی تهیه شده‌اند. با توجه به‌اینکه در طی ۹۵ سال مورد مطالعه باید حداقل ۲۳ سال کبیسه وجود داشته باشد، ولی در این ۹۵ سال، فقط ۱۹ سال کبیسه وجود داشت، لذا هر ۵ سال، یک روز، یعنی روز آخر پنجمین سال حذف شده ونهایتاً سال‌ها به صورت سال ۳۶۵ روز تبدیل شدند.

سناریوهای مورد استفاده

هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش پنجم ارزیابی خود AR5 از سناریوهای جدیدRCP به‌عنوان نماینده‌های چهار خط سیر کلیدی واداشت تابشی با نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 استفاده نموده است.این سناریوها در سال ۲۰۱۴ توسط یک کمیته علمی و زیر نظر هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیمی با هدف مهیا نمودن مجموعه‌ای که از نتایج آن بتوان عوامل اصلی تغییرات اقلیمی را ردیابی نمود و نتایج آن را بر مدل‌های اقلیمی اعمال کرد، ارایه شده است. سناریوهای فوق بر اساس فرض هایصات متفاوت سطح فناوری، وضعیت اجتماعی و اقتصادی و خط‌مشی‌ها در آینده است که در هر شرایط می‌تواند منجر به سطح انتشار متفاوت گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی گردد. نام‌گذاری سناریوهای خانواده RCP بر اساس میزان سطح واداشت‌های تابشی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای تا پایان قرن ۲۱ شامل مقادیر ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸/۵ وات بر مترمربع انجام شده است. نتایج این سناریوها از سال ۱۸۵۰ تا پایان قرن ۲۱ را پوشش می‌دهد و تا سال ۲۱۰۰ نیز فرموله شده است. شکل (۲) که نمایشی از برآورد تغییرات واداشت

تابشی زمین تحت هریک از این چهار سناریو است، به‌خوبی این موضوع را نشان می‌دهد (IPCC، ۲۰۱۴).

تصحیح برآوردهای مدل اقلیمی، ضریب تصحیح انحراف معیار تحت دو سناریو مورد مطالعه می‌باشد. این روش با محاسبه ضرایب تصحیح میانگین و انحراف معیار دوره پایه، برآوردهای دوره آینده تحت سناریوهای تغییر اقلیم را تصحیح می‌نماید. تصحیح انحراف معیار بدین‌صورت است که با محاسبه انحراف معیار کمیت مورد مطالعه برای سه سری داده شامل داده‌های مشاهداتی در دوره پایه، داده‌های برآورد شده برای دوره پایه توسط مدل و داده‌های برآورد شده تحت سناریوهای تغییر اقلیم برای دوره آینده، طبق معادله زیر داده‌های تولید شده برای آینده اقلیمی منطقه با حفظ میانگین تصحیح می‌شوند:

$$STD_{fut} = \frac{STD_{base}^{obs}}{STD_{base}^{GCM}} \times STD_{fut}^{GCM} \qquad (۱)$$

که در ای معادله، STD_{fut} بیانگر انحراف معیار داده‌های آینده اقلیمی، STD_{base}^{obs} انحراف معیار داده‌های مشاهده‌شده در دوره پایه، STD_{base}^{GCM} انحراف معیار داده‌های خروجی مدل برای دوره پایه و STD_{fut}^{GCM}معرف انحراف معیار داده‌های برآورد شده توسط مدل برای دوره آینده می‌باشد.

همچنین با توجه به اینکه داده‌های مورد مطالعه تشکیل یک سری زمانی را می‌دادند، به‌منظور تصحیح میانگین داده‌های برآورد شده مدل از روش مشابه برای تصحیح میانگین داده‌های برآورد شده برای دوره اقلیمی آینده استفاده گردید. معادله استفاده شده برای تصحیح میانگین‌ها (رابطه ۲) عبارت است از:

$$Mean_{fut} = \frac{Mean_{base}^{obs}}{Mean_{base}^{GCm}} \times Mean_{fut}^{GCM} \qquad (۲)$$

که در این معادله نیز $Mean_{fut}$ میانگین داده‌های آینده اقلیمی، $Mean_{base}^{obs}$ میانگین داده‌های مشاهده‌شده در دوره پایه، $Mean_{base}^{GCm}$ بیانگر میانگین داده‌های خروجی مدل برای دوره پایه و $Mean_{fut}^{GCM}$ نیز معرف میانگین داده‌های برآورد شده توسط مدل برای دوره آینده است. با توجه به اینکه داده‌های دوره پایه در مقیاس روزانه در دسترس بودند، ابتدا داده‌ها بصورت سالانه برای دوره پایه تبدیل شده و پس از بدست آوردن ضریب تبدیل مناسب برای هر منطقه، تصحیح داده‌های مدل برای دوره آینده صورت گرفت (Babaeian and Kwon, 2004).

در صورت نبود داده های مستند و بلند مدت لایسیمتری یا تعیین معادلات ارجح برای برای برآورد تبخیرتعرق مرجع در منطقه، روش فائو پنمن مانتیث به‌عنوان روش استاندارد برای محاسبه تبخیر تعرق گیاه مرجع و با استفاده از داده‌های هواشناسی پیشنهاد شده است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). این معادله بر اساس روش‌های توازن انرژی و آئرودینامیک روی یک سطح مرطوب پوشیده از گیاه فرضی ارائه شده است و می‌تواند نیاز آبی گیاه را واقعی‌تر بیان کند. برای استفاده از این رابطه گیاه چمن به ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و مقاومت روزنه‌ای ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب بازتاب ۰/۲۳ با این فرض که شاخص سطح آن ۲۴ برابر ارتفاع گیاه باشد در نظر گرفته می‌شود:

$$ET_O = -\frac{0{\cdot}408\,\Delta\,(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0{\cdot}34U_2)} \qquad (۳)$$

که در آن، ET_O تبخیر و تعرق گیاه مرجع $(mmday^{-1})$، R_n تشعشع خالص در سطح گیاه $(Mj\,m^{-2}\,day^{-1})$، G جریان گرمایی خاک $(Mj\,m^{-2}\,day^{-1})$، T متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری (□)، γ ثابت سایکرومتری $(Kpa\,℃^{-1})$، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین $(m\,s^{-1})$، e_a فشار بخار اشباع (Kpa)، $e_s - e_a$کمبود فشار بخار در ارتفاع دو متری (Kpa)، Δ شیب منحنی فشار بخار $(Kpa\,℃^{-1})$، (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

مقادیر ضریب گیاهی، گیاهان مورد مطالعه با مرور اعداد پیشنهادی در کتاب نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی ایران (فرشی و امداد، ۱۳۷۷) برای هر ایستگاه انتخاب و سپس براساس شرایط اقلیمی ایستگاه‌های مطالعاتی و بر اساس دستور العمل مندرج در نشریه FAO56تصحیح شدند. با استفاده از رابطه (۴) تبخیر–تعرق گیاه به دست آمد:

$$ET_c = K_c \times ET_O \qquad (۴)$$

که در این معادله، ET_c تبخیر تعرق گیاه، K_c ضریب گیاهی و ET_O تبخیر– تعرق مرجع است.

تبخیر– تعرق مرجع با استفاده از نرم افزار ETo Calculator (http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/eto-calculator/en) هم برای دوره پایه و هم برای آینده به روش فائو پنمن مانتیث به دست آمد و تبخیر– تعرق به‌عنوان ورودی برای مدل AquaCrop استفاده شد.

برآورد عملکرد

برای برآورد عملکرد گیاهان مورد مطالعه از مدل AquaCrop استفاده شد. ورودی‌های این مدل شامل چهار دسته: داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت زراعی می‌باشند. مهم‌ترین داده‌های اقلیمی مورد نیاز مدل عبارتند از داده‌های دمای بیشینه و کمینه روزانه، تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ETo) و بارش. مدل از داده‌های دمای بیشینه و کمینه روزانه برای محاسبه درجه- روز رشد (GDD) به‌منظور کمی سازی اثرات تنشهای محیطی بر عملکرد زیست‌توده، استفاده می‌کند (استدتو و همکاران، ۲۰۰۹). داده‌های مورد نیاز خاک عبارت از هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{Sat})، رطوبت حجمی اشباع (θ_{Vsat})، رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی (θ_{VFC})، رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی (θ_{Vpwp}) می‌باشند (جدول ۲). داده‌های مربوط به گیاه به‌وسیله اعمال ضرائب تنش آبی با وضعیت رطوبت خاک و نیاز تبخیری جو که با چهار عامل تأثیر تنش بر رشد تاج پوشش گیاهی، هدایت روزنه‌ای از طریق باز یا بسته نگه‌داشتن روزنه‌ها، پیری تاج پوشش گیاهی و شاخص برداشت بیان می‌شوند، مربوط می شوند. داده‌های گیاهی ورودی شامل پارامترهای ثابت و داده‌های ویژه کاربر می‌باشند. اجزای مدیریت مزرعه‌ای شامل دو قسمت مدیریت آبیاری (در زمینه کشاورزی دیم و آبی) و مدیریت مزرعه‌ای (در زمینه سطوح مختلف حاصلخیزی خاک) است (استدتو و همکاران، ۲۰۰۹). مشخصات خاک ایستگاه‌ها، از شرکت کرمان زمین، تحت نظر جهاد کشاورزی استان کرمان دریافت گردید (جدول ۲).

جدول ۲- خصوصیات خاک در ایستگاه بم، جیرفت و کرمان

عمق نمونه خاک	بافت خاک	K_{Sat} Mm/day	θ_{Vsat} ٪	θ_{VFC} ٪	θ_{Vpwp} ٪
بم	لومی شنی	۱۲۱۱/۱	۴۴	۲۶/۳	۱۰/۶
جیرفت	شنی لومی	۲۲۰۵	۴۷/۷	۲۰/۴	۸/۳
کرمان	شنی	۳۰۶۷/۳	۳۹/۳	۱۷	۶/۶

محاسبه آب مجازی

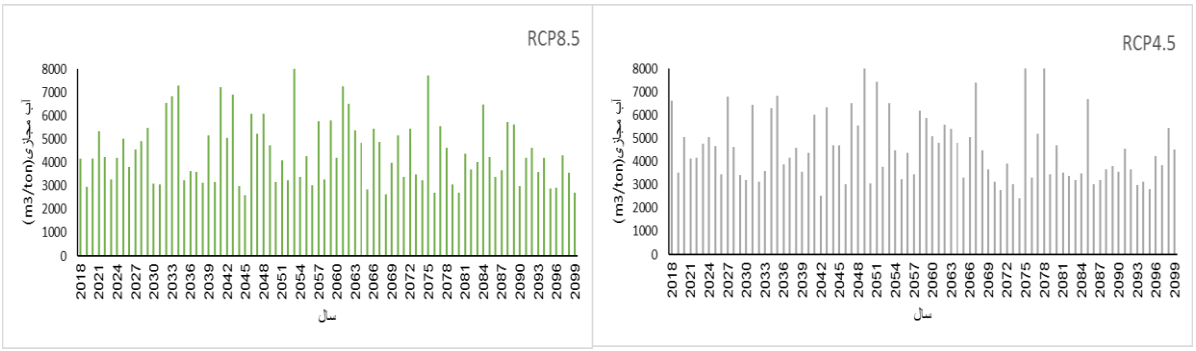
مقدار آب مجازی (VWC) مصرفی توسط یک محصول عبارت است از مقدار آب مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول که به دلیل تنوع اقلیمی هر محصول در نواحی مختلف میزان آب مصرفی و نیز عملکرد متفاوتی دارد مقادیر آب مجازی گیاهان منتخب این پژوهش با رابطه (۵) محاسبه گردید (فنگ و همکاران، ۲۰۱۰):

$$VWC = \frac{CWR}{P} = 10 \times \frac{ET_c}{Y} \quad (۵)$$

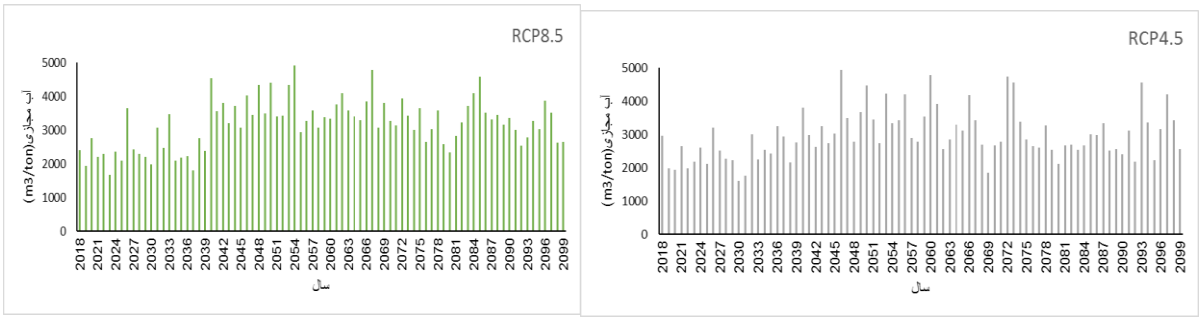
که در آن VWC مقدار آب مجازی ($m^3 ton^{-1}$)، CWR میزان آب مصرفی در دوره رشد محصول (m^3)، P میزان تولید محصول (ton) و Y متوسط عملکرد سالانه محصول ($\text{ton}\, ha^{-1}$) می‌باشد. ضریب ۱۰ برای تبدیل mm به $m^3 ha^{-1}$ استفاده می‌شود.

نتایج و بحث

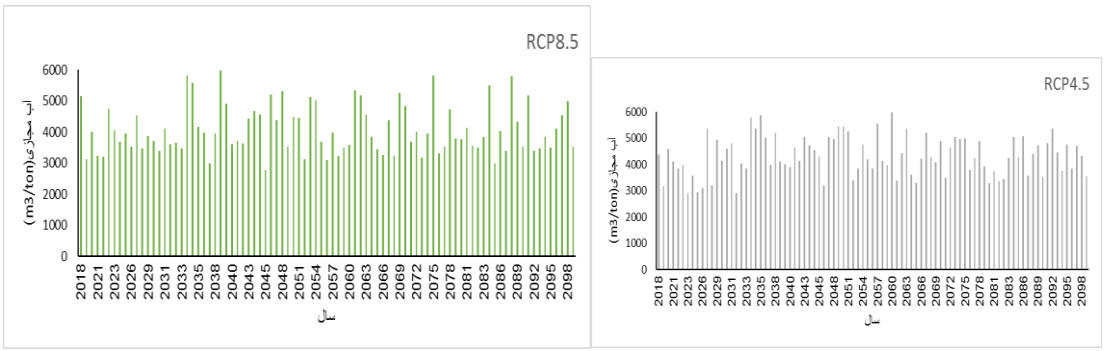
در این پژوهش، اثر تغییر اقلیم بر آب مجازی گیاهان در فصل رشد، در افق آینده (۲۰۱۸-۲۱۰۰) بررسی گردید. شکل‌های ۲ تا ۱۶ آب مجازی را برای گیاهان مورد مطالعه در فصل رشد انتخاب شده، به ترتیب برای ایستگاه‌های مطالعاتی بم، جیرفت و کرمان تحت سناریوهای منتخب RCP4.5 و RCP8.5 نشان می‌دهد.



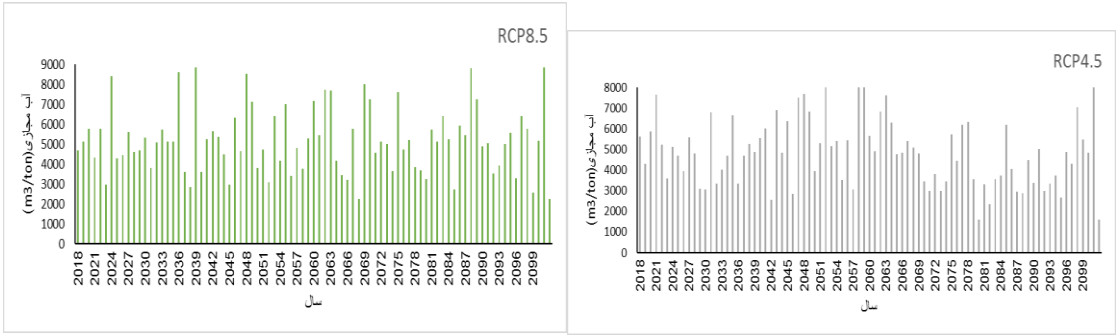
شکل ۲- تغییرات آب مجازی گندم در طول فصل رشد، ایستگاه بم، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)



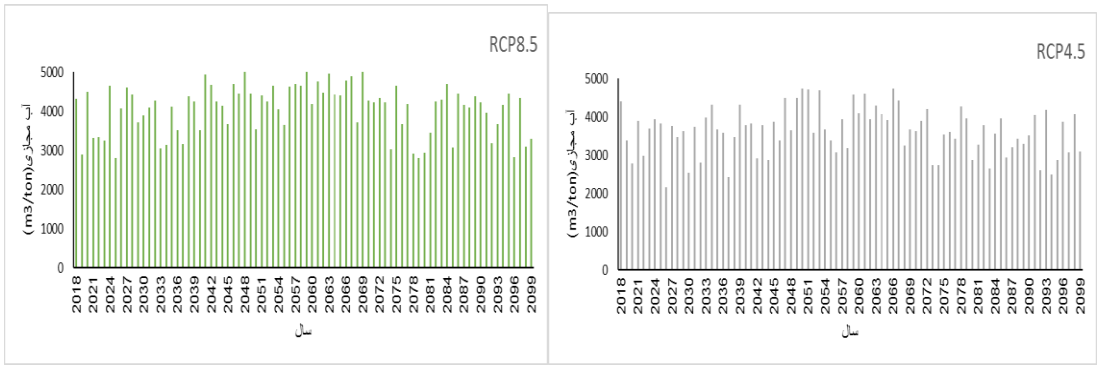
شکل ۳-تغییرات آب مجازی گندم در طول فصل رشد، ایستگاه جیرفت، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)



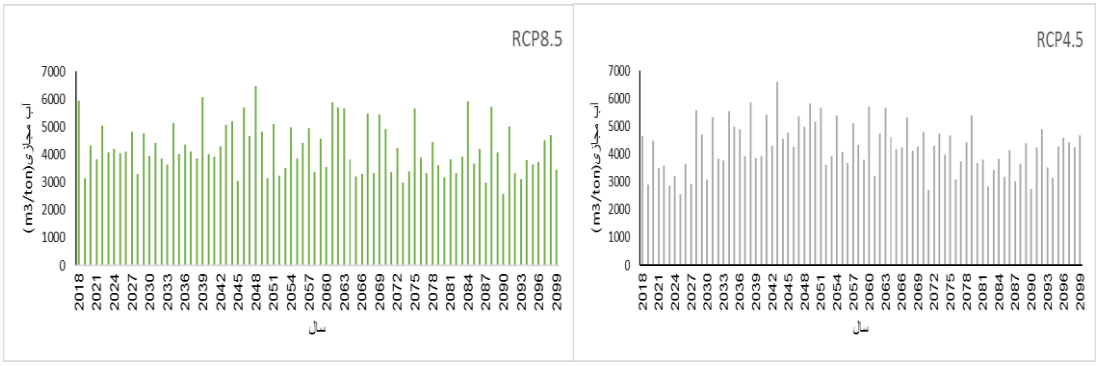
شکل ۴- تغییرات آب مجازی گندم در طول فصل رشد، ایستگاه کرمان، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)



شکل ۵-تغییرات آب مجازی جو در طول فصل رشد، ایستگاه بم، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)

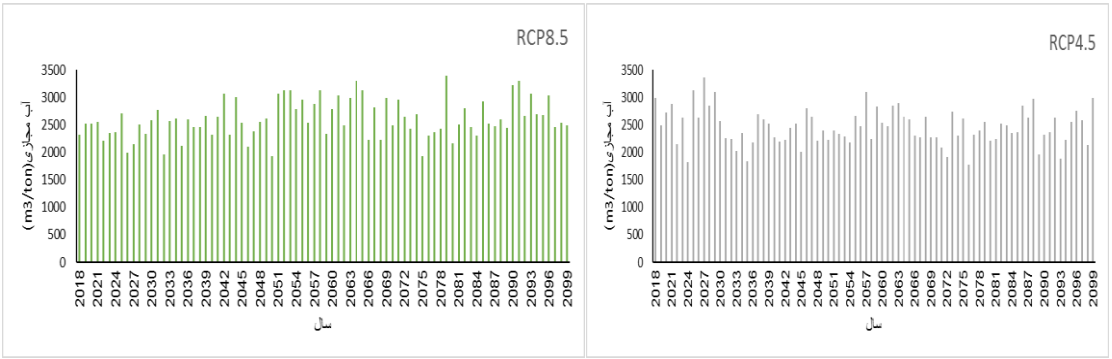


شکل ۶-تغییرات آب مجازی جو در طول فصل رشد، ایستگاه جیرفت، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)

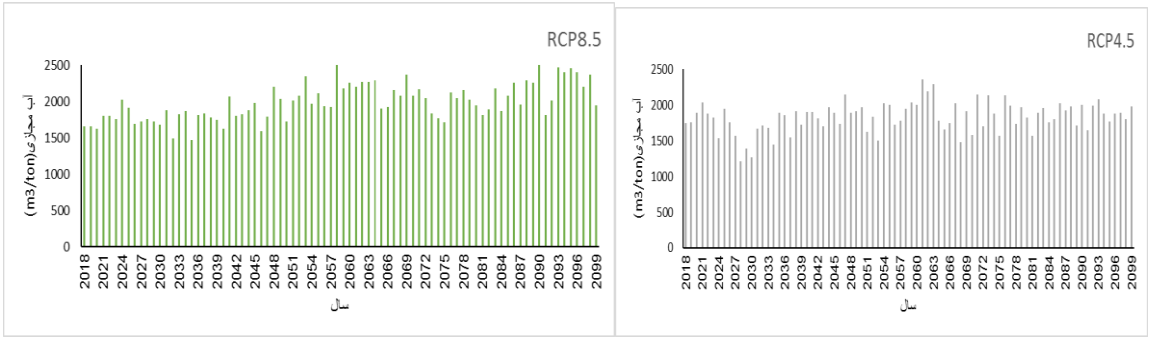


شکل ۷-تغییرات آب مجازی جو در طول فصل رشد، ایستگاه کرمان، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)

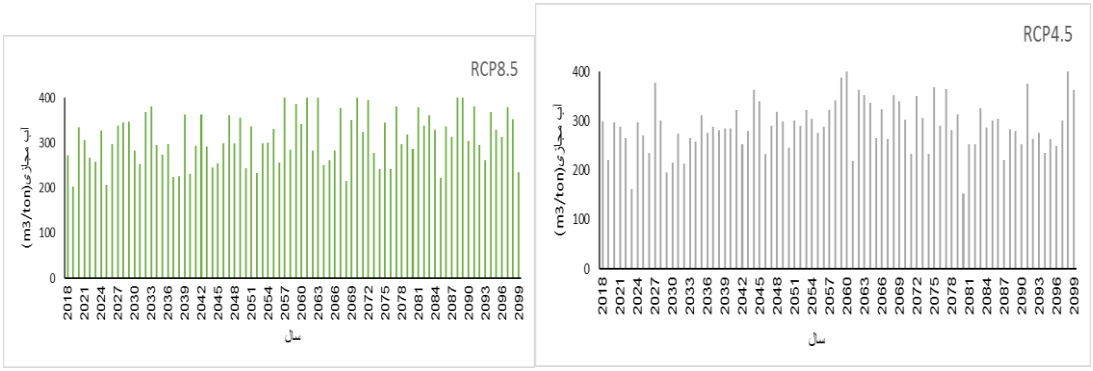
شکل ۸ -تغییرات آب مجازی ذرت در طول فصل رشد، ایستگاه بم، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)



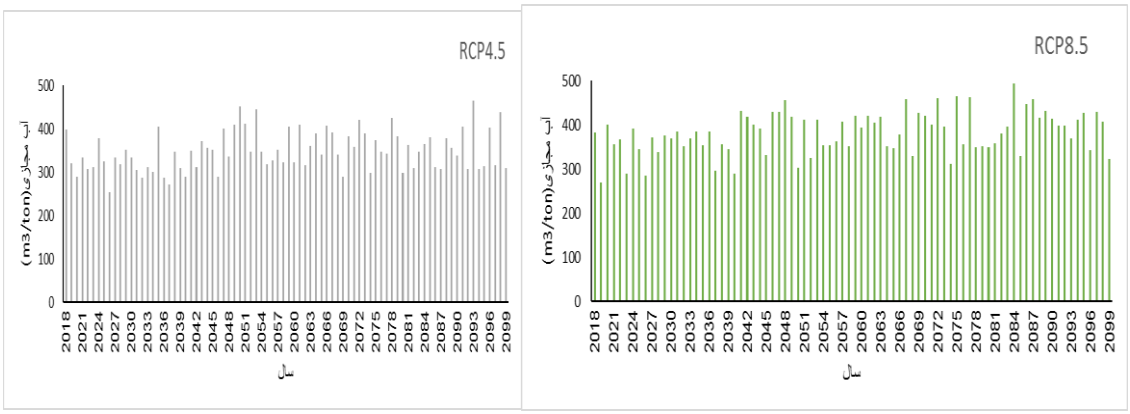
شکل ۹- تغییرات آب مجازی ذرت در طول فصل رشد، ایستگاه جیرفت، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)



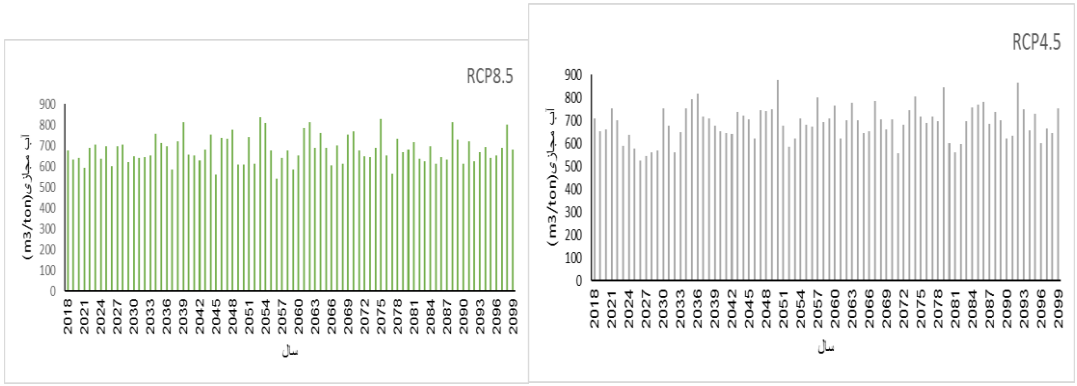
شکل ۱۰ -تغییرات آب مجازی ذرت در طول فصل رشد، ایستگاه کرمان، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)



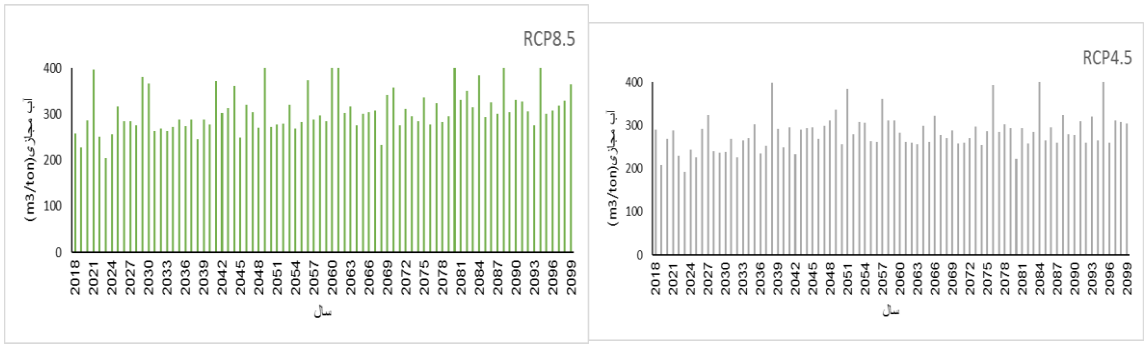
شکل ۱۱-تغییرات آب مجازی سیب‌زمینی در طول فصل رشد، ایستگاه بم، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)



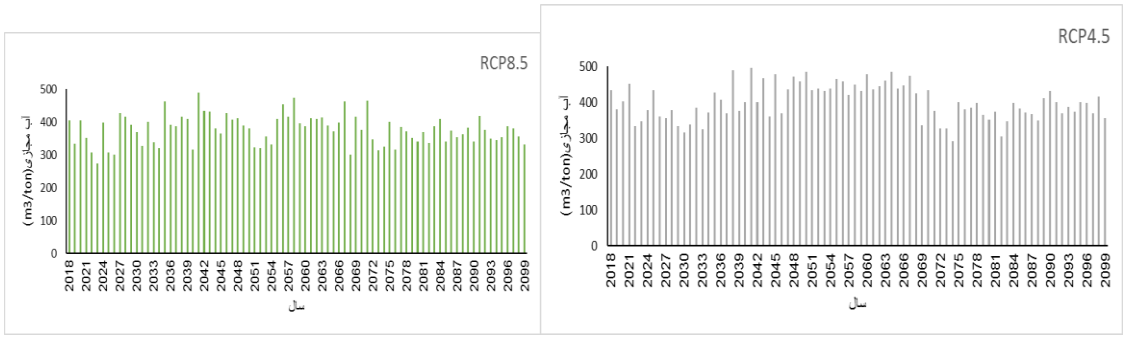
شکل ۱۲-تغییرات آب مجازی سیب‌زمینی در طول فصل رشد، ایستگاه جیرفت، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)



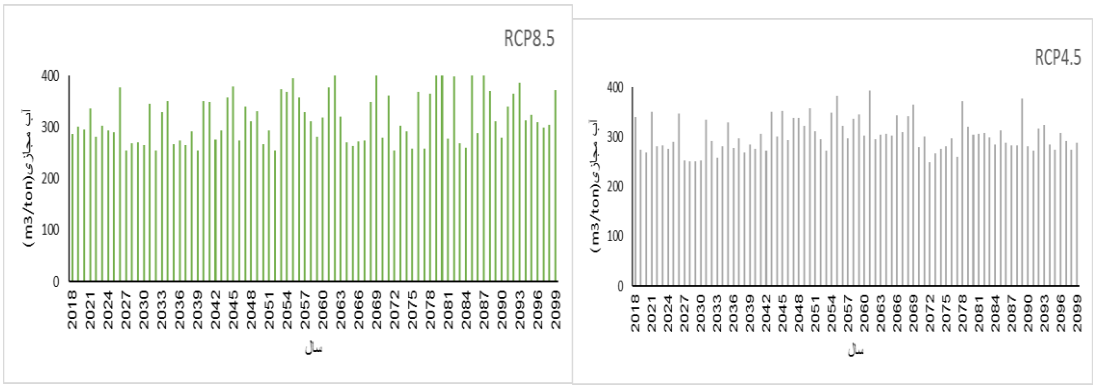
شکل ۱۳-تغییرات آب مجازی سیب‌زمینی در طول فصل رشد، ایستگاه کرمان، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)



شکل ۱۴-تغییرات آب مجازی گوجه‌فرنگی در طول فصل رشد، ایستگاه بم، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)



شکل ۱۵-تغییرات آب مجازی گوجه‌فرنگی در طول فصل رشد، ایستگاه جیرفت، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)



شکل ۱۶-تغییرات آب مجازی گوجه‌فرنگی در طول فصل رشد، ایستگاه کرمان، تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 (۲۰۱۸-۲۱۰۰)

تحت سناریو RCP4.5 میزان متوسط آب مجازی گندم در ایستگاه کرمان (شکل ۴) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۷-۱۹۹۰) کمتر از بم (شکل ۲)، بم کمتر از جیرفت (شکل ۳) و تحت سناریو RCP8.5 متوسط آب مجازی در ایستگاه جیرفت ۱۰درصد کمتر از کرمان، کرمان ۱۱ درصد کمتر از بم می‌باشد. بنابراین در ایستگاه جیرفت تحت سناریو RCP4.5 به علت افزایش در میزان آب مجازی گندم، محصولی پرمصرف به‌حساب می‌آید بنابراین ادامه کشت آن در این ایستگاه جایز نیست و همچنین تحت سناریو RCP8.5 برای ایستگاه بم ادامه کشت این محصول در آینده توصیه نمی‌شود. تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 میزان متوسط آب مجازی گوجه‌فرنگی (شکل‌های ۵، ۶ و ۷)، بم ۱۲درصد کمتر از کرمان و کرمان ۱۱ درصد کمتر از جیرفت می‌باشد و چنان به نظر می‌رسد که کشت گوجه‌فرنگی در ایستگاه جیرفت در آینده پیش رو به دلیل کمبود آب و تنش آبی جایز نیست. تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 متوسط آب مجازی سیب‌زمینی (شکل های ۸، ۹ و ۱۰)، بم کمتر از جیرفت (۱۱ درصد) و جیرفت کمتر از کرمان (۱۰ درصد) می‌باشد. بنابراین کشت سیب‌زمینی تحت هر دو سناریو در کرمان توصیه نمی‌شود. تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5

میزان متوسط آب مجازی جو (شکل های ۱۱، ۱۲ و ۱۳)، جیرفت کمتر از کرمان (۱۱ درصد) و کرمان کمتر از بم (۹ درصد) می‌باشد. بنابراین کشت جو در بم جایز نیست. تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 میزان متوسط آب مجازی ذرت (شکل های ۱۴، ۱۵ و ۱۶)، کرمان کمتر از جیرفت (۹ درصد) و جیرفت کمتر از بم (۲۰ درصد) می‌باشد. بنابراین ادامه کشت ذرت در بم در شرایط تنش آبی در آینده مناسب نیست. متوسط آب مجازی گندم، گوجه‌فرنگی، سیب‌زمینی، جو و ذرت با همدیگر مقایسه شد و نتایج نشان می‌دهد که تحت سناریو RCP4.5 آب مجازی جو بیشتر از گندم، گندم بیشتر از ذرت، ذرت بیشتر از سیب‌زمینی و درنهایت سیب‌زمینی بیشتر از گوجه‌فرنگی می‌باشد و همچنین تحت سناریو RCP8.5 جو بیشتر از گندم، گندم بیشتر از ذرت، ذرت بیشتر از سیب‌زمینی و سیب‌زمینی بیشتر از گوجه‌فرنگی است. تحت هر دو سناریو گوجه‌فرنگی دارای کمترین مقدار نسبت به دیگر محصولات می‌باشد. و اما در ایستگاه بم بیشترین آب مجازی تحت سناریو RCP4.5 مربوط به جو و کمترین مربوط به گوجه‌فرنگی و تحت سناریو RCP8.5 بیشترین را جو و کمترین را سیب‌زمینی دارا می‌باشد، در ایستگاه جیرفت بیشترین آب مجازی تحت سناریو RCP4.5 مربوط به گندم و کمترین مربوط به سیب‌زمینی و تحت سناریو RCP8.5 بیشترین را جو و کمترین را گوجه‌فرنگی می‌باشد، در ایستگاه کرمان بیشترین آب مجازی تحت سناریو RCP4.5 مربوط به گندم و کمترین مربوط به گوجه‌فرنگی و تحت سناریو RCP4.5 بیشترین را جو و کمترین را گوجه‌فرنگی به خود اختصاص داده است. همان‌طور که پیداست به دلیل افزایش آب مجازی گندم و جو در ایستگاه‌های مطالعاتی، ،باید ضمن مد نظر قرار دادن اهمیت راهبردی گیاه گندم در تامین امنیت غذایی وسیاستهای کلان کشور، جایگزینی ارقام کم آب بر و مقاوم به خشکی مد نظر قرار گیرد. بدیهی است گندم به دلیل نقش و جایگاه حساس آن در زنجیره غذایی، نمی تواند یک سویه و تک بعدی در مطالعات براورد آب مجازی مد نظر قرار گیرد. از طرف دیگر با کاشت گوجه‌فرنگی و سیب‌زمینی و صادرات آن‌ها در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. بذر افشان (۱۳۹۶) نشان دادند که در استان هرمزگان میزان آب مجازی گوجه‌فرنگی به‌طوری چشمگیری نسبت به دوره پایه کاهش یافته است، متوسط آب مجازی در تولید گوجه‌فرنگی ۰/۹۳۶ مترمکعب در کیلوگرم می‌باشد. ژائو و همکاران (۲۰۱۴)، نشان دادند که در گروه محصولات c4 معمولاً آب مجازی تغییرات کمتری نسبت به غلظت CO2 دارد و همچنین تغییرات دما و بارش می‌تواند اثرات منفی بر تولید محصول به‌ویژه میزان آب مجازی در دوره‌های آتی بگذارد. . و همچنین روحانی و همکاران (۱۳۸۷) در پژوهش خود و ارایه نتایج مشابه نشان دادند که محصولات مهم ایران غلات، حبوبات، خشکبار و دانه‌های روغنی بر اساس میزان آب مجازی برآورده شده آن‌ها، محصولاتی پرمصرف و میوه‌ها، سبزی‌ها و محصولات صنعتی، محصولات کم‌مصرفی می‌باشند.

بحث و نتیجه گیری

نتایج شبیه‌سازی دمای متوسط در ایستگاه‌های بم، جیرفت و کرمان در دوره ۲۱۰۰-۲۰۱۸ تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 و مقایسه آن با میانگین دوره پایه (۲۰۱۷-۱۹۹۰) حاکی از افزایش دمای متوسط در تمامی ماه‌ها است و این افزایش دما در ماه‌های گرم سال بیشتر و در ماه‌های سرد سال کمتر خواهد بود و افزایش میانگین دما تحت سناریو RCP4.5 بیش از RCP8.5 می‌باشد. همچنین بررسی‌ها نشان از کاهش بارش در فصول گرم سال و افزایش آن در فصول سرد در تمامی ایستگاه‌های مطالعاتی را دارد و افزایش تغییرات بارش تحت سناریو RCP8.5 بیشتر از RCP4.5 می‌باشد. در بارش دوره آتی نسبت به دوره پایه کمتر خواهد داشت.

میزان تغییرات آب مجازی به دست آمده برای همه گیاهان مورد مطالعه افزایشی است که این افزایش برای جو و گندم به‌طور متوسط در دوره آینده افزایش بیشتری از خود نشان می‌دهد و بیشترین افزایش میزان آب مجازی نسبت به دوره پایه در ایستگاه بم مربوط به جو می‌باشد. همچنین به‌طور متوسط کمترین میزان آب مجازی مربوط به گوجه‌فرنگی در ایستگاه بم می‌باشد.

پیشنهادها

با توجه به نتایج حاصل شده از این پژوهش، پیشنهاد می شود قبل از کاشت محصولات در مناطق کشاورزی باتوجه به اقلیم منطقه، برآوردی از آب مجازی محصولات انجام شود زیرا برآورد مقدار آب مجازی یکی از عوامل مناسب گزینش کشت‌های جایگزین در مناطق کشاوزی است. ادامه کشت گیاهان گندم و جو با توجه به کمبود آب منطقه جایز نیست و باید گیاهان جایگزین دیگری که نیاز آبی کمتری داشته در برنامه زراعی کشاورزان گنجانده شود. با توجه به اینکه پژوهش تنها بر روی گیاهان گندم، جو، ذرت، سیب‌زمینی و گوجه‌فرنگی در سه ایستگاه بم، جیرفت و کرمان صورت گرفته، می‌توان با ادامه این تحقیق در دیگر نقاط کشور نسبت به ارایه چشم اندازی از آب مجازی در سایر مناطق کشور و برای محصولات دیگر اقدام نمود.

منابع

1. Allen, R.G., smith, A. and Pereira, L.S. (1998).An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin, 43(2):35-92.
2. Arabi, A., Alizadeh, A., Rajaee, Y. V., Jam, K., and Niknia, N. (2012). Agricultural Water Foot Print and Virtual water budget in Iran related to the consumption of crop products by conserving irrigation efficiency. Journal of Water Resource and Protection, 4:318-324.
3. Babaeian, I., Kwon, W. T., and Im, E. s. (2004). Application of weather generator technique for climate change assessment over Korea. Korea Meteorological Research Institute. Climate Research lab, 98.
4. Fang, S., Pei, H., Liu, Z., Beven, K., and Wei, z. (2010). Water resources assessment and regional virtual water potential in the Turpan Basin, China. Water resources management, 24:3321-3332.
5. IPCC. Climate Change2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate chang; Cambridge University Press: Cambridge. UK, 2014.
6. Steduto, P., Hsiao, T.c., Raes, D. and Fereres, E. (2009). AquaCrop The FAO crop model to simulate yield response to water. Concepts and underlying principles, 101:426-437.
7. Yoo, s. h., Kim, T., Im, H. B., and Choi, J. Y. (2012). Estimation of the international virtual water flow of grain crop products in Korea. Paddy and water environment, 10:83-93.
8. Zhao, Q., Junguo, L., Nikolay, K.H., Obersteiner, M. and Westphal, M. (2014). Impacts of climate change on virtual water content of crops in China. Ecological Informatics, 19:26-34.
9. Baba zade, H., Sarai tabrizi, M. (2012). Assessing the agricultural situation of Hormozgan province from the perspective of virtual water. Journal of Water Research in Agriculture, 4:485-499. (In Persian)
10. Bazrafshan. A., Gorgani nezhad, Z. (2017). Analysis of temporal and spatial changes of virtual water in tomato product in Hormozgan province under climate change. Journal of Water and Soil, 23(1):23-49. (In Persian)
11. Rouhani, N., Yang, S., Sichani, M., Afyoni, F., Mousavi, M. And Kamkar Haghighi, A. (2008). Evaluation of food and virtual water exchange according to water resources in Iran. Journal of Agricultural Science and Technology, 46: 1-22.
12. Farshi, A. And Emdad, M. (2008). Investigating the effect of global warming on increasing agricultural water

consumption. The Second Regional Climate Change Conference, Tehran.

13. Nikbakht Shahbazi, A. (2017). Climate change impact assessment on agricultural crop virtual water under RCPs Scenarios in Khouzestan province. Journal of Earth and Space Physics, 44 (2): 378-363.
14. Tabatabai, M., Ghahreman, N. and Babaeian, I. (2015). Investigating the accuracy of climatic models in estimating temperature and precipitation data in the current century in Iran compared to the climatic average under RCP-AR5 scenarios. National Congress of Irrigation and Drainage, Ferdowsi University of Mashhad.
15. Mehdi Helmi, and Nozar Ghahreman. "Possible effects of climate change on Wheat irrigation requirement (Case study: Alborz region)." 3rd National Conference on Agrometeorology, Karaj.