

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره نهم، شماره سی و پنجم، بهار ۱۳۹۸

تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۰۳/۲۲

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۱۷

صص ۶۰-۷۳

**تحلیل و پیش‌بینی تغییرات خشک‌سالی، تبخیر-تعرق و آب سبز
در حوضه دریاچه ارومیه تحت شرایط تغییر اقلیم**

محمدامین قلعه‌نوی، دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی-دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

سیده فاطمه بابایی پهنه‌کلایی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی-دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

عبدالله درزی نفت‌چالی*، دانشیار آبیاری و زهکشی-دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
رضا جاویدی صباغیان، استادیار مهندسی عمران-مدیریت منابع آب-دانشگاه حکیم سبزواری

چکیده

توسعه‌ی پایدار کشاورزی با چالش‌های زیادی از جمله تغییر اقلیم روبه‌رو بوده که این تغییرات باعث تغییر در الگوی پارامترهای هواشناسی و نیز تغییر نیاز آبی گیاهان می‌شود. در این پژوهش، با توجه به اینکه حوضه دریاچه‌ی ارومیه نقش مهمی در تولید گندم به‌عنوان یکی از محصولات استراتژیک ایران دارد، امکان تأمین نیاز آبی این گیاه به‌وسیله‌ی آب سبز، میزان خشک‌سالی و تغییرات تبخیر-تعرق مرجع در شرایط تغییر اقلیم آینده برای این حوضه بررسی شد. با استفاده از مدل SDSM و داده‌های هواشناسی دوره‌ی پایه (۲۰۱۵-۱۹۶۷) ایستگاه‌های ارومیه و تبریز، داده‌های هواشناسی دوره‌ی آتی (۲۱۰۰-۲۰۱۶) تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 تولید شد. به‌منظور بررسی مقدار تبخیر-تعرق مرجع و همچنین شدت خشک‌سالی، به ترتیب از معادله‌ی فائو-پنمن-مانتیت و شاخص خشک‌سالی SPI استفاده شد. یافته‌های پژوهش ضمن تأیید کارایی مناسب مدل SDSM در برآورد بارندگی و تبخیر-تعرق منطقه‌ی مورد مطالعه، نشان از احتمال افزایش ۶۳ و ۳ درصدی متوسط بارندگی سالانه دوره‌های آتی به ترتیب برای دو ایستگاه تبریز و ارومیه و نیز احتمال کاهش شدت خشک‌سالی نسبت به دوره‌ی پایه دارد. در شرایط تغییر اقلیم، امکان کاهش ۳ و ۱/۵ درصدی متوسط تبخیر-تعرق سالانه به ترتیب برای دو ایستگاه تبریز و ارومیه نسبت به دوره‌ی پایه وجود دارد. همچنین میزان آب سبز با احتمال افزایش همراه خواهد بود. با این‌وجود، افزایش آب سبز قادر به تأمین کل نیاز آبی گندم در منطقه‌ی مورد مطالعه نخواهد بود.

واژه‌های کلیدی: ریزمقیاس نمایی، گندم، نیاز آبی، CanESM2، SDSM.

* Email: adarzi@sanru.ac.ir

نویسنده‌ی مسئول:

۱- مقدمه

افزایش روزافزون تقاضای آب شیرین در جهان برای مصرف در بخش‌های مختلف نظیر صنعت، شرب و کشاورزی، منابع محدود آب شیرین را با خطر جدی استحصال بیش‌تر از حدود پایدار، کاهش و آلودگی مواجه ساخته است؛ بنابراین، استفاده‌ی بهینه و نیز حفظ و توسعه‌ی پایدار منابع آب برای متخصصین صنعت آب از اهمیت بالایی برخوردار است (منتصری و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۰۷۵). با توجه به این‌که کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین بخش مصرف‌کننده‌ی آب در دنیا شناخته می‌شود، مدیریت موفق و صحیح منابع آب برای مقابله با کمبود آب نیازمند درک عوامل و فرآیندهای مربوط است. در سال‌های اخیر، افزایش جمعیت و فعالیت‌های روزافزون انسانی سبب تولید حجم زیادی از گازهای گلخانه‌ای روی کره‌ی زمین شده است که در نتیجه‌ی انتشار این گازها، افزایش دما و تغییرات وسیع اقلیمی در مناطق مختلف این کره خاکی به چشم می‌خورد (IPCC، ۲۰۱۴). توسعه‌ی کشاورزی به‌عنوان فرآیندی دائمی که تحت تأثیر مستقیم اقلیم است، مستلزم تطابق با عوامل مختلف در محدوده و خارج از اکوسیستم‌های کشاورزی است؛ لذا رسیدن به این مهم در آینده با چالش‌های زیادی مواجه است که یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها پدیده‌ی تغییر اقلیم است (درزی نفت چالی و کاراندیش، ۱۳۹۵: ۳۳۴).

بر اساس چهارمین گزارش ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC^۱)، در طول صدسال گذشته، میانگین دمای کره‌ی زمین ۰/۷۴ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود که این افزایش تا سال ۲۱۰۰ به ۱/۸ تا ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد برسد (نیگلی و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۲). گرمایش جهانی که در دهه‌های اخیر از آن به‌عنوان تغییر اقلیم یاد می‌شود، با ایجاد تغییر در الگوی پارامترهای هواشناسی، افزایش تعداد و مقدار رخداد‌های حدی نظیر خشک‌سالی را موجب شده است. به استناد گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، این پدیده تأثیرات بسیاری بر چرخه‌ی هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب داشته است.

محصولات مختلف کشاورزی در طول دوره‌ی رشد خود به مقدار مشخصی آب نیاز دارند که بخشی از این نیاز از طریق بارندگی تأمین می‌شود. تغییر اقلیم نه‌تنها روی رواناب و دبی رودخانه‌ها تأثیر می‌گذارد، بلکه بر مقدار نیاز آبی گیاهان، تاریخ کشت، طول دوره‌ی رشد و باران مؤثر نیز تأثیرگذار است و می‌تواند تقاضای آب در بخش کشاورزی را تحت تأثیر قرار دهد (شیدائیان و همکاران، ۱۳۹۳: ۱). در چنین وضعیتی، امکان به خطر افتادن امنیت غذایی در شرایط تغییر اقلیم وجود دارد، لذا بررسی خشک‌سالی‌ها، تغییرات دمایی و میزان بارندگی‌ها در آینده برای مدیریت هرچه بهتر در زمینه‌ی کشاورزی و جلوگیری از کاهش عملکرد محصولات امری ضروری است.

طی سال‌های اخیر، محققان برای کمی‌سازی خشک‌سالی و تجزیه و تحلیل تغییرات اقلیمی مطالعات زیادی در مناطق مختلف جهان انجام داده‌اند. جوان و همکاران (۲۰۱۶) به‌منظور ارزیابی شاخص‌های خشک‌سالی در حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه نشان دادند که شاخص خشک‌سالی $PNPI^2$ تخمین مناسبی از خشک‌سالی سالانه ندارد؛ درحالی‌که شاخص‌های SPI و RAI^3 نتایجی بهتر و نزدیک‌تری به واقعیت ارائه می‌دهند (Javan et al, 2016: 153). بادو و همکاران (۲۰۱۸) دسترسی به آب سبز و آبی را تحت شرایط تغییر اقلیم در حوضه‌ی رودخانه نیجر مدل‌سازی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که میزان آب سبز در چهار زیرحوضه‌ی مورد مطالعه با افزایش همراه است؛ درحالی‌که آب آبی تنها در یکی از چهار زیرحوضه‌ی افزایش دارد (Badou et al, 2018: 2527). موسوی و همکاران (۱۳۹۵) تغییرات زمانی و مکانی بارش در ایران را تحت تأثیر تغییر اقلیم تا سال ۲۱۰۰ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییر اقلیم باعث افزایش غیریکنواخت بارش در دو مقیاس مکانی و زمانی در بخش اعظم کشور خواهد شد. این افزایش در کرانه‌های دریای خزر، عمان و خلیج فارس، دامنه‌های غربی رشته‌کوه زاگرس و دامنه‌های شمالی رشته‌کوه

1- Intergovernmental Panel on Climate Change
2- Percentage of normal precipitation index
3- Rainfall Anomaly index

البرز بیش‌تر از نواحی مرکزی، شرقی و شمال شرقی ایران خواهد بود. گودرزی و همکاران (۱۳۹۷) میزان تبخیر-تعرق را در حوضه‌ی آبخیز دریاچه‌ی ارومیه تحت شرایط تغییر اقلیم برآورد کردند. نتایج نشان داد که به‌طور متوسط دمای حداقل در سطح حوضه‌ی بین ۰/۲ تا ۳/۴ و دمای حداکثر بین ۰/۹ تا ۲/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد در دوره‌های آبی نسبت به دوره‌ی پایه افزایش خواهد یافت و همچنین میزان تبخیر-تعرق محاسبه‌شده در تمامی ماه‌ها و تمامی فصول در دوره‌ی آبی تحت تأثیر دما، افزایش خواهد یافت. حصیرچیان و همکاران (۱۳۹۷) عملکرد مدل SDSM را در بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش و دما برای حوضه‌ی رودخانه‌ی بشار ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد میانگین دمای حداکثر و حداقل ماهانه در همه‌ی ماه‌های سال با افزایش و همچنین میانگین بارش برای فصل پاییز و بهار به ترتیب با افزایش و کاهش همراه است.

مرور منابع حاکی از آن است که تغییر اقلیم که از آن به‌عنوان یک چالش زیست‌محیطی نام‌برده می‌شود، با افزایش دما در یک منطقه باعث افزایش میزان تبخیر-تعرق نیز می‌شود. از آنجایی که در بسیاری از مناطق ایران به‌خصوص استان‌های آذربایجان غربی و شرقی، کشاورزی نقش پررنگی در اشتغال مردم ایفا می‌کند، تغییرات اقلیمی به وجود آمده با تأثیر مستقیم بر کشاورزی منطقه در آینده، اختلالاتی را در موجودیت آب و نیاز آبی محصولات کشاورزی ایجاد می‌کند. با بررسی آمارنامه‌های وزارت جهاد کشاورزی در ۱۰ سال گذشته می‌توان دریافت دو استان آذربایجان غربی و شرقی به‌مرور سطح زیر کشت آبی خود را کاهش و به سمت افزایش سطح کشت دیم، تغییر رویه داده‌اند. این تغییر رویه در کنار تغییرات اقلیمی به‌وجودآمده، برای حال و آینده باعث می‌شود بررسی الگوی کشت و چگونگی تأمین نیاز آبی محصولات با آب سبز اهمیت ویژه‌ای پیدا کند. با توجه به عدم بررسی این موضوع در تحقیقات گذشته، در این پژوهش ضمن ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی و تبخیر-تعرق، نقش آب سبز در تأمین نیاز آبی محصولات غالب حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه در آینده بررسی شد.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

پژوهش حاضر در حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه که در شمال غرب ایران، بین مختصات جغرافیایی ۴۴ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه تا ۳۰ دقیقه عرض شمالی قرار دارد، انجام شد (شکل ۱). این حوضه حدود ۵۱۸۷۶ کیلومترمربع مساحت دارد که ۶۶ درصد آن منطقه‌ی کوهستانی و ۲۴ درصد منطقه‌ی دشتی و کوهپایه‌ای و ۱۰ درصد مابقی آن را دریاچه‌ی ارومیه تشکیل می‌دهد. حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه عموماً دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های نسبتاً معتدل است. میانگین بارش سالانه در سطح حوضه‌ی برای دوره‌ی آماری ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۱، ۳۱۷ میلی‌متر بوده که این میزان نسبت به دوره‌ی آماری ۱۳۳۰ تا ۱۳۷۳، ۶۸ میلی‌متر کاهش داشته است. شکل ۲ این روند کاهشی را به‌طور اختصاصی برای دو ایستگاه تبریز و ارومیه نشان می‌دهد. دریاچه‌ی ارومیه از طریق ۱۴ رودخانه‌ی دائمی و تعدادی آبراهه و مسیل که به‌صورت فصلی و یا موقتی آب در آن‌ها جریان دارد، تغذیه می‌شود. متوسط سالانه‌ی آب ورودی به دریاچه، ۵۳۰۰ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود که بین ۷۶۰ تا ۱۵۶۲۰ میلیون مترمکعب متغیر است. نقشه‌های کاربری اراضی در حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه نشان می‌دهد که سطح زیر کشت اراضی زراعی آبی و باغی در سال ۲۰۱۳، حدود ۴۳۳۷ کیلومترمربع بوده است. لازم به ذکر است که گندم، محصول زراعی غالب در این حوضه با سطح زیر کشت ۴۸۴۴۲۲ هکتار از مجموع ۸۲۲۸۲۹ اراضی تحت کشت محصولات زراعی است (ستاد احیای دریاچه‌ی ارومیه، ۱۳۹۴: ۱-۸).

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های اقلیمی

تاکنون به‌منظور ریزمقیاس‌سازی آماری، روش‌های مختلفی ارائه شده است. از جمله روش‌هایی که نسبت به سایر روش‌ها کاربرد بیشتری دارد، روش SDSM است. در بین مدل‌های مختلفی که برای ریزمقیاس‌نمایی استفاده می‌شود، مدل SDSM با ترکیب نمودن روش تولید تصادفی داده‌های آب‌وهوایی و تابع انتقالی، عمل ریزمقیاس‌نمایی را انجام می‌دهد (سبحانی و همکاران، ۱۳۹۶: ۳۰۶-۳۰۵). این مدل از جمله اولین ابزارها برای بررسی تأثیرات تغییر اقلیم محلی است که توسط ویلبای و داوسون (۲۰۰۷) در انگلستان توسعه یافت. مدل SDSM بر اساس داده‌های هواشناسی روزانه منطقه‌ی مورد مطالعه و داده‌های بزرگ‌مقیاس NCEP^۴ تنظیم می‌گردد و سپس به‌وسیله‌ی متغیرهای بزرگ‌مقیاس جوی ناشی‌شده از مدل‌های اقلیم جهانی، آب‌وهوای روزانه محلی را برای دوره‌های پایه و آینده شبیه‌سازی می‌کند (Wilby and Dowson, 2007: 8-9).

در این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی رفتار تغییر اقلیم از مدل CanESM2^۵ استفاده شد. این مدل با سناریوهای RCP در سال ۲۰۱۰ توسط یک کمیته‌ی علمی و زیر نظر هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیمی با هدف آماده نمودن مجموعه‌ای از اطلاعات که بتوان از نتایج آن عوامل اصلی تغییرات اقلیمی را ردیابی نمود و نتایج آن را برای مدل‌های اقلیمی به کار برد، منتشر شد (اکبری و همکاران، ۱۳۹۷: ۵۹۸). مدل‌های اقلیمی با استفاده از نتایج این سناریوها، میزان غلظت و انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان آلودگی‌ها و تغییرات کاربری اراضی را نشان می‌دهند. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در این گزارش که به گزارش پنجم معروف است، بر اساس چهار غلظت از گازهای گلخانه‌ای، چهار سناریو مرسوم RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 را منتشر کرد. در مطالعه‌ی حاضر، از دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5 که حد آستانه‌ی بیش‌ترین و کم‌ترین میزان مدیریت عوامل تأثیرگذار بر آزادسازی گازهای گلخانه‌ای در آن‌ها اعمال شده، به‌منظور بررسی شرایط اقلیمی آینده استفاده شد. در صورت عدم اتخاذ هیچ‌گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای تغییر اقلیم، پیش‌بینی شده که آب‌وهوای کره‌ی زمین در خط سناریو RCP8.5 پیش خواهد رفت (جعفرپور و کانونی، ۱۳۹۴: ۵-۶). در این سناریو، برای سال ۲۱۰۰ جمعیت ۱۲ میلیارد نفر خواهد بود و میزان غلظت دی‌اکسید کربن به ۱۹۶۰ قسمت در میلیون خواهد رسید. در واقع در این سناریو نیاز جمعیت کره‌ی زمین به تأمین انرژی، استفاده از انواع انرژی (به‌جز انرژی زیستی) و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای بیش از دیگر سناریوها در نظر گرفته شد؛ اما در سناریو RCP2.6 تا سال ۲۱۰۰ جمعیت حدود ۷ میلیارد نفر پیش‌بینی شده و میزان غلظت دی‌اکسید کربن به ۴۹۰ قسمت در میلیون می‌رسد. در این سناریو به علت رشد فناوری‌های جدید، به‌طور کلی میزان استفاده از انرژی و سوخت‌های فسیلی کمتر است و بیش‌تر از انرژی‌های نو استفاده می‌شود؛ بنابراین این سناریو شامل کم‌ترین نرخ رشد گازهای گلخانه‌ای است (IPCC, 2014).

در این پژوهش، ارزیابی مدل SDSM برای دوره‌ی پایه ۲۰۰۵-۱۹۶۷ انجام شد. برای این منظور، ابتدا مدل از طریق مقایسه‌ی داده‌های هواشناسی با داده‌های NCEP برای دوره‌ی ۱۹۶۷-۱۹۸۷ واسنجی شد. سپس عملکرد مدل در تولید معادله‌های موجود بین داده‌ها، برای دوره‌ی ۲۰۰۵-۱۹۸۷ با استفاده از آماره‌های همبستگی و RMSE^۶، صحت‌سنجی شد.

۲-۲- شاخص خشک‌سالی بارش استاندارد (SPI)

4- National center environment prediction
5- The Canadian earth system model
6- Root Mean Square Error

شاخص SPI توسط مک‌کی و همکاران (۱۹۹۳) ارائه شد. این شاخص بر اساس تفاوت میانگین بارندگی برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس با تقسیم آن بر انحراف معیار به دست می‌آید و تنها فاکتور مؤثر در محاسبه‌ی این شاخص، بارندگی است. در پژوهشی از جوان و همکاران (۲۰۱۶) مشخص شد که استفاده از شاخص خشک‌سالی SPI به‌منظور بررسی خشک‌سالی در حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه نسبت به سایر شاخص‌های ارائه‌شده برتری دارد؛ لذا در این مطالعه از شاخص خشک‌سالی SPI به‌منظور ارزیابی خشک‌سالی طی دوره‌های مختلف استفاده شد. این شاخص بر اساس معادله‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{\delta} \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

که در آن P_i میانگین بارندگی سالانه، \bar{P} میانگین بارندگی در طول دوره‌ی آماری و δ انحراف معیار کل سال‌هاست. در این روش از یک سیستم طبقه‌بندی‌شده برای نمایش شاخص بارش استاندارد استفاده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که اگر شاخص بارش استاندارد منفی مداوم داشته باشد، خشک‌سالی اتفاق می‌افتد. در واقع، وقوع یک خشک‌سالی زمانی شدید است که شاخص بارش استاندارد ۱- یا کم‌تر باشد (Mckee et al., 1993: 180-182).

۲-۳- برآورد آب سبز

آب سبز؛ به رطوبت حاصل از بارندگی نفوذ کرده در لایه‌ی غیراشباع خاک که توسط گیاه به‌صورت تعرق مورد استفاده قرار می‌گیرد، گفته می‌شود. در واقع، آب سبز بخشی از جریان تبخیر-تعرق در چرخه هیدرولوژیکی است. این منبع آبی در مناطق دیم به‌صورت مؤثر به مصرف تعرق گیاه می‌رسد و یا از سطح خاک و آب‌های آزاد به‌صورت تبخیر از دسترس خارج می‌گردد. درحقیقت به بخشی از باران که برای کشت دیم، گیاهان دارویی خودرو، مراتع و جنگل‌های تحت بهره‌برداری مفید واقع می‌شود، آب سبز می‌گویند. در کشاورزی فاریاب نیز مقدار آب سبز برابر بارش مؤثر محسوب می‌شود (Falkenmark et al., 2009: 62-64). برای محاسبه‌ی بارش مؤثر روش‌های مختلفی ارائه شده است که از جمله این روش‌ها می‌توان به روش بارش قابل اطمینان اشاره کرد. در روش بارش قابل اطمینان (رابطه‌ی ۲ و ۳)، هر مقدار از بارش که کم‌تر از $16/8$ میلی‌متر باشد، مقدار بارش مؤثر برابر صفر است (خالقی، ۱۳۹۴). بر طبق این روش داریم:

$$\text{If: } P \leq 70 \text{ mm, } P_{eff} = 0.6P - 10 \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

$$\text{If: } P > 70 \text{ mm, } P_{eff} = 0.8P - 12 \quad \text{رابطه‌ی ۳}$$

در معادلات فوق، P_{eff} : بارش مؤثر هر ماه (mm) و P : بارش کل هر ماه (mm) است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های بارندگی و میزان تبخیر-تعرق دوره‌ی آبی (۲۰۱۰-۲۰۱۶)، نقش آب سبز در تأمین تبخیر-تعرق گیاه در سه دوره‌ی ۲۰۱۶-۲۰۴۰، ۲۰۱۶-۲۰۷۰ و ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۱۰-۲۰۷۱ بررسی شد. با توجه به اینکه گندم، محصول زراعی اصلی تحت کشت در منطقه و محصولی حائز اهمیت در کشور و امنیت غذایی مردم است، دوره‌ی کشت غالب آن در زمان حاضر مبنای محاسبات قرار گرفت. به‌منظور برآورد کمبود آب سبز، ابتدا مقدار تبخیر-تعرق مرجع برای دوره‌ی پایه توسط معادله‌ی فائو-پنمن-مانتیت، به‌صورت روزانه برآورد و با استفاده از ضرایب گیاهی پیشنهادی برای منطقه‌ی مورد مطالعه، مقدار تبخیر-تعرق گیاه محاسبه شد. در ادامه با استفاده از مدل SDSM تحت دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5 مقدار تبخیر-تعرق گیاه و بارندگی برای آینده پیش‌بینی شد.

۲-۴- شاخص‌های ارزیابی

در این پژوهش ارزیابی عملکرد و قدرت پیش‌بینی مدل توسط آماره‌های همبستگی (R) و میانگین مربعات خطا (RMSE) مورد سنجش قرار گرفت. این آماره‌ها به ترتیب بر اساس روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شوند.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{act} - \bar{Y}_{act})(Y_{est} - \bar{Y}_{est})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{act} - \bar{Y}_{act})^2 \sum_{i=1}^n (Y_{est} - \bar{Y}_{est})^2}} \quad \text{رابطه‌ی ۴}$$

در معادله فوق Y_{act} : مقادیر واقعی، Y_{est} : میانگین مقادیر واقعی، Y_{est} : مقادیر برآورد شده و \bar{Y}_{est} : میانگین مقادیر برآورد شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^k (X_k - Y_k)^2}{k}} \quad \text{رابطه ی ۵}$$

در این معادله فوق X_k : مقادیر مشاهداتی، Y_k : مقادیر برآورد شده و k تعداد داده‌ها می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی مدل SDSM

مقادیر ضرایب همبستگی و RMSE حاصله در فرآیند ارزیابی مدل، در جدول ۲ ارائه شد. هر دو ضریب نشان از کارایی و دقت نسبتاً خوب مدل SDSM در برآورد میزان بارندگی و تبخیر-تعرق دارد. با این وجود، مطابق نتایج تحقیقات گذشته که نشان می‌دهد به علت غیرنرمال و شرطی بودن داده‌های بارندگی، مدل دقت کمتری در شبیه‌سازی داده‌های بارندگی نسبت به داده‌های دما دارد (Nury and Alam, 2013: 91)، در این پژوهش نیز مدل SDSM داده‌های بارندگی را با دقت کمتری نسبت به داده‌های تبخیر-تعرق شبیه‌سازی کرد.

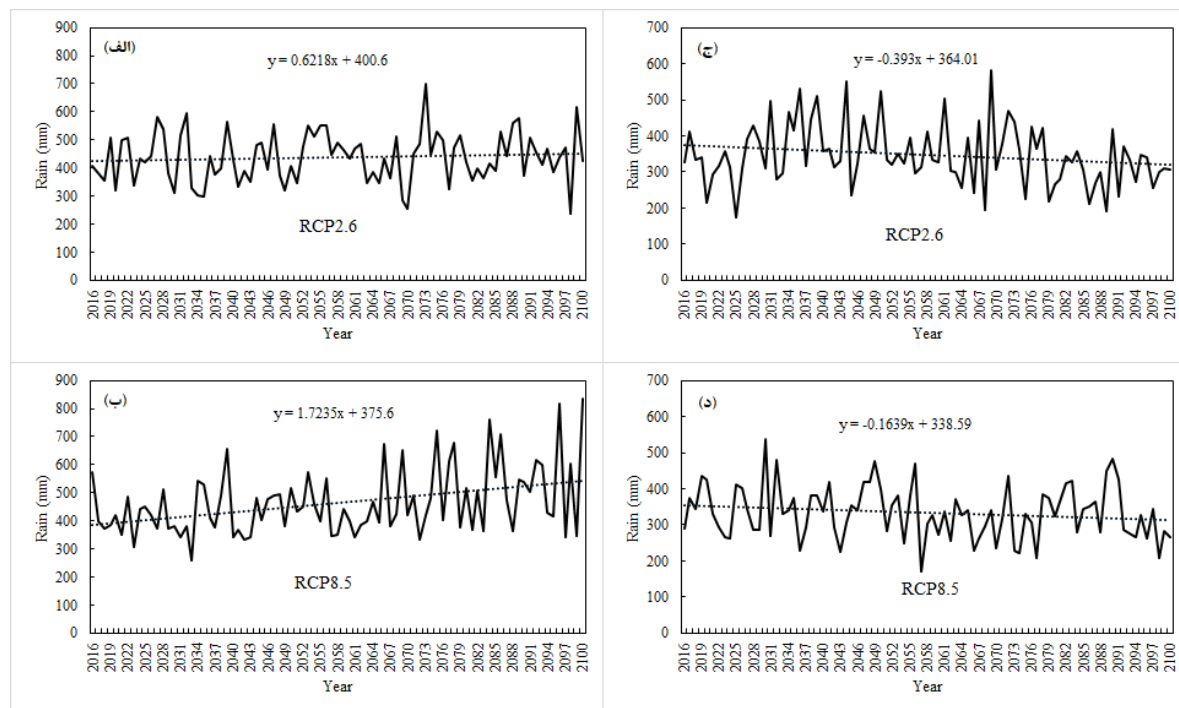
جدول ۲: مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای صحت‌سنجی مدل SDSM در منطقه‌ی مورد مطالعه

صحت‌سنجی				ایستگاه
بارندگی		تبخیر-تعرق		
RMSE (mm)	همبستگی (درصد)	RMSE (mm)	همبستگی (درصد)	
۱۱/۸	۹۲	۰/۱۴	۹۸	تبریز
۸/۶	۹۱	۰/۱	۹۸	ارومیه

۳-۲- تأثیر تغییر اقلیم بر بارندگی

شکل ۳ روند تغییرات بارندگی سالانه را در ایستگاه‌های تبریز و ارومیه، تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 نشان می‌دهد. علی‌رغم روند کاهشی بارندگی در تبریز در دوره‌ی پایه، وضعیت آن در دوره‌ی آتی برای این ایستگاه افزایشی خواهد بود. پیش‌بینی‌ها تحت سناریوی RCP8.5 با اختصاص شیب ۱/۷ به خود، به مراتب روند افزایشی شدیدتری نسبت به سناریو RCP2.6 داشت. در دوره‌ی آتی، بیش‌ترین میزان بارندگی برای ایستگاه تبریز تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب در سال‌های ۲۱۰۰ و ۲۰۷۳ با مقادیر ۸۳۶/۳ و ۶۹۹/۳ رخ می‌دهد که نسبت به میانگین بارندگی دوره‌ی پایه، افزایش ۴۲ و ۳۱ درصدی دارند. نتایج پژوهش‌های مشابه در گذشته (موسوی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۵۲؛ دسترنج و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۱)، افزایش مقدار بارندگی در آینده برای دیگر نقاط ایران را تأیید می‌کند.

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تغییرات بارندگی ارومیه برخلاف تبریز، همانند دوره‌ی پایه از یک روند کاهشی کلی تحت هر دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5 پیروی می‌کند. نرخ کاهش بارندگی در دوره‌ی آتی از نرخ کاهش بارندگی در دوره‌ی پایه کم‌تر است. لازم به ذکر است که در ارومیه، کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار بارندگی تحت سناریو RCP8.5 در سال ۲۰۵۷ و ۲۰۳۰ با مقادیر ۱۷۲ و ۵۳۷ میلی‌متر رخ می‌دهد که نسبت به دوره‌ی پایه به ترتیب افزایش ۳ درصدی و کاهش ۷ درصدی دارند، در حالی که تحت سناریو RCP2.6 کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار بارندگی در سال‌های ۲۰۹۸ و ۲۰۷۳ با مقادیر ۲۳۹ و ۶۹۹ اتفاق می‌افتد که به ترتیب افزایش ۴۳ و ۲۱ درصدی نسبت به دوره‌ی پایه دارند.



شکل ۳: روند تغییرات بارندگی در دوره‌ی ۲۰۱۶-۲۱۰۰ در ایستگاه تبریز (الف، ب) و ارومیه (ج، د)

برای تحلیل دقیق‌تر اثرات تغییر اقلیم، میانگین بارندگی سالانه در سه دوره‌ی ابتدایی (۲۰۱۶-۲۰۴۰)، میانی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) و انتهایی (۲۰۷۱-۲۱۰۰) در جدول ۳ ارائه شد. در ایستگاه تبریز، میانگین بارندگی سه دوره‌ی آتی تحت هر دو سناریو، بیش‌تر از میانگین دوره‌ی پایه است؛ اما مقدار آن در ارومیه تنها برای دوره‌ی ۲۰۱۶-۲۰۴۰ تحت هر دو سناریو و در دوره‌ی ۲۰۴۱-۲۰۷۰ تحت سناریوی RCP2.6 بیش‌تر از دوره‌ی پایه است درحالی‌که میانگین بارندگی در دوره‌ی ۲۰۴۱-۲۰۷۰ تحت سناریو RCP8.5 و دوره‌ی ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت هر دو سناریو نسبت به دوره‌ی پایه کم‌تر است. تحقیقات گذشته نیز نشان‌دهنده‌ی افزایش یا کاهش میزان بارندگی در دوره‌های آتی نسبت به دوره‌ی پایه می‌باشند. با بررسی‌های عارف و علیجانی (۱۳۹۷) برای حوضه‌ی یزد-اردکان مشخص شد که مقدار بارندگی نسبت به دوره‌ی پایه به‌طور میانگین ۸/۸ درصد کاهش می‌یابد. موسوی و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی تغییرات مکانی و زمانی بارندگی تحت شرایط تغییر اقلیم در سطح ایران به این نتیجه رسیدند که بارندگی‌ها برای بخش اعظمی از ایران در دو مقیاس مکانی و زمانی با افزایش همراه می‌شود. بررسی‌ها حاکی از آن است که تغییرات اقلیمی صرفاً باعث کاهش یا افزایش بارندگی‌ها در یک منطقه نمی‌شود و می‌تواند منجر به وقوع بارندگی‌های نابهنگام و نامنظم و یا حتی تغییر در الگوی بارش در یک منطقه شود. در صورتی‌که بخشی از بارش‌ها در خارج از فصل کشت محصولات کشاورزی ریزش کنند، باید از طریق روش‌های آبخیزداری در زمین نفوذ داده شوند یا این‌که توسط آب‌بندان یا سد کنترل شوند تا در طول فصل کشت مورد استفاده قرار گیرند. در این راستا، نتایج پژوهش درزی و همکاران (۱۳۹۴) برای استان مازندران نشان داد که تحت شرایط تغییر اقلیم، میزان بارش در فصول مرطوب افزایش یافته و فصول کم‌باران خشک‌تر خواهند شد.

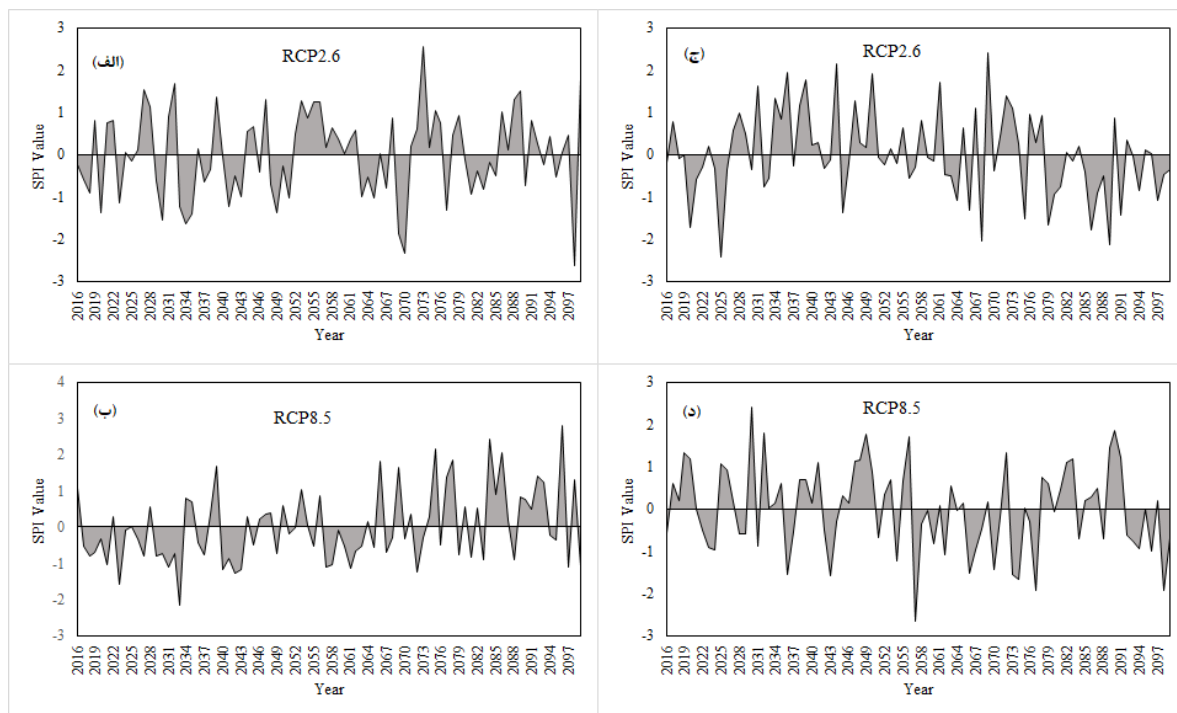
جدول ۳: مقایسه‌ی بارندگی سالانه (میلی‌متر) در دوره‌های پایه و آتی تحت سناریوهای منتخب در دو ایستگاه تبریز و ارومیه

ایستگاه	سناریو	حداقل	حداکثر	میانگین	
تبریز	پایه	۱۴۸/۰	۴۸۵/۰	۲۷۳/۱	
	۲۰۴۰-۲۰۱۶	RCP2.6	۲۹۸/۴	۵۹۶/۳	۴۲۷/۳
		RCP8.5	۲۶۰/۵	۶۵۵/۵	۴۲۳/۱
	۲۰۷۰-۲۰۴۱	RCP2.6	۲۵۶/۷	۵۵۷/۳	۴۲۷/۳
		RCP8.5	۳۳۲/۷	۶۷۵/۰	۴۴۱/۰
	۲۱۰۰-۲۰۷۱	RCP2.6	۲۳۹/۰	۶۹۹/۳	۴۵۵/۸
		RCP8.5	۳۳۲/۸	۸۳۶/۳	۵۲۴/۸
	پایه		۱۶۷/۲	۵۷۹/۶	۳۳۰/۷
	ارومیه	۲۰۴۰-۲۰۱۶	RCP2.6	۱۷۵/۰	۵۳۱/۱
RCP8.5			۲۲۷/۹	۵۳۷/۲	۳۴۸/۴
۲۰۷۰-۲۰۴۱		RCP2.6	۱۹۵/۹	۵۸۲/۹	۳۵۸/۷
		RCP8.5	۱۷۲/۰	۴۷۶/۸	۳۲۷/۹
۲۱۰۰-۲۰۷۱		RCP2.6	۱۹۰/۵	۴۶۹/۹	۳۲۱/۸
		RCP8.5	۲۰۷/۳	۴۸۳/۵	۳۲۷/۶

۳-۳- ارزیابی وضعیت خشک‌سالی در شرایط تغییر اقلیم

شکل ۴ تأثیر تغییر اقلیم بر شدت خشک‌سالی سالانه ایستگاه‌های تبریز و ارومیه را تحت دو سناریوی RCP8.5 و RCP2.6 نشان می‌دهد. پیش‌بینی شدت خشک‌سالی برای ایستگاه تبریز تحت سناریو RCP2.6، یعنی شرایطی که کم‌ترین میزان گازهای گلخانه‌ای در جو آزاد شود، حاکی از آن است که ۴۶ درصد از سال‌ها درگیر خشک‌سالی با شدت‌های مختلف و ۵۴ درصد از سال‌ها در بازه‌های مختلف ترسالی قرار می‌گیرند. حال آن‌که پیش‌بینی خشک‌سالی‌ها در دوره‌ی آتی تحت سناریو RCP8.5 نشان از خشک‌سالی ۵۶ درصدی سال‌ها در دوره‌ی ۲۰۱۶-۲۱۰۰ دارد و مابقی سال‌ها در محدوده‌ی ترسالی قرار می‌گیرند. این شرایط برای ارومیه کمی متفاوت است؛ به‌گونه‌ای که در این ایستگاه تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۵۵ و ۴۶ درصد از سال‌ها درگیر خشک‌سالی می‌باشند.

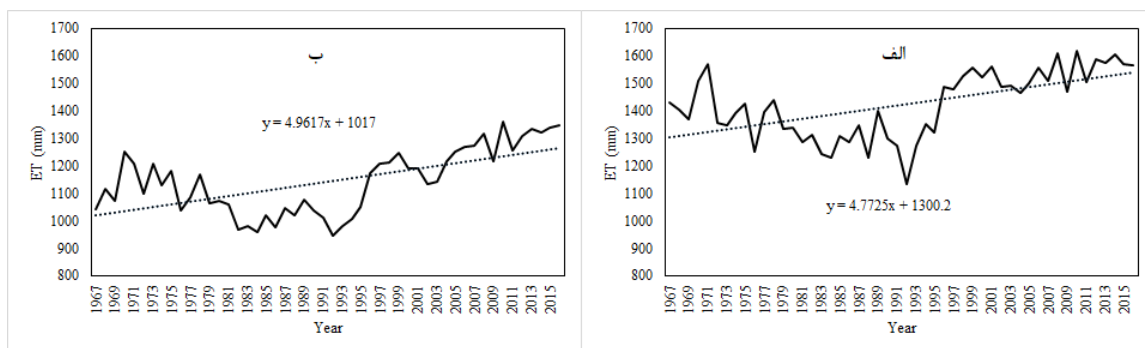
طولانی‌ترین دوره‌ی خشک‌سالی برای تبریز تحت دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب بین سال‌های ۲۰۸۵-۲۰۸۰ و ۲۰۶۳-۲۰۵۷ و برای ارومیه نیز بین سال‌های ۲۰۸۹-۲۰۸۵ و ۲۰۹۶-۲۰۹۲ اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است که شدیدترین میزان خشک‌سالی برای تبریز و ارومیه تحت دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب در سال‌های ۲۰۹۸، ۲۰۳۳ و ۲۰۲۵ و ۲۰۵۷ رخ می‌دهد. نتایج بررسی‌ها حاکی از آن است که عدم قطعیت پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی در آینده نزدیک نسبت به آینده‌ی دور، خیلی کم‌تر است (شبه‌ستانی و همکاران، ۱۳۹۵: ۱۶۹)؛ لذا با توجه به پیش‌بینی وقوع خشک‌سالی‌های شدید در سال‌های ۲۰۲۵ و ۲۰۳۳ برای ارومیه و تبریز، بهتر است با یکپارچه نمودن تصمیم‌گیری‌های کلان و راهبردی مدیریت آب و خشک‌سالی، به‌کارگیری فناوری مناسب‌تر و ارتقای مدیریت در مزارع دیم، توسعه‌ی انواع بیمه‌های خشک‌سالی و تشویق کشاورزان به استفاده از آن‌ها، جایگزین کردن گیاهان با نیاز آبی کم‌تر و مقاوم به خشک‌سالی و سایر راه‌کارهای مؤثر دیگر، اثرات منفی این رخداد اقلیمی به حداقل برسد.



شکل ۴: شدت خشک‌سالی در دوره‌ی ۲۰۱۶-۲۱۰۰ در ایستگاه تبریز (الف، ب) و ارومیه (ج، د)

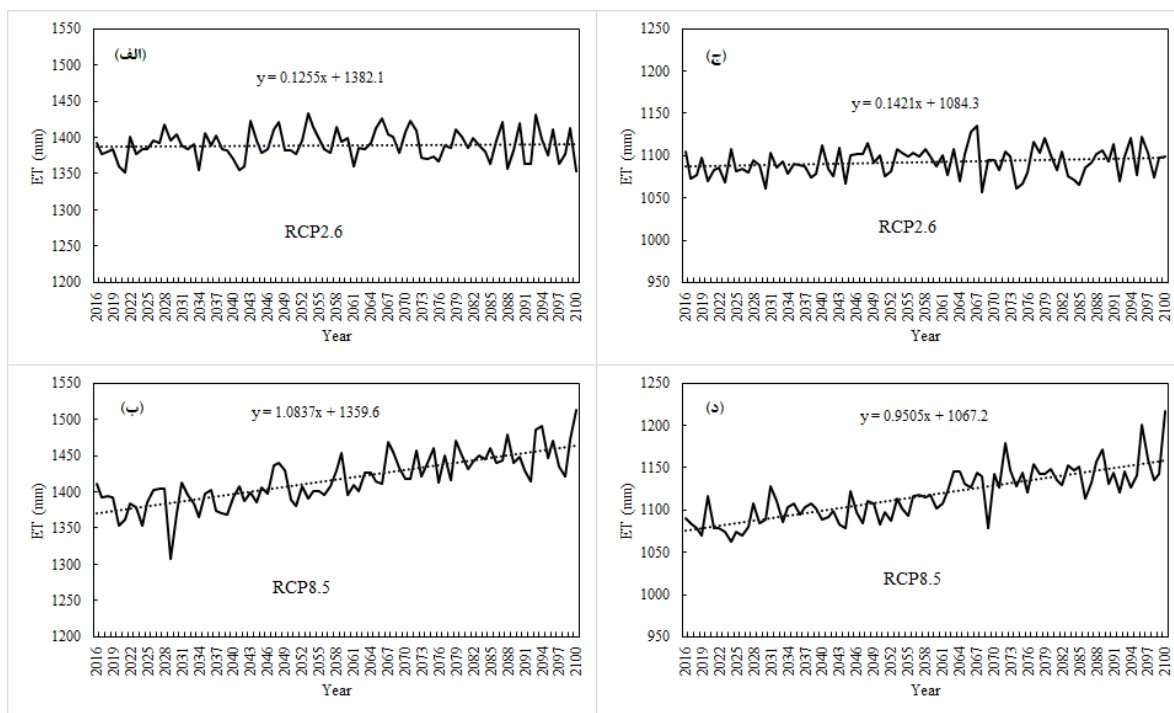
۳-۴- تأثیر تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق و آب سبز

شکل ۵ روند تغییرات تبخیر-تعرق سالانه‌ی ایستگاه‌های تبریز و ارومیه در دوره‌ی پایه را نشان می‌دهد. در این دوره، کم‌ترین و بیش‌ترین میزان این مؤلفه بیلان آب در تبریز ۱۱۳۲/۱ و ۱۶۱۶/۳ میلی‌متر (با متوسط ۱۴۲۱ میلی‌متر) و در ارومیه ۹۴۶/۵ و ۱۳۶۱/۴ میلی‌متر (با متوسط ۱۱۴۳ میلی‌متر) بود. علی‌رغم وقوع روند کاهشی در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰ تا اوایل دهه ۱۹۹۰، تبخیر-تعرق مرجع در دوره‌ی پایه عموماً روند افزایشی داشت. از آنجایی‌که تبخیر-تعرق متأثر از عواملی نظیر دما، بارش، رطوبت، تابش خورشیدی، سرعت باد و غیره است و با توجه به این‌که در دوره‌ی پایه میزان بارش‌ها و همچنین میانگین دما برای منطقه‌ی مورد مطالعه به ترتیب با کاهش و افزایش همراه بوده؛ بنابراین روند نسبی افزایش تبخیر-تعرق در دوره‌ی پایه قابل توجیه است (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۷: ۱). این روند افزایشی تبخیر-تعرق در دوره‌ی پایه بر اساس مطالعه‌ی از نیگلی و همکاران (۲۰۰۹)، به علت افزایش دما در سطح کره زمین نیز گزارش شده است.



شکل ۵: روند تغییرات تبخیر-تعرق مرجع ایستگاه تبریز (الف) و ارومیه (ب) در دوره‌ی پایه

شکل ۶ تأثیر تغییر اقلیم بر میزان تبخیر-تعرق سالانه ایستگاه‌های تبریز و ارومیه را نشان می‌دهد. در حالت کلی، برای تبریز تحت هر دو سناریو مقدار تبخیر-تعرق همانند دوره‌ی پایه از روند افزایشی برخوردار است. با این وجود، چنانچه اقدامات پیشگیرانه در جهت کاهش غلظت گازهای گلخانه‌ای در بالاترین سطح خود صورت گیرد (سناریو RCP2.6)، میزان افزایش تبخیر-تعرق نسبت به سناریو RCP8.5 از شیب کمتری برخوردار خواهد بود. تحت سناریو RCP2.6، مقادیر تبخیر-تعرق در سال‌های مختلف تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند و بین بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار تبخیر-تعرق برای هر سال، تقریباً ۸۰ میلی‌متر اختلاف وجود دارد. این اختلاف‌ها در سناریو RCP8.5 نمود بیش‌تری پیدا می‌کند و به حدود ۲۰۰ میلی‌متر می‌رسد. لازم به ذکر است که بیش‌ترین مقدار تبخیر-تعرق در ایستگاه تبریز بر اساس دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب برای سال‌های ۲۱۰۰ و ۲۰۵۳ با مقدار ۱۵۱۳ و ۱۴۳۳ میلی‌متر رخ می‌دهد. برای ارومیه نیز میزان تبخیر-تعرق در سال‌های آتی تحت هر دو سناریو افزایش خواهد یافت و اگر اقدامات لازم جهت کاهش آزادسازی گازهای گلخانه‌ای (RCP2.6) صورت بگیرد، میزان افزایش تبخیر-تعرق در سال‌های آینده شیب کم‌تری خواهد داشت. همواره افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو زمین، باعث افزایش دما می‌شود که این افزایش دما، افزایش میزان تبخیر-تعرق را در پی خواهد داشت. از آنجایی که تبخیر-تعرق به‌عنوان اصلی‌ترین عامل مؤثر در تعیین نیاز آبی گیاهان مطرح است و با توجه به این که بخش کشاورزی پرمصرف‌ترین بخش در استفاده از آب است، ایجاد تغییر در مقدار تبخیر-تعرق، سهم به‌سزایی در برهم خوردن تعادل آبی خواهد داشت؛ لذا در چنین شرایطی که مقدار تبخیر-تعرق در دوره‌ی آتی افزایش می‌یابد، لازم است به‌منظور کاهش اثرات منفی ناشی از شرایط به‌وجودآمده و برهم خوردن تعادل آبی در منطقه، تدابیر ویژه‌ای نظیر کشت محصولات جایگزین و نیز استفاده از روش‌های نوین آبیاری به‌کار گرفته شود.



شکل ۶: تبخیر-تعرق مرجع در دوره‌ی ۲۰۱۶-۲۱۰۰ در ایستگاه تبریز (الف، ب) و ارومیه (ج، د)

جداول ۴ و ۵ میزان تبخیر-تعرق گندم و آب سبز را در دوره‌ی کشت زمستانه‌ی گندم به ترتیب برای ایستگاه‌های تبریز و ارومیه نشان می‌دهند. در ایستگاه تبریز، میانگین مقدار آب سبز در سه دوره‌ی آتی تحت دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5 نسبت به دوره‌ی پایه ۴۱ تا ۶۲ درصد افزایش می‌یابد. در پژوهشی از لی و بائه (۲۰۱۵) و بادو و همکاران

(۲۰۱۸) نیز افزایش میزان آب سبز در دوره‌ی آتی برای به ترتیب برای منطقه‌ی مانسون آسیا و حوضه‌ی رودخانه‌ی نیجر گزارش شد. برای ارومیه شرایط کمی متفاوت است؛ به‌گونه‌ای که آب سبز در دوره‌ی ۲۰۴۰-۲۰۱۶ تحت هر دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5 نسبت به دوره‌ی پایه با افزایش همراه است، درحالی‌که مقدار آن در دوره‌های ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ تحت سناریوهای RCP8.5 و RCP2.6 کاهش می‌یابد. علی‌رغم این‌که تغییر اقلیم به‌طور نسبی باعث افزایش مقدار آب سبز و کاهش تبخیر-تعرق، نسبت به دوره‌ی پایه شده، بررسی آب سبز در طول فصل کشت در دوره‌های آتی نشان می‌دهد که تنها در ماه ژانویه تحت دو سناریو RCP2.6 و RCP8.5 نیاز آبی گندم برای تبریز تأمین می‌شود و در سایر ماه‌های فصل کشت، نیاز آبی این دو گیاه تأمین نمی‌شود. در ارومیه نیز، آب سبز توانایی برآورد نیاز آبی محصولات را در هیچ‌کدام از ماه‌های فصل کشت، ندارد. با توجه به این‌که در اغلب ماه‌های فصل کشت، نیاز آبی گندم توسط آب سبز تأمین نمی‌شود.

جدول ۴: مقادیر تبخیر-تعرق گندم و آب سبز (میلی‌متر) ایستگاه تبریز در دوره‌های پایه و آتی تحت سناریوهای منتخب

2071-2100				2041-2070				2016-2040				پایه		دوره‌ی سناریو
RCP8.5		RCP2.6		RCP8.5		RCP2.6		RCP8.5		RCP2.6		-		
GW	ETc	GW	ETc	GW	ETc	GW	ETc	GW	ETc	GW	ETc	GW	ETc	پارامتر
۲۹/۳	۲۷/۶	۳۳/۸	۷۲/۹	۳۲/۲	۲۸/۴	۳۶/۰	۲۷/۳	۲۹/۸	۲۷/۲	۳۳/۵	۲۸/۰	۹/۳	۳۰/۱	Jan
۲۴/۴	۳۴/۴	۱۴/۱	۳۶/۹	۱۶/۵	۳۶/۵	۱۴/۴	۳۶/۷	۱۱/۵	۳۷/۱	۱۲/۱	۳۷/۵	۹/۰	۴۳/۱	Feb
۱۵/۸	۸۹/۲	۱۵/۸	۸۳/۴	۱۴/۸	۸۴/۲	۱۹/۸	۸۲/۷	۱۷/۸	۸۱/۷	۱۴/۶	۸۲/۰	۱۷/۵	۸۴/۷	Mar
۶۱/۶	۱۲۹/۹	۶۸/۴	۱۲۵/۴	۶۱/۲	۱۲۴/۷	۵۵/۷	۱۲۶/۹	۵۶/۳	۱۲۵/۱	۵۳/۲	۱۲۶/۱	۲۶/۰	۱۲۷/۷	Apr
۱۰/۵	۱۹۳/۲	۷/۹	۱۸۷/۵	۱۱/۴	۱۸۷/۳	۱۲/۹	۱۸۶/۸	۹/۳	۱۸۴/۳	۱۰/۶	۱۸۵/۲	۲۵/۷	۱۸۰/۷	May
۳۰/۵	۹۷/۳	۲۵/۹	۸۹/۲	۲۸/۷	۹۵/۹	۲۵/۴	۹۰/۰	۲۶/۳	۹۱/۴	۲۵/۶	۹۰/۶	۱۱/۷	۱۰۴/۵	Oct
۷/۹	۵۵/۳	۱۱/۴	۴۶/۴	۶/۱	۵۰/۸	۱۰/۶	۴۸/۴	۹/۲	۴۷/۲	۱۰/۲	۴۷/۶	۱۳/۰	۴۹/۰	Nov
۱۹/۷	۳۱/۷	۱۲/۴	۲۷/۷	۱۳/۱	۲۹/۲	۱۲/۳	۲۸/۱	۱۳/۴	۲۸/۲	۱۴/۱	۲۷/۷	۱۱/۰	۳۰/۱	Dec

جدول ۵: مقادیر تبخیر-تعرق گندم و آب سبز (میلی‌متر) ایستگاه ارومیه در دوره‌های پایه و آتی تحت سناریوهای منتخب

2071-2100				2041-2070				2016-2040				پایه		دوره‌ی سناریو
RCP8.5		RCP2.6		RCP8.5		RCP2.6		RCP8.5		RCP2.6		-		
GW	ETc	GW	ETc	GW	ETc	GW	ETc	GW	ETc	GW	ETc	GW	ETc	پارامتر
۹/۴	۱۹/۷	۱۲/۵	۲۰/۵	۱۱/۲	۲۰/۸	۱۰/۷	۲۰/۲	۱۰/۶	۲۰/۱	۸/۹	۲۰/۲	۱۱/۹	۲۵/۵	Jan
۱۳/۰	۳۲/۹	۱۲/۶	۳۳/۴	۱۲/۱	۳۳/۶	۱۴/۶	۳۲/۱	۱۰/۹	۳۲/۷	۱۱/۵	۳۱/۸	۱۲/۳	۳۸/۵	Feb
۳۱/۸	۸۰/۱	۳۲/۶	۷۴/۳	۲۸/۴	۷۶/۰	۹۲/۳	۷۵/۱	۳۳/۰	۷۵/۲	۲۸/۳	۷۵/۰	۲۲/۸	۷۶/۱	Mar
۲۱/۶	۱۱۷/۵	۱۹/۳	۱۱۶/۴	۲۰/۷	۱۱۷/۸	۲۴/۵	۱۱۷/۱	۲۱/۶	۱۱۵/۱	۲۵/۲	۱۱۶/۱	۲۸/۵	۱۱۴/۲	Apr
۲۸/۷	۱۶۴/۷	۲۶/۴	۱۵۷/۲	۳۰/۴	۱۵۸/۸	۲۷/۴	۱۵۶/۷	۲۹/۹	۱۵۷/۴	۳۲/۱	۱۵۸/۵	۲۷/۳	۱۵۵/۷	May
۹/۱	۹۱/۴	۸/۴	۷۷/۵	۷/۱	۸۱/۰	۸/۹	۷۷/۱	۱۰/۴	۷۸/۰	۹/۰	۷۵/۰	۱۳/۳	۸۵/۷	Oct
۲۰/۱	۴۱/۲	۱۷/۶	۳۷/۸	۱۸/۶	۳۸/۹	۲۰/۶	۳۸/۸	۱۴/۳	۳۷/۱	۲۲/۴	۳۸/۴	۱۸/۷	۴۱/۸	Nov
۱۴/۷	۲۶/۷	۱۱/۲	۲۵/۲	۱۷/۸	۲۶/۳	۱۷/۹	۲۵/۶	۱۹/۲	۲۴/۷	۱۶/۷	۲۵/۲	۱۳/۳	۲۶/۲	Dec

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر تغییر اقلیم بر روند تغییرات بارندگی، خشک‌سالی و تبخیر-تعرق مرجع و همچنین امکان تأمین نیاز آبی گندم از طریق استفاده از آب سبز در حوضه‌ی دریاچه‌ی ارومیه بررسی شد. نتایج نشان داد که بارش‌ها در دوره‌ی آتی برای تبریز و ارومیه به ترتیب روندی افزایشی و کاهشی دارد، اما به‌طورکلی مقدار بارش‌ها به‌طور متوسط برای این دو ایستگاه نسبت به دوره‌ی پایه افزایش می‌یابد. با توجه به افزایش نسبی بارش‌ها در آینده، شدت خشک‌سالی‌ها نیز با کاهش همراه است. بررسی مقادیر تبخیر-تعرق نیز نشان داد که مقادیر تبخیر-تعرق برای دوره‌ی

آبی با کاهش همراه است، اما این کاهش در کنار افزایش میزان آب سبز، باز هم توان تأمین نیاز آبی گیاهان گندم را در منطقه ندارد؛ لذا در چنین شرایطی، به منظور جلوگیری از کاهش عملکرد محصولات و تداوم کشاورزی پایدار منطقه در آینده، لازم است با استفاده از پیشرفت‌های حاصل‌شده در زمینه‌ی کشاورزی با مدیریت در زمان کشت و آبیاری در مراحل حساس از دوره‌ی رشد گیاهان و همچنین استفاده از فناوری‌های نوین نظیر استفاده از سوپر جاذب‌ها و سیستم‌های آبیاری مناسب، از کاهش عملکرد در آینده جلوگیری شود. جلیلی (۱۳۹۵) نشان دادند که استفاده از سوپر جاذب در دشت تبریز تحت شرایط کم‌آبیاری باعث افزایش عملکرد گندم می‌شود. در پژوهشی دیگر از قدمی فیروزآبادی و همکاران (۱۳۸۹)، مشخص شد که استفاده از سیستم آبیاری تیپ در کشت گندم باعث افزایش ۱۳۲ و ۴۵ درصدی کارایی مصرف آب نسبت به روش نشتی و بارانی می‌شود.

۶- منابع

- ۱- جعفرپور، شهرام، کانونی، امین (۱۳۹۴). سناریوهای تغییر اقلیم و مقایسه‌ی آن با گزارش قبلی، دومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران.
- ۲- جلیلی، سعید (۱۳۹۵). بررسی عملکرد و اجزای عملکرد گندم در سطوح مختلف کاربرد سوپر جاذب و تنش آبی در دشت تبریز، پایان‌نامه‌ی مقطع کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی گرایش آبیاری و زهکشی، دانشکده‌ی علوم کشاورزی، دانشگاه تبریز.
- ۳- حصیرچیان، مهرآه، ذهبیون، باقر، خزائی، محمدرضا (۱۳۹۷). ارزیابی عملکرد SDSM در بررسی تغییر اقلیم بر بارش و دما، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. سال ۹، شماره‌ی ۳۴، صص ۱۱۹-۱۰۸.
- ۴- درزی نفت‌چالی، عبدالله، کاراندیش، فاطمه (۱۳۹۴). مدیریت کشت برنج در استان مازندران در شرایط تغییر اقلیم، نشریه‌ی پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۳۰، شماره‌ی ۳، صص ۳۳۳-۳۲۶.
- ۵- درزی نفت‌چالی، عبدالله، مالدار بادلی، مینا، ضیا تبار احمدی، میرخالق، کاراندیش، فاطمه (۱۳۹۴). تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر پایداری کشاورزی در استان مازندران، نشریه‌ی آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۹، شماره‌ی ۶، صص ۱۰۴-۹۹۴.
- ۶- رجبی هاشجین، مهدی، سراوانی، سروش، نوربخش، آرمین، تجریشی، مسعود (۱۳۹۴). ضرورت احیای دریاچه‌ی ارومیه علل خشکی و تهدیدات، ستاد احیای دریاچه‌ی ارومیه.
- ۷- سبحانی، بهروز، اصلاحی، مهدی، باباییان، ایمان (۱۳۹۶). مقایسه‌ی روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری مدل‌های تغییر اقلیم در شبیه‌سازی عناصر اقلیمی در منطقه‌ی شمال غرب ایران، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، دوره‌ی ۴۹، شماره‌ی ۲، صص ۳۰۱-۳۲۵.
- ۸- شبستانی، علی، درزی نفت‌چالی، عبدالله، کاراندیش، فاطمه (۱۳۹۵). پیش‌بینی و تحلیل عدم قطعیت تبخیر-تعرق گیاه مرجع در شرایط تغییر اقلیم در شیراز، نشریه‌ی پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، جلد ۲۳، شماره‌ی ۵، صص ۱۷۴-۱۵۹.
- ۹- شیدائیان، مجید، ضیا تبار احمدی، میرخالق، فضل‌اولی، رامین (۱۳۹۳). تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز خالص آبیاری و عملکرد محصول برنج (مطالعه‌ی موردی: دشت تجن)، نشریه‌ی آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۸، شماره‌ی ۶، صص ۱۲۸۴-۱۲۹۷.
- ۱۰- عارف، محمدرضا، علیجانی، بهلول (۱۳۹۷). بررسی تغییرات دما و بارش حوضه‌ی آبخیز یزد-اردکان با SDSM تحت شرایط تغییر اقلیم آینده، دو فصلنامه‌ی علمی-پژوهشی خشک بوم، جلد ۸، شماره‌ی ۱، صص ۱۰۱-۸۹.
- ۱۱- قدمی فیروزآبادی، علی، چایچی، مهرداد، سیدان، سید محسن (۱۳۸۹). اثر سامانه‌های آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب سه ژنوتیپ گندم و ارزیابی اقتصادی آن‌ها در همدان، نشریه‌ی پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۳۱، شماره‌ی ۲، صص ۱۴۹-۱۳۹.
- ۱۲- گودرزی، مسعود، صلاحی، برومند، حسینی، سید اسعد (۱۳۹۷). برآورد میزان تبخیر-تعرق در ارتباط با تغییرات اقلیمی حوضه‌ی آبخیز دریاچه‌ی ارومیه، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱۲، شماره‌ی ۴۱، صص ۱۳-۱.
- ۱۳- منتصری، مجید، رسولی‌مجد، نگار، بهمنش، جواد، رضایی، حسین (۱۳۹۵). ارزیابی شاخص‌های ردپای محصولات زراعی حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه با اعمال اثر تغییر اقلیم، نشریه‌ی آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۴۰، شماره‌ی ۴، صص ۱۰۸۹-۱۰۷۵.

- ۱۴- موسوی، سید سعید، کاراندیش، فاطمه، طبری، حسین (۱۳۹۵). تغییرات زمانی و مکانی بارش در ایران تحت تأثیر تغییر اقلیم تا سال ۲۱۰۰، فصلنامه‌ی علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال ۷، شماره‌ی ۲۵، صص ۱۶۵-۱۵۲.
- ۱۵- میراکبری، مریم، مصباح‌نژاد، طیبه، محسنی ساروی، محسن، خسروی، حسن، مرتضایی فریزه‌ندی، قاسم (۱۳۹۷). ارزیابی کارایی مدل سری CMIP5 در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی بارندگی، دما و سرعت باد (مطالعه‌ی موردی: استان یزد)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره‌ی ۵۰، شماره‌ی ۳، صص ۶۰۹-۵۹۳.
- 16- Badou, D. F., Diekkrüger, B., Kapangaziwiri, E., Mbaye, M. L., Yira, Y., Lawin, E. A., Afouda, A. (2018). Modelling blue and green water availability under climate change in the Beninese Basin of the Niger River Basin, West Africa. *Hydrological Processes*, 32(16), 2526-2542.
- 17- Falkenmark, M., Rockström, J., Karlberg, L. (2009). Present and future water requirements for feeding humanity. *Food security*, 1(1), 59-69.
- 18- Javan, K., Azizzadeh, M. R., Yousefi, S. (2016). An Investigation and assessment of meteorological drought in Lake Urmia Basin using drought indices and probabilistic methods. *Natural Environment Change*, 2(2), 153-164.
- 19- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014. Climate change 2014: synthesis report. Core Writing Team, Pachauri, R.K., Meyer, L.A. (Eds.), Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 151 IPCC.
- 20- Lee, M. H., Bae, D. H. (2015). Climate change impact assessment on green and blue water over Asian monsoon region. *Water Resources Management*, 29(7), 2407-2427.
- 21- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183). Boston, MA: American Meteorological Society.
- 22- Niggli, U., Fließbach, A., Hepperly, P., Scialabba, N. (2009). Low greenhouse gas agriculture: mitigation and adaptation potential of sustainable farming systems. *Ökologie Landbau*, 141, 32-33.
- 23- Nury, A. H., Alam, M. J. B. (2014). Performance Study of Global Circulation Model HADCM3 Using SDSM for Temperature and Rainfall in North-Eastern Bangladesh. *Journal of Scientific Research*, 6(1), 87-96.
- 24- Wilby, R.L. and C.W. Dawson. (2007). SDSM-A Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts. User Manual.